



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

**ANÁLISIS DE RUTAS DE NIEVE Y PRONÓSTICO DE CAUDALES EN CHILE
CENTRAL: VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

HÉCTOR ELADIO CORREA CÉSPEDES

PROFESOR GUÍA:

JAMES MCPHEE TORRES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

XIMENA VARGAS MESA

JAVIER NARBONA NARANJO

SANTIAGO DE CHILE

OCTUBRE 2013

ANÁLISIS DE RUTAS DE NIEVE Y PRONÓSTICO DE CAUDALES EN CHILE CENTRAL: VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL

En la zona central de Chile, se ubica la mayor cantidad de la población del país, así como el desarrollo de las principales actividades económicas y productivas. Considerando que los ríos de las cuencas ubicadas en esta zona poseen un régimen marcadamente nivo-pluvial, reviste gran importancia cuantificar la nieve disponible previa al deshielo, para así conocer los volúmenes disponibles en dicha temporada.

El objetivo de este estudio, es analizar de manera integral los datos históricamente medidos en rutas de nieve de la zona central del país, con énfasis en la identificación de tendencias y la relación con caudales de deshielo. Además, se evalúan los pronósticos de caudales que año a año realiza la DGA.

Para evaluar los caudales pronosticados, se utilizó el indicador PBIAS (porcentaje de sesgo), considerando tanto las predicciones de la DGA como los datos medidos por las estaciones fluviométricas entre los años 1974 y 2011. En relación a la nieve, se cuentan con información de terreno de las rutas de nieve y snow pillows, así como con información satelital que entrega la posición de la línea de nieve.

El estudio del pronóstico de caudales, da como resultado que en general las estaciones al norte de la latitud 30°S no han mostrado un buen desempeño en la predicción del caudal que registrarán, ocurriendo lo contrario en las ubicadas más al sur. Por lo general, estas últimas logran un desempeño histórico mejor al 20%.

En relación a las rutas de nieve, se obtiene que sus registros coinciden de muy buena forma con los medidos mediante snow pillow. Así mismo para algunas rutas, los máximos anuales presentan una alta correlación con los volúmenes de deshielo en estaciones fluviométricas cercanas.

Calcular el coeficiente de grado día resultó particularmente complicado, ya que el registro de los snow pillow presenta grandes vacíos, así como también lo hacen las temperaturas. Por las razones anteriores sólo se calculó en la estación Portillo, obteniéndose valores que oscilan entre los 3 y 8 [$mm d^{-1}C^{-1}$], coincidiendo con información mostrada en la bibliografía relacionada.

Finalmente, la línea de nieve ha mostrado una tendencia general a ubicarse año a año en cotas menores. El mínimo que alcanza se ve altamente afectado tanto por la precipitación como por la temperatura durante los meses de invierno (JJA).

Como trabajo futuro, se sugiere aprovechar de mejor forma los snow pillows disponibles, así como aumentar la red de monitoreo nival, lo que conllevará a que los caudales pronosticados puedan ser de calidad superior a la actual.

Agradecimientos

A mi familia, especialmente a mis padres Héctor y Fresia, y mis abuelos Augusto y Fresia por su amor y apoyo.

A Loretto por su compañía y sus consejos.

A mis amigos de la U y de Curi Curi por su compañía, amistad y buenos momentos.

A mis profesores, especialmente a James McPhee por las oportunidades y los consejos antes de este trabajo y durante el desarrollo del mismo.

TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos.....	ii
TABLA DE CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 General.....	2
1.2.2 Específicos	2
1.3 Organización del informe	2
2 METODOLOGÍA	4
2.1 Información disponible	4
2.2 Mediciones de terreno y análisis.....	4
2.3 Comparación de caudales	4
2.4 Búsqueda de patrones espacio-temporales y grado día.....	5
3 REVISIÓN DE ANTECEDENTES	6
3.1 Hidrología de nieves	6
3.2 Ruta de nieve y snow pillow.....	7
3.3 Pronóstico de caudales.....	9
3.3.1 Problemas para pronosticar	11
3.3.1.1 Problemas asociados a la información.....	11
3.3.1.2 Problemas asociados a la región de estudio.....	11
3.3.1.3 Problemas relacionados a la aplicación	12
3.4 Medición del error	12
3.5 Coeficiente grado-día.....	13
3.6 Imágenes MODIS.....	14
4 EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO DE CAUDALES.....	18
4.1 Informes de pronóstico de caudales	18
4.2 Registros fluviométricos	19
4.3 Evaluación de los pronósticos.....	20
4.4 Agrupación del sesgo.....	22
4.5 Desempeño en años Niño/Niña	24
4.6 Volúmenes de deshielo.....	27
5 EVALUACIÓN DE RUTAS DE NIEVE Y SNOW PILLOW	31

5.1	Estaciones disponibles.....	31
5.2	Representatividad de rutas de nieve.....	32
5.3	Mediciones en terreno.....	35
5.4	Análisis de rutas de nieve	40
5.4.1	Relaciones espaciales entre rutas.....	40
5.4.2	Comportamiento de la acumulación máxima mensual y anual.....	43
5.5	Cálculo coeficiente de grado-día.....	48
6	LÍNEAS DE NIEVE.....	51
6.1	Evolución temporal de la línea de nieve.....	51
6.2	Cota mínima de la línea de nieve y su relación con volúmenes de deshielo y meteorología.....	54
7	CONCLUSIONES	59
7.1	Comparación de Caudales de deshielo	59
7.2	Rutas de nieve y snow pillows	60
7.3	Líneas de nieve.....	61
7.4	Comentarios finales	61
8	BIBLIOGRAFÍA	63
	ANEXOS I	66
	ANEXOS II	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Caudales de deshielo. Fuente: DGA (2010).....	10
Tabla 3-2. Caudales de deshielo (continuación).	11
Tabla 3-3. Desempeño del pronóstico en base a PBIAS.	13
Tabla 4-1. Estaciones en que se analiza la calidad del pronóstico.	18
Tabla 4-2. Catastro información fluviométrica disponible.	19
Tabla 4-3. Estadísticos de los errores.	22
Tabla 4-4. Desempeño del pronóstico en base a PBIAS (propuesto).	26
Tabla 5-1. Rutas de nieve DGA.....	31
Tabla 5-2. Estaciones snow pillow DGA.....	32
Tabla 5-3. Estadísticos de mediciones de terreno.....	39
Tabla 5-4. Coeficientes de correlación entre rutas de nieve y volúmenes de deshielo. .	42
Tabla 5-5. Registro de las estaciones utilizadas.	43
Tabla 5-6. Equivalente en agua máximo mensual.....	44
Tabla 5-7. Indicadores estadísticos para acumulación máxima anual en rutas de nieve.	47
Tabla 5-8. Valores de DDF para Portillo.....	49
Tabla 6-1. Cuencas con información de línea de nieve.....	51
Tabla 6-2. Pendientes de la línea de tendencia.	54
Tabla 6-3. Estaciones meteorológicas y fluviométricas asociados.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Ciclo del agua.	6
Figura 3-2. Mediciones de densidad de nieve con cuña.	7
Figura 3-3. Mediciones de densidad de nieve con tubo.	8
Figura 3-4. Snow pillow.	9
Figura 3-5. MODIS en satélite Aqua.....	15
Figura 3-6. Imagen basada en la información obtenida por MODIS para el día 11 de Julio de 2005.	15
Figura 3-7. Porcentaje de cobertura nival y altura de nieve para distintas cuencas.....	17
Figura 4-1. Desempeño de histórico de los pronósticos de caudales.	21
Figura 4-2. Histogramas de los errores obtenidos.....	23
Figura 4-3. Comportamiento del pronóstico para años Niño/Niña.....	25
Figura 4-4. Comportamiento del pronóstico para años Niño/Niña según categorías propuestas.....	26
Figura 4-5. Comparación de volúmenes zona centro-norte.	28
Figura 4-6. Comparación de volúmenes zona centro-sur.....	29
Figura 5-1. Snow pillows y rutas de nieve.	33
Figura 5-2. Gráfico de dispersión entre los distintos métodos de medición.	34
Figura 5-3. Snow pillow en estación Portillo, 14 de septiembre de 2012.	35
Figura 5-4. Ubicación de sondajes en terrenos "Cerro Vega Negra" (arriba) y "Portillo" (abajo).	36
Figura 5-5. Densidad de acuerdo a la profundidad en calicata realizada en Cerro Vega Negra	37
Figura 5-6. Equivalente en agua mediciones Cerro Vega Negra.	38
Figura 5-7. Histograma de mediciones en Cerro Vega Negra.....	39
Figura 5-8. Relación entre rutas de nieve de la IV Región.	41
Figura 5-9. Relación entre rutas de nieve de la VIII Región.	41
Figura 5-10. Estaciones fluviométricas y rutas de nieve	42
Figura 5-11. Comparación de máximos para informe de 1991 e información actual.....	46
Figura 5-12. Zonas de cálculo del coeficiente de grado-día	49
Figura 6-1. Evolución temporal de líneas de nieve en cuencas zona centro norte.....	52
Figura 6-2. Evolución temporal de líneas de nieve en cuencas zona centro sur.....	53
Figura 6-3. Relación entre cota mínima de la línea de nieve y la precipitación anual acumulada.....	55
Figura 6-4. Relación entre cota mínima de la línea de nieve y temperatura promedio JJA..	56
Figura 6-5. Relación entre cota mínima de la línea de nieve y volumen de deshielo. ...	57
Figura A I - 1. Equivalente en agua máximo mensual.	66
Figura A I - 2. Equivalente en agua máximo mensual (continuación).....	67

Figura A I - 3. Rutas de nieve, estadígrafos y probabilidades de excedencia periodo 1951-1990.....	68
Figura A I - 4. Coeficientes de correlación entre rutas, precipitaciones y vol. de deshielo.	69
Figura A II - 1. Cerro Olivares (Gumbel).....	70
Figura A II - 2. Quebrada Larga (Pearson).....	70
Figura A II - 3. Cerro Vega Negra (Gumbel).....	71
Figura A II - 4. El Soldado (Pearson).....	71
Figura A II - 5. Nacimiento El Sobrante (Pearson)	72
Figura A II - 6. Portillo (Gumbel).....	72
Figura A II - 7. Barros Negros (Normal).....	73
Figura A II - 8. La Dormida (Pearson)	73
Figura A II - 9. Meseta Barroso (Log-Normal)	74
Figura A II - 10. Lo Aguirre (Normal)	74
Figura A II - 11. Cerro La Gloria (Pearson)	75
Figura A II - 12. Volcán Chillán (Normal).....	75
Figura A II - 13. Alto Mallines (Normal)	76

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En Chile Central (entre la IV y VIII región), se tienen cuencas andinas que poseen un régimen marcadamente nivo-pluvial, con precipitaciones principalmente entre los meses de mayo y agosto, que al ocurrir en elevaciones altas lo hacen en forma de nieve, acumulándose hasta la época de deshielos. Con el fin de cuantificar la nieve caída durante el invierno, la Dirección General de Aguas (DGA), dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP), dispone de una red de rutas de nieve a lo largo de la zona central del país (entre las latitudes 28° y 37°). Estas rutas consisten, básicamente, en una serie de 4 o 5 medidores de altura (estacas graduadas) dispuestas idealmente cada 100 [m]. En base a mediciones periódicas, la DGA realiza una predicción de los caudales para la temporada primavera-verano. Además, se dispone en ciertas cuencas de snow pillows, es decir, balanzas con las que se mide en tiempo real la masa de nieve sobre ellas.

A pesar de que algunas de estas rutas de nieve están instaladas desde la década de los sesenta, no existen muchos estudios recientes que permitan ver su efectividad. Ya durante los años 80, Peña y Nazarala (1983) estudiaron la confiabilidad de las predicciones de la DGA gracias a las rutas de nieve en la cuenca del Maipo, llegando a la conclusión de que las relaciones obtenidas entre rutas y caudales eran bastante buenas. Por su parte, Escobar y Anabalón (1991) elaboraron un informe técnico, del cual se desprende que pese a ser un gran aporte, las rutas de nieve resultan insuficientes y la información disponible en ese momento no era concluyente.

Masiokas et al. (2007) a través de estudio de fotografías e imágenes satelitales mostraron como han retrocedido las líneas de nieve en las cuencas andinas de Chile y Argentina, concluyendo que este fenómeno se debe principalmente al cambio climático.

Teniendo esto en cuenta, se pretende efectuar un estudio actualizado de la validez de los caudales de deshielo predichos históricamente por la DGA. Además, se dispondrá de más información, gracias a mediciones en terreno para dos rutas con snow pillow (Cerro Vega Negra y Portillo), con el fin de ver cuán representativos son de su entorno los sensores allí instalados. Se debe tener en cuenta, que en la zona central de Chile es donde se concentra la mayor cantidad de población del país, así como gran parte de las actividades productivas (agrícolas, ganaderas, industriales, etc.) que más agua demandan.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Analizar de manera integral los datos históricamente medidos en rutas de nieve en la zona central del país, con énfasis en la identificación de tendencias y la relación con caudales de deshielo.

1.2.2 Específicos

1. Analizar retrospectivamente los pronósticos de caudales de deshielo realizados por la DGA para Chile Central (entre las latitudes 30° y 37°) y compararlos con los medidos posteriormente por las estaciones fluviométricas.
2. Estudiar representatividad de las rutas de nieve y snow pillows respecto a su entorno inmediato (una grilla de hasta 500x500 [m]), en base a campaña de mediciones de terreno 2012.
3. Identificar patrones espaciales entre las distintas rutas de nieve disponibles.
4. Actualizar las estimaciones de posición de línea de nieve en función de la latitud y el mes del año a partir de información satelital.
5. Calibrar el coeficiente grado-día para aquellas rutas de nieve con snow pillow y analizar resultados.

1.3 Organización del informe

Se presenta a continuación como se dispone esta memoria:

- **Capítulo 2:** Se presenta la metodología que se siguió para la realización del trabajo de título.
- **Capítulo 3:** Se comienza con la revisión bibliográfica de la memoria. Se plantean el indicador con que se evaluará el pronóstico de caudales y se da una breve descripción en relación a la hidrología de nieves.
- **Capítulo 4:** Se muestran los resultados obtenidos de la evaluación de los caudales de deshielo pronosticados por la DGA. Para esto se muestran las estaciones seleccionadas, así como la información disponible.

- **Capítulo 5:** Es presentada la información disponible en relación a los snow pillows y rutas de nieve, incluyendo los datos medidos en terreno. A su vez, se exponen los resultados del análisis de datos y se evalúa la importancia de tener una red para levantar información de terreno.
- **Capítulo 6:** Se analiza la variación espacial y temporal de la línea de nieve para cuencas de Chile Central, basándose en información satelital. Además, se estudia cómo se relaciona la meteorología con la cota mínima que alcanza la nieve durante la temporada invernal.
- **Capítulo 7:** Finalmente, se plantean las conclusiones de este trabajo, considerando los resultados obtenidos y se sugieren pasos a seguir en relación a las mediciones de acumulación nival.

2 METODOLOGÍA

2.1 Información disponible

Es fundamental contar con los datos medidos históricamente por la DGA en sus estaciones de rutas de nieve, snow pillow, meteorológicas y fluviométricas. También, se necesita la información satelital para determinar la evolución de la línea de nieve en las principales cuencas de Chile Central.

Las principales fuentes de información son las siguientes:

- Información solicitada a través de la Ley N° 20.285 sobre transparencia y acceso a la información pública.
- Sitio web de la Dirección General de Aguas (www.dga.cl).
- División de Hidrología de la Dirección General de Aguas.
- Información de la cobertura de nieve disponible en sitio personal del profesor René Garreaud (<http://www.dgf.uchile.cl/rene/MODIS/>).

En conjunto, los datos obtenidos de estas fuentes, corresponden a la base de datos para el desarrollo del trabajo.

2.2 Mediciones de terreno y análisis

Es importante la recopilación de información de alturas de nieve y confección de calicatas, actividades que forman parte de la campaña de mediciones de terreno 2012 del grupo de Hidrología de Nieves de la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente de la Universidad de Chile. Estas mediciones son realizadas en sectores previamente definidos y corresponden al entorno cercano de las rutas de nieve y snow pillows de los que dispone la DGA. Las rutas de interés para este caso son: Cerro Vega Negra (IV Región) y Portillo (V Región). Con la información obtenida de la campaña de terreno, se realiza un análisis de frecuencia de las alturas medidas en los entornos de los snow pillows. Así, se puede estudiar si las estaciones con las que dispone la DGA son o no representativas de lo que sucede a su alrededor.

2.3 Comparación de caudales

La DGA entrega anualmente, durante el mes de septiembre, una predicción de los caudales que se observarán en algunos ríos de la zona de Chile Central entre ese mes y marzo del año siguiente. Considerando esto, se comparan los pronósticos con los caudales realmente observados posteriormente y que fueron medidos en estaciones fluviométricas. Para esto se realiza un análisis estadístico de los errores y se buscará su relación con la meteorología y la hidrología que los pudo haber generado.

2.4 Búsqueda de patrones espacio-temporales y grado día

Se estudian mediciones históricas de rutas de nieve y snow pillow, para así buscar relaciones temporales y espaciales en cuencas cercanas. Además, con lo anterior e imágenes satelitales se estima la posición de la línea de nieve en función de la latitud y el mes del año.

Finalmente, se busca calibrar el valor del coeficiente grado-día que ayuda en la determinación del agua de escorrentía debido a la fusión de nieve, esto para las estaciones de las que se cuenta con snow pillow.

3 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

3.1 Hidrología de nieves

La hidrología de nieves se entiende como el área de la hidrología que estudia el comportamiento, distribución espacial y temporal, cantidad y calidad de la nieve. Además, de los factores que influyen en su derretimiento y la consiguiente generación de escorrentía (Martínez, 2010).

La nieve se define como un fenómeno meteorológico que es parte del ciclo hidrológico (Cartes, 2009), que consiste en la precipitación a baja temperatura de pequeños cristales de hielo que adoptan formas geométricas fractales y se agrupan en copos de manera granular. La principal característica de la nieve viene dada por su composición física, la cual presenta una estacionalidad de acumulación y derretimiento. Se muestra en la Figura 3-1 un esquema general del ciclo del agua, donde se aprecian las componentes antes descritas.



Figura 3-1. Ciclo del agua. Fuente: U.S. Geological Survey.¹

En regiones montañosas, la nieve y el hielo precipitado afectan de forma clara la hidrología regional, ya que son "capturadas" y almacenadas de forma temporal por las montañas para finalmente ser liberadas en forma de agua (Jansson, et al., 2003). Lo

¹<http://ga.water.usgs.gov/edu/graphics/spanish/wcdiagram.jpg> (consultado el 10/09/2013).

anterior causa diferentes variaciones anuales e incluso diarias en la descarga, diferenciándose entonces de paisajes más planos (Roethlisberger & Lang, 1987).

3.2 Ruta de nieve y snow pillow

Una ruta de nieve corresponde a una línea establecida, usualmente desde algunos cientos de metros hasta a lo máximo unos dos kilómetros de largo, que atraviesa un terreno representativo en una zona montañosa con una acumulación de nieve apreciable. A lo largo de esta ruta, se realizan mediciones de cobertura nival para determinar su equivalente en agua (McGraw-Hill Companies, Inc., 2002).

Por otra parte, las campañas de terreno, conocidas como “sondajes de nieve” (snowsurvey), consisten en el proceso para determinar la profundidad de nieve en numerosos puntos representativos, por ejemplo, a lo largo de una ruta de nieve (McGraw-Hill Companies, Inc., 2002).

Se recomienda además, aprovechar las campañas de terreno para realizar mediciones de la densidad de la nieve utilizando métodos ampliamente masificados (Goodison, 1981), como lo son la realización de calicatas (reconociendo distintos estratos y densidades), usando cuñas para la medición de la masa en un volumen ya conocido (ver Figura 3-2) y ocupar un tubo que permita extraer nieve en todo el perfil, obteniendo así una densidad total y no por estratos (ver Figura 3-3).



Figura 3-2. Mediciones de densidad de nieve con cuña. Fuente: U.S. Geological Survey.²

²http://co.water.usgs.gov/projects/RM_snowpack/sites/Dunckley/images/Dunckley2.jpg(consultado el 10/09/2013).



Figura 3-3. Mediciones de densidad de nieve con tubo. Fuente: Fassnacht et al., 2010.

En relación a los snow pillows, corresponden a dispositivos similares a un colchón de aire o agua relleno con anticongelante. A medida que la nieve se deposita sobre el instrumento, la presión crece, hecho que se relaciona a la acumulación de masa y por ende de equivalente en agua. Estos dispositivos han sido utilizados desde finales de la década de 1960, pero han presentado registros confiables desde finales de los 70's y comienzos de los 80's (Marks, et al., 2001).

En la Figura 3-4, se muestra un esquema que representa un snow pillow acompañado de una estación meteorológica, así como los dispositivos que permiten enviar la información de forma satelital.

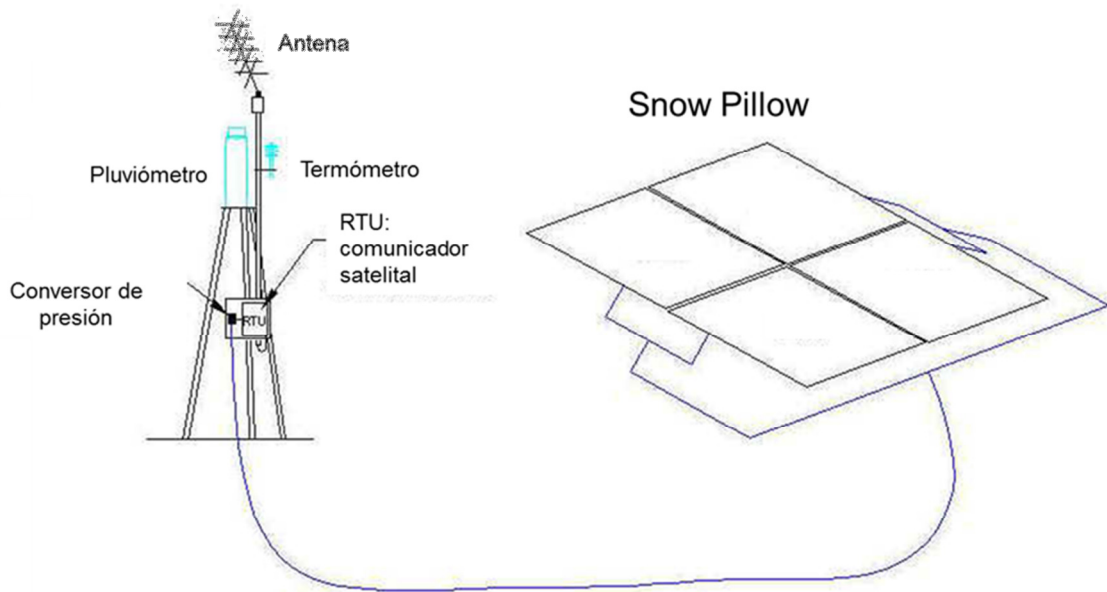


Figura 3-4. Snow pillow. Fuente: Modificado de LADWP³.

Algunas de las ventajas que presentan estos dispositivos, son las siguientes:

- Mediciones de manera continua.
- Permiten contar con una gran cantidad de información en lugares de difícil acceso.

Por otro lado algunas desventajas de los snow pillows son:

- Compleja instalación y mantenimiento.
- Incertidumbre asociada a períodos de espesores de nieve poco profundos o un drenaje del agua contenida en el manto de nieve de forma irregular.

Actualmente, hay disponibles algunas opciones similares a los snow pillows, como es el caso de los snow scales. Estos instrumentos presentan menos dificultades en su instalación. Además los snow scales muestran un mejor comportamiento en periodos de baja acumulación, dado que poseen un sistema de drenaje.

3.3 Pronóstico de caudales

La DGA elabora anualmente un pronóstico de volúmenes de deshielo, caudales medios mensuales y máximos instantáneos para la temporada de riego del período primavera-verano. Esto tiene como propósito dar a conocer la situación hidrológica

³<http://wsoweb.ladwp.com/Aqueduct/snow/pillow.htm>(consultado el 10/09/2013).

general del país, específicamente de las zonas de riego de las principales cuencas del norte chico, zona central y sur. Tal pronóstico abarca desde la cuenca del Río Copiapó hasta la cuenca del Río Ñuble (DGA, 2010).

Este pronóstico se elabora de acuerdo a los siguientes criterios y supuestos:

- El período de pronóstico es el comprendido entre los meses de Septiembre a Marzo, debido a la importancia que éstos tienen en la agricultura de riego y está orientado a estos usuarios.
- Se pronostican los volúmenes para la temporada de deshielo, los que se entregan junto con la probabilidad de excedencia o tipo de año. La distribución mensual de caudales medios puede tener fluctuaciones apreciables en la medida que las variables meteorológicas, tales como precipitación, temperatura, radiación y nubosidad, presenten comportamientos irregulares en el período de deshielo. Con mayor razón pueden presentarse variaciones muy significativas a nivel diario, en relación con el valor medio mensual, por lo que este pronóstico no es estricto para aquellos usuarios cuyas necesidades de caudales diarios son determinantes para su producción. Ante estos requerimientos, los interesados debieran desarrollar sus propias metodologías para satisfacer sus necesidades particulares.
- Los pronósticos se realizan para las cuencas señaladas en el informe, por lo cual los resultados no se aplican a cuencas más pequeñas, intermedias o de secano, que presentan condiciones hidrológicas diferentes. En estos últimos casos habrá que hacer análisis particulares.
- Se consideran como variables independientes los datos registrados hasta el mes de Agosto y para primavera-verano se han supuesto precipitaciones promedios. Por lo tanto, los caudales pronosticados pueden resultar distintos de los reales si se producen durante dicho período, precipitaciones muy diferentes a la situación supuesta.

Se presenta a continuación, a modo de ejemplo, la Tabla 3-1 que corresponde a uno de los pronósticos entregados por la Dirección General de Aguas, en este caso el año 2010.

Tabla 3-1. Caudales de deshielo. Fuente: DGA (2010).

Estación	Caudal medio mensual [m3/s]							Vol. total [Mm3]	V/Ũ	Prob. Exc. [%]
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar			
Copiapó en La Puerta	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.8	15	0.34	90
Huasco en Algodones	2.2	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	25	0.22	80
Elqui en Algarrobal	4.0	4.0	4.5	5.0	4.5	4.0	4.0	80	0.38	80
Grande en Las Ramadas	1.7	2.0	1.7	1.3	1.1	1.0	1.0	25	0.25	85
Choapa en Cuncumén	4.0	7.0	10.0	6.0	3.0	2.0	2.0	90	0.39	85
Aconcagua en Chacabuquito	10.0	17.0	32.0	40.0	32.0	25.0	15.0	450	0.55	85
Mapocho en Los Almendros	4.0	6.0	7.0	6.5	5.0	3.5	2.0	90	0.59	70
Maipo en El Manzano	65.0	80.0	120.0	165.0	155.0	105.0	70.0	2000	0.76	65
Cachapoal en Puente Termas	40.0	65.0	105.0	130.0	115.0	90.0	63.0	1600	0.74	80

Tabla 3-2. Caudales de deshielo (continuación).

Estación	Caudal medio mensual [m3/s]							Vol. total [Mm3]	V/ \bar{V}	Prob. Exc. [%]
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar			
Tinguiririca en Bajo Briones	25.0	35.0	60.0	65.0	60.0	50.0	30.0	850	0.74	75
Teno después de la Junta	27.0	50.0	75.0	70.0	40.0	23.0	20.0	800	0.69	80
Maule en Armerillo	185.0	285.0	360.0	260.0	160.0	115.0	80.0	3800	0.70	80
Ñuble en San Fabián	80.0	115.0	115.0	70.0	35.0	25.0	20.0	1200	0.64	80

Donde V es el volumen pronosticado para la temporada Septiembre-Marzo (en millones de m^3), \bar{V} es el volumen promedio histórico para la temporada Septiembre-Marzo (en millones de m^3) y la probabilidad de excedencia o número promedio de años de 100, con volúmenes superiores a la presente temporada.

3.3.1 Problemas para pronosticar

En relación a la calidad de las predicciones de caudales de deshielo, Leavesley (1989) agrupa los problemas para pronosticar en tres categorías principales, las cuales se presentan en los siguientes apartados.

3.3.1.1 Problemas asociados a la información

Muchos de los mayores problemas en la simulación de derretimiento, se relacionan con la disponibilidad de la información, la calidad de la misma y la capacidad para extrapolar de manera certera mediciones puntuales a valores regionales. Problemas asociados con información de precipitación y temperatura del aire son significativos para modelos de índices de temperatura y balance de energía. Por su parte, la cantidad, calidad y distribución de datos son el problema al hablar de radiación, presión de vapor y velocidad del viento, afectando de forma importante los balances de energía.

3.3.1.2 Problemas asociados a la región de estudio

Algunos de los problemas de la simulación de escorrentía son comunes solo en algunas regiones climáticas o fisiográficas. Muchos de estos problemas regionales, están estrechamente relacionados con la información, por lo mismo asociarlos a solo un tipo de problemas resulta complicado. Otros problemas regionales, están mucho más relacionados a simulaciones de procesos con una hidrología particularmente marcada (solo de esa región). Por ejemplo, el caso de zonas donde se tienen lluvias

sobre nieve, donde el derretimiento aumenta (con esto la infiltración y la escorrentía), lo que resulta en altos peaks de flujo y volumen. Estos procesos son muy difíciles de simular y están relacionados a algunas regiones en particular.

3.3.1.3 Problemas relacionados a la aplicación

Muchas veces, al tener poca información la aplicación real y efectiva de los modelos de derretimiento disponibles resulta escasa, con lo que su capacidad predictiva disminuye. Esto es lo que sucede, por ejemplo, al aplicar modelos exitosos de una cuenca en otra distinta, sin pasar por un proceso de calibración. Finalmente, el hecho de que una simulación de derretimiento funcione de buena manera en un lugar, no implica que lo hará de la misma forma en otro, por lo que se debe ser cuidado al momento de aplicarlas.

3.4 Medición del error

Para la medición del error en el pronóstico de los caudales de la DGA, se evaluaron diversos indicadores, entre ellos la Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), que luego se descartaría, ya que para ríos con una hidrología tan variable en la escala temporal como lo son los de Chile Central, no entregó buenos resultados. También, se descartó la utilización de RMSE, ya que coloca más peso en los errores grandes que en los pequeños (como resultado de elevar al cuadrado cada término), lo que hace que se enfatizen los datos atípicos.

Finalmente, se plantea como indicador el Porcentaje de Sesgo (PBIAS), que ha demostrado comportarse de buena manera analizando caudales (Moriasi, et al., 2007).

El PBIAS mide la tendencia promedio de las simulaciones a ser mayores o menores que las observaciones posteriores (Gupta, et al., 1999). El valor óptimo de PBIAS es 0, donde bajas magnitudes señalan una buena simulación. Valores positivos indican un sesgo a la subestimación y valores negativos indican sesgo a la sobreestimación (Gupta, et al., 1999). PBIAS se calcula de la siguiente forma:

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \right] \quad (3-1)$$

Donde Y_i^{obs} es el caudal observado, Y_i^{sim} es el pronosticado y PBIAS es la desviación de los datos evaluados, expresados como porcentaje.

Utilizando este indicador, la calidad de los resultados se divide en tres categorías (Van Liew, et al., 2005) que se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Desempeño del pronóstico en base a PBIAS. Fuente:Van Liew et al. (2005).

Desempeño del pronóstico	PBIAS
Bueno	$PBIAS < \pm 20$
Satisfactorio	$\pm 20 \leq PBIAS < \pm 40$
Insatisfactorio	$PBIAS \geq \pm 40$

Para efectos de evaluar el comportamiento histórico de los pronósticos, se puede calcular un indicador que incorpore todos los valores obtenidos. De esta forma se tendrá:

$$PBIAS_{prom} = \frac{\sum_{i=1}^n |PBIAS_i|}{n} \quad (3-2)$$

Donde n es el número de años en los cuáles se evaluó la calidad del pronóstico.

3.5 Coeficiente grado-día

Muchos estudios han revelado una alta correlación entre el derretimiento y la temperatura del aire. Braithwaite y Olesen (1989) encontraron un coeficiente de correlación de 96% entre el derretimiento anual de hielo y la suma positiva de las temperaturas del aire. Aunque se simplifican muchos procesos complejos que son mejor evaluados mediante balance de energía, modelos basados en la temperatura tienden usualmente a coincidir en sus resultados en la escala de cuenca, con los de energía (WMO, 1986). La razón del éxito de los índices de temperatura del aire, pese a que la energía de derretimiento es predominantemente de origen radiativo, se atribuye a la alta correlación de la temperatura con varios componentes del balance de energía (Sato, et al., 1984). Ohmura (2001) analizó las bases físicas de los modelos basados en temperatura, encontrando una alta influencia de la radiación de onda larga, que usualmente es por mucho la fuente de calor más importante para el derretimiento en conjunto con el flujo de calor latente, los que proveen cerca del 75% de la energía necesaria para derretir la nieve. Ambos flujos están altamente relacionados a la temperatura, lo que genera entonces la cercana relación ya descrita.

Los modelos de índice de grado-día se basan en la suposición de una relación entre el derretimiento y la temperatura del aire, generalmente representada como la forma positiva de la suma de las temperaturas. La formulación más básica relaciona la cantidad de hielo y nieve derretida, M (mm), durante un periodo de n intervalos de tiempo, Δt (d), con la suma de temperaturas positivas para cada intervalo, T_i^+ , durante el mismo periodo y el factor de proporcionalidad DDF (degree-day factor, expresado en $[mm d^{-1} \circ C^{-1}]$).

$$\sum_{i=1}^n M_i = DDF \sum_{i=1}^n T_i^+ \Delta t_i \quad (3-3)$$

Finalmente, según Hock (2003), los modelos basados en el índice grado-día (también llamados de índice de temperatura) han sido tan masificados gracias a cuatro razones:

1. Amplia disponibilidad de información de temperatura.
2. La interpolación de los datos necesarios por el modelo resulta relativamente fácil, como es el caso de la temperatura del aire.
3. Generalmente, los modelos de coeficiente grado-día poseen un buen desempeño a pesar de su simplicidad.
4. Computacionalmente no son exigentes.

Actualmente, existen formulaciones más complejos que el presentado en la ecuación (2-3). Dentro de esta categoría se pueden encontrar algunos que incorporan como variable una temperatura umbral (diferente a los 0°C), con lo que se modifica el término T_i^+ de la ecuación.

Por otro lado, existen modelos denominados Grado-día mejorado, que consideran principalmente dos factores (Pellicciotti, et al., 2005):

1. La incorporación de variaciones en la radiación incidente y el albedo dentro del cálculo del derretimiento.
2. El desarrollo de una representación un poco más física del balance de energía superficial del modelo, a través de la separación de las fuentes de energía entre las que dependen y las que no lo hacen de la temperatura.

La idea principal, es mejorar el modelo, pero sin que pierda su simpleza.

3.6 Imágenes MODIS

Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) es un instrumento científico lanzado en órbita terrestre por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en 1999 a bordo del satélite Terra y en 2002 a bordo del satélite Aqua.

MODIS mide, por ejemplo:

- Temperatura de superficie (suelo y océano), detectando incendios.
- Color del océano (sedimentos, fitoplancton).
- Cartografía de la vegetación global, detectando cambios.
- Características de la nubosidad.
- Concentraciones de aerosoles.

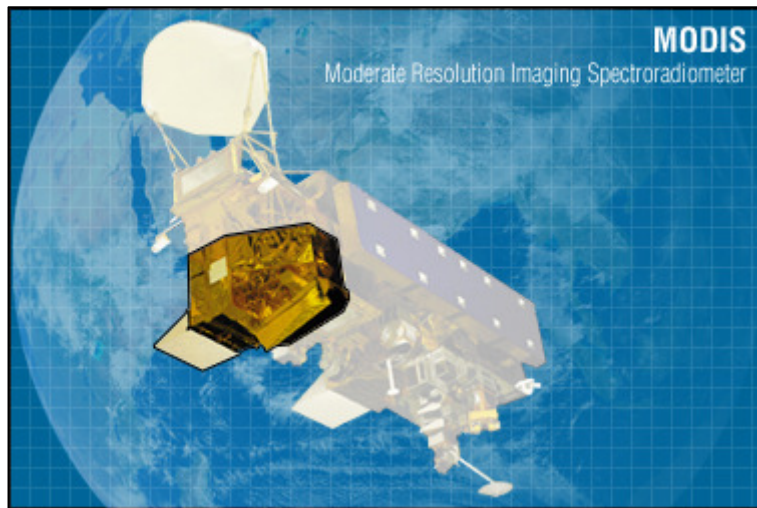


Figura 3-5. MODIS en satélite Aqua. Fuente: Aqua Project Science.

El instrumento de 274 kg (que se muestra en la Figura 3-5) capta datos en 36 franjas espectrales en longitudes de onda a partir de 0,4 μm y hasta 14,4 μm . Juntos, Terra y Aqua cartografían todo el planeta en plazos de uno a dos días. Fue diseñado para proveer medidas en gran escala de la dinámica global, incluyendo cambios en la cobertura de nubes, procesos que ocurren en los océanos, en la Tierra y en la atmósfera más baja. Los sensores poseen un canal para detectar nubes de tipo cirrus, relacionadas con el calentamiento global. MODIS también permite cartografiar áreas cubiertas por nieve y hielo traídos por tempestades de invierno y temperaturas frías. Se muestra en la Figura 3-6 una imagen de la tierra basada en las información obtenida a través de MODIS, esto para el día 11 de julio de 2005.

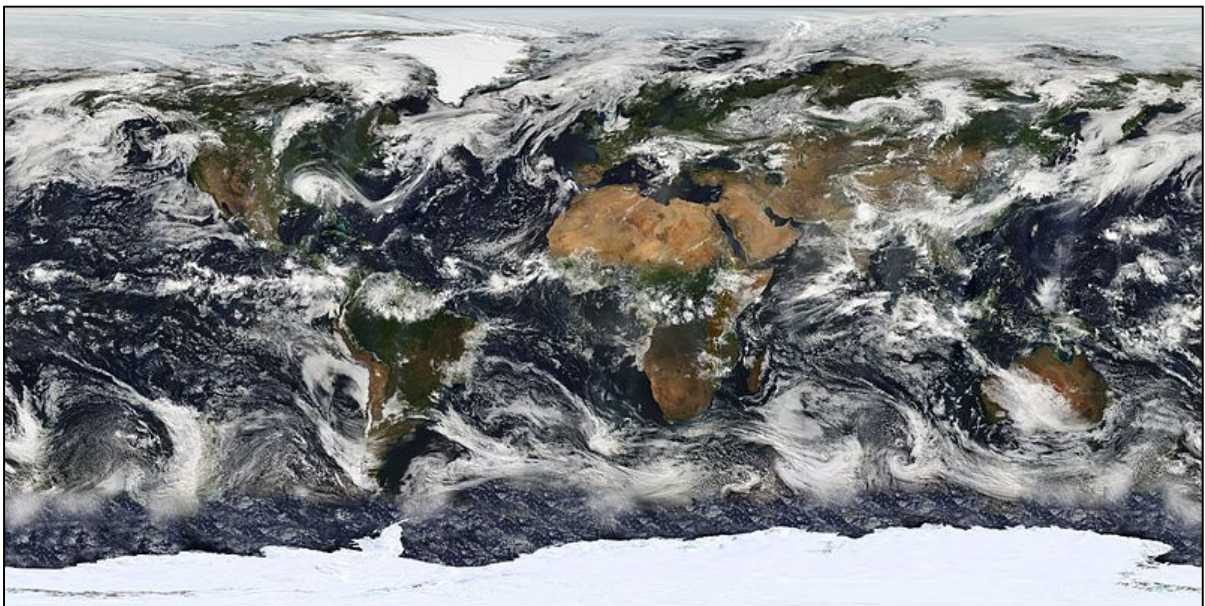


Figura 3-6. Imagen basada en la información obtenida por MODIS para el día 11 de Julio de 2005. Fuente: NASA Earth Observatory.

En particular, el “MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid (MOD10A1)” es un proyecto perteneciente al National Snow & Ice Data Center (NSIDC), dependiente de la NASA. Dicho proyecto entrega información de cobertura nival y albedo de la nieve. El formato de la información es Hierarchical Data Format- Earth Observing System (HDF-EOS). MOD10A1 consiste en recuadros de 1200x1200 [km], con una resolución de 500[m] en un mapa de proyección sinusoidal.

Actualmente, en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, en una iniciativa a cargo de René Garreaud⁴, se realiza un procesamiento de datos, transformando la grilla sinusoidal a geográfica, para luego obtener la fracción de cobertura nival (F_n) en un conjunto de cuencas Andinas. La fracción nival es definida como:

$$F_n = \frac{Px_{nieve}}{Px_{validos}} * 100 \quad (3-4)$$

Donde Px_{nieve} es el número de píxeles identificados con nieve, $Px_{validos}$ es el número de píxeles válidos, es decir el número total de píxeles dentro de una cuenca, restando los que fueron identificados como nubes.

El cálculo de F_n se realiza solo cuando la fracción nubosa ($F_c = \text{Píxeles identificados con nubes} / \text{Total de Píxeles} * 100$) es inferior al 30%.

Aún cuando $F_c < 30\%$ la presencia de nubes introduce una incertidumbre en el cálculo de F_n , el cual es cuantificado como un error $dF_n = R(F_c, F_n)$ donde la función R fue determinada empíricamente.

Para cada cuenca existe un archivo en formato ASCII con la información histórica de la cobertura nival desde el año 2001 hasta el presente.

La información está organizada en las siguientes columnas:

- Columna 1: Año (primeros 4 dígitos) + Día Juliano (tres últimos dígitos) [por ejemplo, 2001116 = Día 116 del 2001].
- Columna 2: Fracción de área nival (0...1; NaN: fracción no disponible por ocultamiento nuboso).
- Columna 3: Fracción de área cubierta por nubes (0...1).
- Columna 4: Error en estimación de Fracción Nival.
- Columna 5: Altura de la línea de nieve.

En algunos casos existen días repetidos, en otros casos, hay días no disponibles. Por lo tanto, la secuencia temporal no es continua. Se pueden ver en la Figura 3-7 las cuencas que son analizadas en este proyecto, así como también el porcentaje de cobertura nival y la altura de la línea de nieve, para este caso el día 1 de abril de 2013.

⁴<http://www.dgf.uchile.cl/rene/MODIS/>

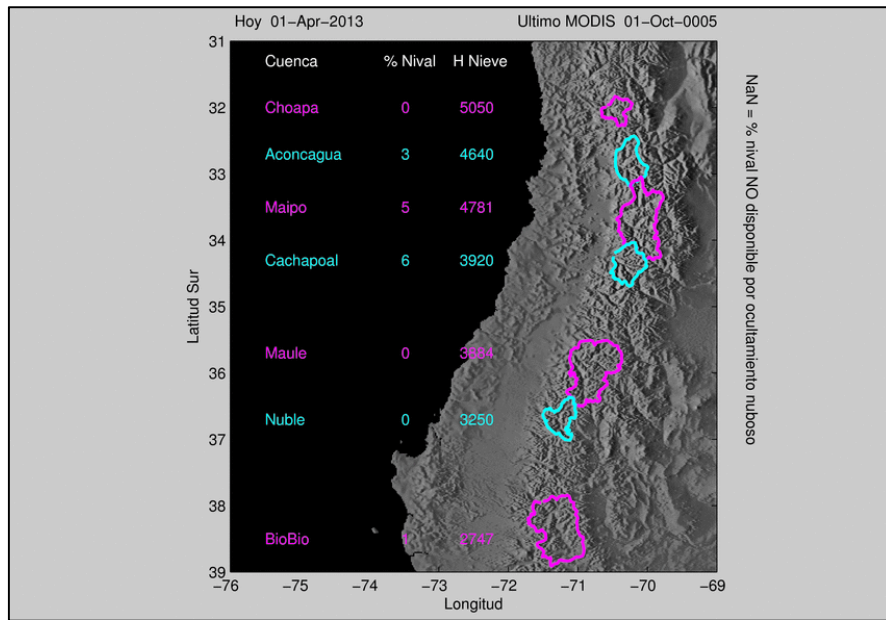


Figura 3-7. Porcentaje de cobertura nival y altura de nieve para distintas cuencas. Fuente: Garreaud 2013.⁵

⁵<http://www.dgf.uchile.cl/rene/MODIS/> (consultado el 01/04/2013).

4 EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO DE CAUDALES

4.1 Informes de pronóstico de caudales

Desde el año 1974 la DGA entrega un pronóstico de los caudales de deshielo esperables durante el periodo Septiembre-Marzo. Esta estimación se realiza para las principales cuencas del valle central y corresponde al caudal medio mensual esperado. Las predicciones se realizan en esta zona, considerando que es donde se agrupa la mayor cantidad de población, así como donde se desarrolla la mayor parte de las actividades agrícolas del país.

El pronóstico se realiza para un punto donde se encuentra una estación fluviométrica de la misma DGA. Por lo anterior, es posible hacer la comparación, ya que se dispone de las mediciones de caudal en los puntos donde fue hecho el pronóstico. Todos los informes realizados hasta el momento están disponibles en el sitio web de la institución estatal.

Con el fin de analizar tendencias (al menos al mediano plazo), se utilizan solamente aquellas estaciones donde se comparten como mínimo diez años de registro de pronósticos y mediciones. Las estaciones escogidas bajo este criterio se muestran en la Tabla 4-1 y luego se esquematizan en la Figura 4-1.

Tabla 4-1. Estaciones en que se analiza la calidad del pronóstico.

Estación	Cuenca	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)
Copiapó en La Puerta	Copiapó	27°48'	70°07'
Huasco en Algodones	Huasco	28°44'	70°30'
Elqui en Algarrobal	Elqui	29°59'	70°35'
Grande en Puntilla San Juan	Limarí	30°43'	70°52'
Choapa en Cuncumén	Choapa	31°58'	70°35'
Aconcagua en Chacabuquito	Aconcagua	32°51'	70°31'
Mapocho en Los Almendros	Maipo	33°22'	70°27'
Maipo en El Manzano	Maipo	33°36'	70°23'
Tinguiririca en Bajo Briones	Rapel	34°43'	70°49'
Teno después de la Junta	Mataquito	35°00'	70°49'
Ñuble en San Fabián	Itata	36°36'	71°36'

Se observa que de las estaciones seleccionadas, dos corresponden a la Región de Atacama, tres a la de Coquimbo, una a la de Valparaíso, dos a la Metropolitana, una a la de O'Higgins, una a la del Maule y finalmente una a la del Bío-Bío.

4.2 Registros fluviométricos

Según las estaciones en las que se quiere evaluar el pronóstico (Tabla 4-1), se obtiene la información relacionada a los caudales efectivamente registrados en dichas estaciones de la DGA. Se debe tener en cuenta que los registros necesarios corresponden a los caudales medios mensuales entre septiembre del año del pronóstico y marzo del año siguiente, siete meses en total. Se muestra en la Tabla 4-2 la información disponible para evaluar los pronósticos.

Tabla 4-2. Catastro información fluviométrica disponible.

EstaciónAño	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Copiapó en La Puerta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	6
Huasco en Algodones	-	-	-	-	-	-	7	7	7	7	7	7	7
Elqui en Algarrobal	-	-	-	4	6	7	7	7	7	7	7	7	7
Grande en Puntilla San Juan	-	-	-	-	-	-	-	-	7	7	7	7	6
Choapa en Cuncumén	7	7	0	5	7	7	7	7	7	7	7	7	6
Aconcagua en Chacabuquito	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Mapocho en Los Almendros	7	7	0	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Maipo en El Manzano	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Tinguiririca en Bajo Briones	7	5	6	6	7	7	7	7	0	0	4	7	0
Teno después de la Junta	-	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6
Ñuble en San Fabián	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
EstaciónAño	1987	1988	1989	1990	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Copiapó en La Puerta	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Huasco en Algodones	7	0	0	0	0	0	7	7	7	7	7	7	7
Elqui en Algarrobal	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Grande en Puntilla San Juan	7	7	7	7	7	7	6	6	7	7	7	7	7
Choapa en Cuncumén	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Aconcagua en Chacabuquito	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Mapocho en Los Almendros	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Maipo en El Manzano	3	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Tinguiririca en Bajo Briones	7	7	6	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7
Teno después de la Junta	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Ñuble en San Fabián	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	4	7	7

Tabla 4-2. Catastro información fluviométrica disponible (Continuación).

EstaciónAño	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Copiapó en La Puerta	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	2
Huasco en Algodones	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Elqui en Algarrobal	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Grande en Puntilla San Juan	7	7	7	7	7	-	-	-	-	-	-	-
Choapa en Cuncumén	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	0
Aconcagua en Chacabuquito	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	0
Mapocho en Los Almendros	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Maipo en El Manzano	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Tinguiririca en Bajo Briones	7	7	7	7	7	7	7	5	3	0	4	0
Teno después de la Junta	7	7	7	7	7	7	7	5	7	7	6	7
Ñuble en San Fabián	7	7	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7

Obs.: Cada valor corresponde al número de registros disponibles para los meses relacionados al pronóstico según el año en que éste fue publicado, a excepción del símbolo “-“ que implica ausencia de pronósticos para dicha estación en ese año.

4.3 Evaluación de los pronósticos

Para evaluar el desempeño anual del pronóstico se utilizó el indicador propuesto en la fórmula (3-1).

Con el fin de conocer el desempeño histórico del pronóstico para cada estación se utilizó la fórmula (3-2). En la Figura 4-1 se resume la calidad histórica de los pronósticos, de acuerdo a la ubicación de cada una de las estaciones nombradas en la Tabla 4-1, esto según los criterios mostrados en la Tabla 3-3.

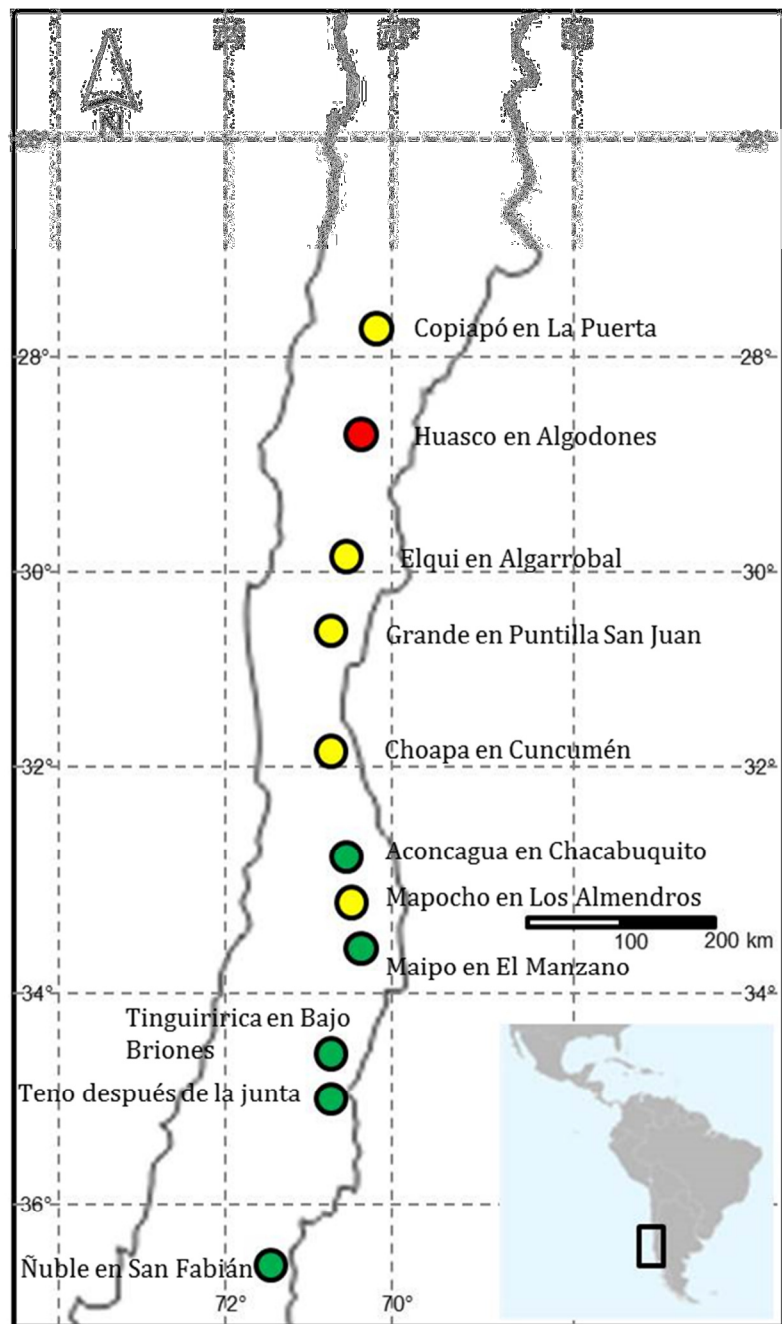


Figura 4-1. Desempeño de histórico de los pronósticos de caudales. Color verde significa pronóstico bueno, amarillo es satisfactorio y rojo es insatisfactorio.

Se observa que en líneas generales, el desempeño de los pronósticos ha sido positivo, con solo una de las estaciones cayendo en la categoría de insatisfactorio (Huasco en Algodones), cinco satisfactorios y cinco buenos.

Dentro de la zona de estudio, los caudales de deshielo en la región sur (bajo los 32°S) han sido en su mayoría bien pronosticados, salvo por la estación “Mapocho en los Almendros”, mientras los que se encuentran al norte de dicha latitud no lo han sido, con ninguna estación entrando en la categoría de buen pronóstico.

Se presentan en la Tabla 4-3 algunos valores estadísticos para los errores calculados.

Tabla 4-3. Estadísticos de los errores.

	N° de datos	Desviación estándar	Mediana	Promedio	Coefficiente de asimetría
Copiapó en La Puerta	27	57.93	-6.98	-25.19	-1.75
Huasco en Algodones	26	269.04	-28.43	-121.58	-3.46
Elqui en Algarrobal	35	31.25	-1.68	-10.71	-0.57
Grande en Puntilla San Juan	23	76.91	-10.06	-41.18	-2.22
Choapa en Cuncumén	37	31.81	-4.09	-9.31	-1.16
Aconcagua en Chacabuquito	32	23.29	-6.43	-4.42	-0.69
Mapocho en Los Almendros	37	41.34	-11.32	-18.49	-1.19
Maipo en el Manzano	36	16.00	0.63	-0.89	-0.78
Tinguiririca en Bajo Briones	34	14.79	9.94	9.66	-0.31
Teno después de la Junta	34	23.17	3.43	4.39	-0.36
Ñuble en San Fabián	36	25.29	3.21	-3.42	-0.87

4.4 Agrupación del sesgo

Con el fin de observar de qué forma se agrupan los errores en el pronóstico de los caudales, se realizan histogramas con los valores obtenidos para las distintas estaciones. De esta forma se pretende ver qué será lo más esperado en cada caso y cómo se agrupan estos errores. En la Figura 4-2 se presentan los histogramas.

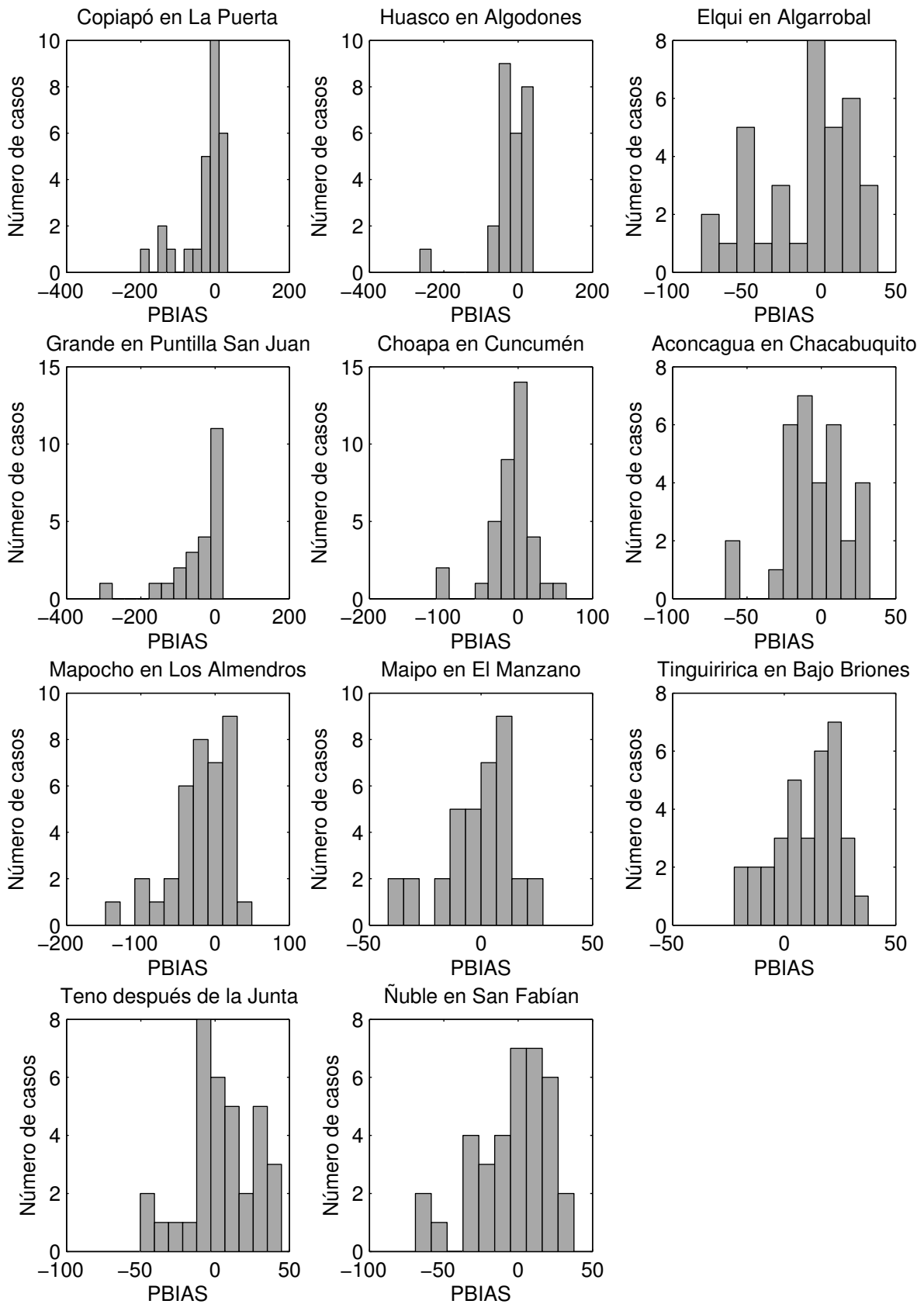


Figura 4-2. Histogramas de los errores obtenidos.

Se observa que en las estaciones ubicadas más al norte de la estación “Aconcagua en Chacabucuito”, en general se tienen errores negativos, es decir, una sobreestimación de los caudales que realmente se tendrán. Ejemplo claro de lo anterior es la estación “Grande en Puntilla San Juan”, donde las barras del histograma se agrupan casi en su totalidad hacia el lado izquierdo del gráfico correspondiente a dicha estación. En el resto de las estaciones, esto se equilibra sin tener una tendencia tan clara hacia la subestimación o la sobreestimación.

Además, en las estaciones al sur de “Aconcagua en Chacabucuito” (incluyéndola) se observan errores más acotados, no sobrepasando por lo general el 50%, ya sea positivo o negativo.

4.5 Desempeño en años Niño/Niña

Los fenómenos de El Niño y La Niña son episodios particulares del ENSO (El Niño Southern Oscillation). El ciclo ENSO (o ENOS en español) es un ciclo interanual de variaciones importantes en las temperaturas superficiales del océano, presión atmosférica y otras variables meteorológicas a gran escala (NOAA, 2010). Particularmente, El Niño se refiere a los episodios cálidos de ENSO, y La Niña a los episodios fríos del ciclo. En Chile, los efectos de la ENSO son variados, pero en particular para la zona central se puede mencionar un aumento de las temperaturas y de las precipitaciones(episodio del Niño), y un efecto contrario para La Niña(Cortés, 2010).

Debido a la alta importancia que tienen los fenómenos climáticos en la generación de escorrentía en los ríos, es de interés analizar cómo se comporta el pronóstico frente a los episodios Niño y Niña.

En la Figura 4-3, las estaciones están ordenadas de norte a sur, de acuerdo a su latitud. El tamaño de los círculos tiene relación con la calidad del pronóstico, siendo el más pequeño un año con pronóstico bueno, el intermedio uno satisfactorio y el grande insatisfactorio. El color de los círculos representa si el sesgo (PBIAS) fue positivo o negativo, siendo el blanco los años donde el pronóstico sobreestimó caudales y el negro donde el caudal se subestimó. Finalmente las bandas de colores representan la presencia de años Niño (rojo) o Niña (azul) según el NOAA.

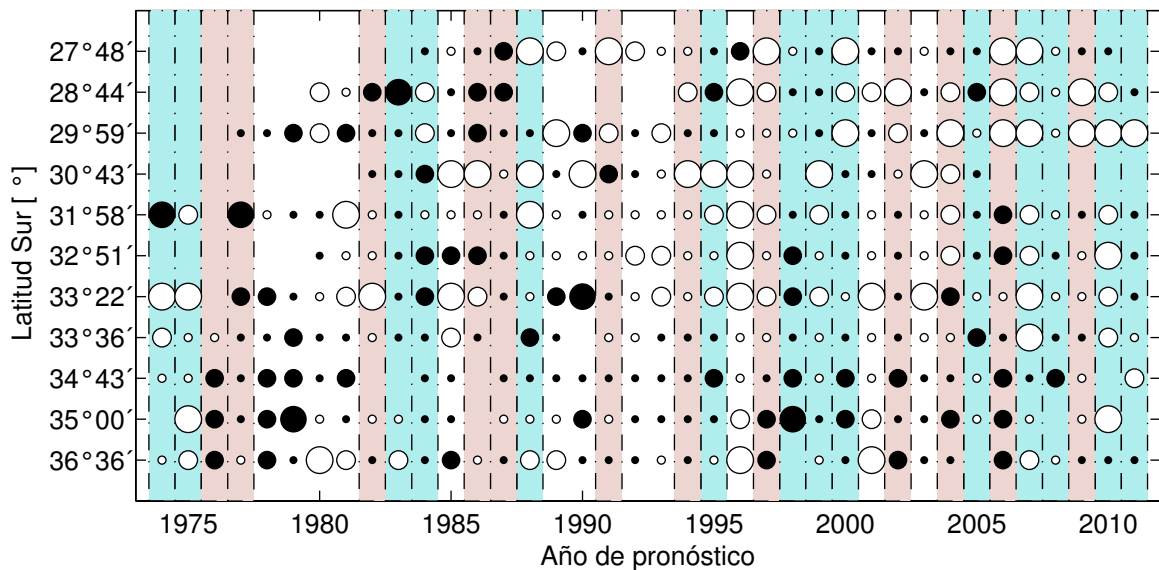


Figura 4-3. Comportamiento del pronóstico para años Niño/Niña.

De la Figura 4-3 se desprende que, en general, para las estaciones al sur de la latitud 30° S, en los años del tipo Niño, se han subestimado caudales y por el contrario en años Niña se tienen sobreestimaciones de éstos, observándose en realidad flujos menores a los pronosticados.

Se observa que entre los años 1975 y 1980 hay una clara tendencia a la subestimación de los caudales, con una nube de puntos negros acumulados en esa zona del gráfico. A partir de la década de 1990, en las estaciones al norte de la latitud 33° S (estaciones al norte del río Aconcagua), hay una clara inclinación a sobreestimar los caudales y en la zona sur durante la década de los 90's se tiene una subestimación. A partir del año 2007 se ven más círculos blancos, por lo que en general se han pronosticado caudales más altos que los que realmente hubo. Estos años han tenido una hidrología bastante pobre en comparación a lo normal, resultando en sequías de larga duración.

En las estaciones ubicadas más al norte (latitud 30° o menor), el tamaño de los círculos indica que en general el pronóstico no ha sido de buena calidad, caso contrario a lo que sucede en las estaciones ubicadas más al sur. Este resultado es similar al observado en los histogramas.

Si bien al inicio del período de pronósticos, se observa una clara tendencia a la subestimación de los caudales, para el caso de los últimos años, 2005 en adelante, se han tenido sobreestimaciones a lo largo de toda la región de estudio.

Además, cabe destacar que en general se han cumplido las expectativas que la DGA fija en sus informes, es decir, que sus pronósticos (sobre todo más al sur) estén en el rango del 20% de error.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la idea de realizar un análisis un poco más exigente que el propuesto en la Tabla 3-3. En la Tabla 4-4 se plantea una nueva categorización del error:

Tabla 4-4. Desempeño del pronóstico en base a PBIAS (propuesto).

Desempeño del pronóstico	PBIAS
Excelente	$PBIAS < \pm 5$
Muy Bueno	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$
Bueno	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 20$
Satisfactorio	$\pm 20 \leq PBIAS < \pm 30$
No Satisfactorio	$\pm 30 \leq PBIAS$

Se tiene entonces, y siguiendo los criterios de la tabla anterior, la Figura 4-4, donde el principio es el mismo que el de la Figura 4-3, salvo que al haber mayor número de categorías también los hay de tamaños de círculos.

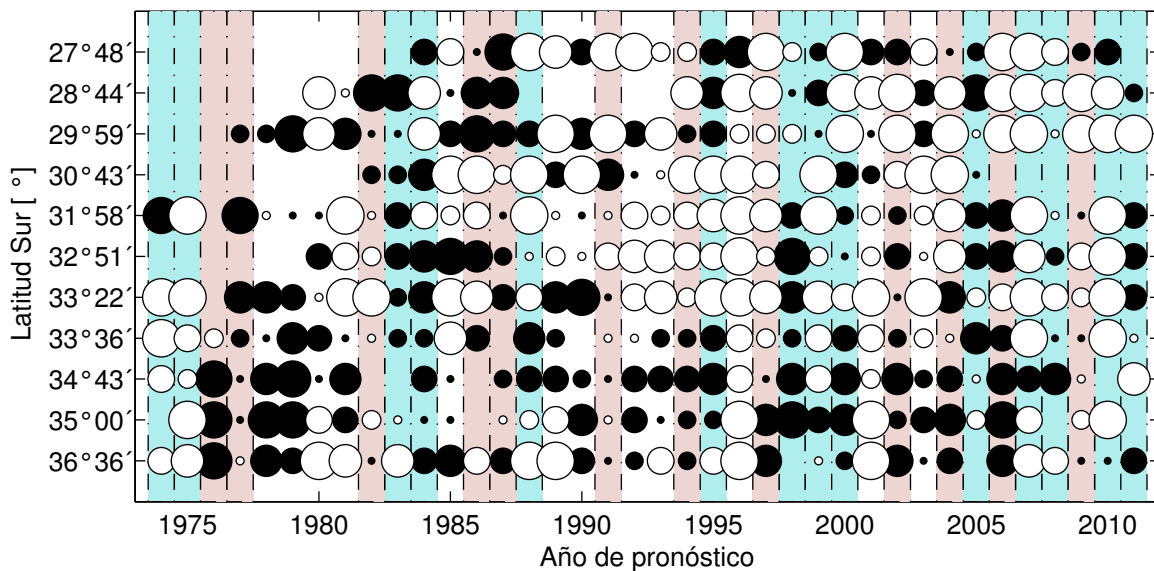


Figura 4-4. Comportamiento del pronóstico para años Niño/Niña según categorías propuestas.

Se observa que bajo la categorización propuesta, existe un bajo número de pronósticos que pueda ser catalogado de “Excelente” o “Muy Bueno”. Además, no hay una estación en particular que tenga un desempeño sobresaliente en comparación con el resto en estas categorías.

Asimismo, al plantear una exigencia mayor (del 40% al 30%) hay varios pronósticos que pasaron de “Satisfactorios” a “No Satisfactorios”.

4.6 Volúmenes de deshielo

Teniendo en cuenta los caudales pronosticados y luego observados, es de interés saber si los volúmenes producidos por éstos en toda la temporada de deshielo (entre septiembre y marzo) se asemejan entre ellos o no. Este análisis entrega información extra a la del PBIAS, ya que se puede tener el caso de que el pronóstico mes a mes no sea de buena calidad, pero que el agua total que se tendrá en la temporada haya sido predicha de buena forma.

Para calcular el volumen se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_j = \sum_i Q_{ij} \Delta t_{ij} \quad (4-1)$$

Donde V_j es el volumen de deshielo de la temporada j , Q_{ij} corresponde al caudal medio mensual (pronosticado o medido) del mes i de la temporada j , y Δt_{ij} corresponde al tiempo transcurrido en el mes i de la temporada j , que depende de los días que tenga el mismo.

Junto con los volúmenes, se calcula el error asociado al pronóstico:

$$e_j = \frac{V_{mj} - V_{pj}}{V_{mj}} * 100 \quad (4-2)$$

Donde e_j es el error en el volumen pronosticado para la temporada j en porcentaje, V_{mj} es el volumen medido en la temporada j , y V_{pj} es el volumen pronosticado en la temporada j . Si el error es positivo, se subestimó el volumen de deshielo, en cambio si es negativo, dicho volumen se sobreestimó.

Se presentan los resultados en un gráfico de barras, con el fin de poder ver de forma clara las diferencias entre los volúmenes calculados. Las estaciones utilizadas corresponden a las de la Tabla 4-1.

Con el fin de ver de forma más clara los resultados, se separan las estaciones en dos categorías, las de la zona centro-norte (Figura 4-5), que corresponden las de estaciones ubicadas al norte de "Aconcagua en Chacabuquito" (incluyéndola) y las que se encuentran al sur de la misma caen en la categoría de zona centro-sur (Figura 4-6).

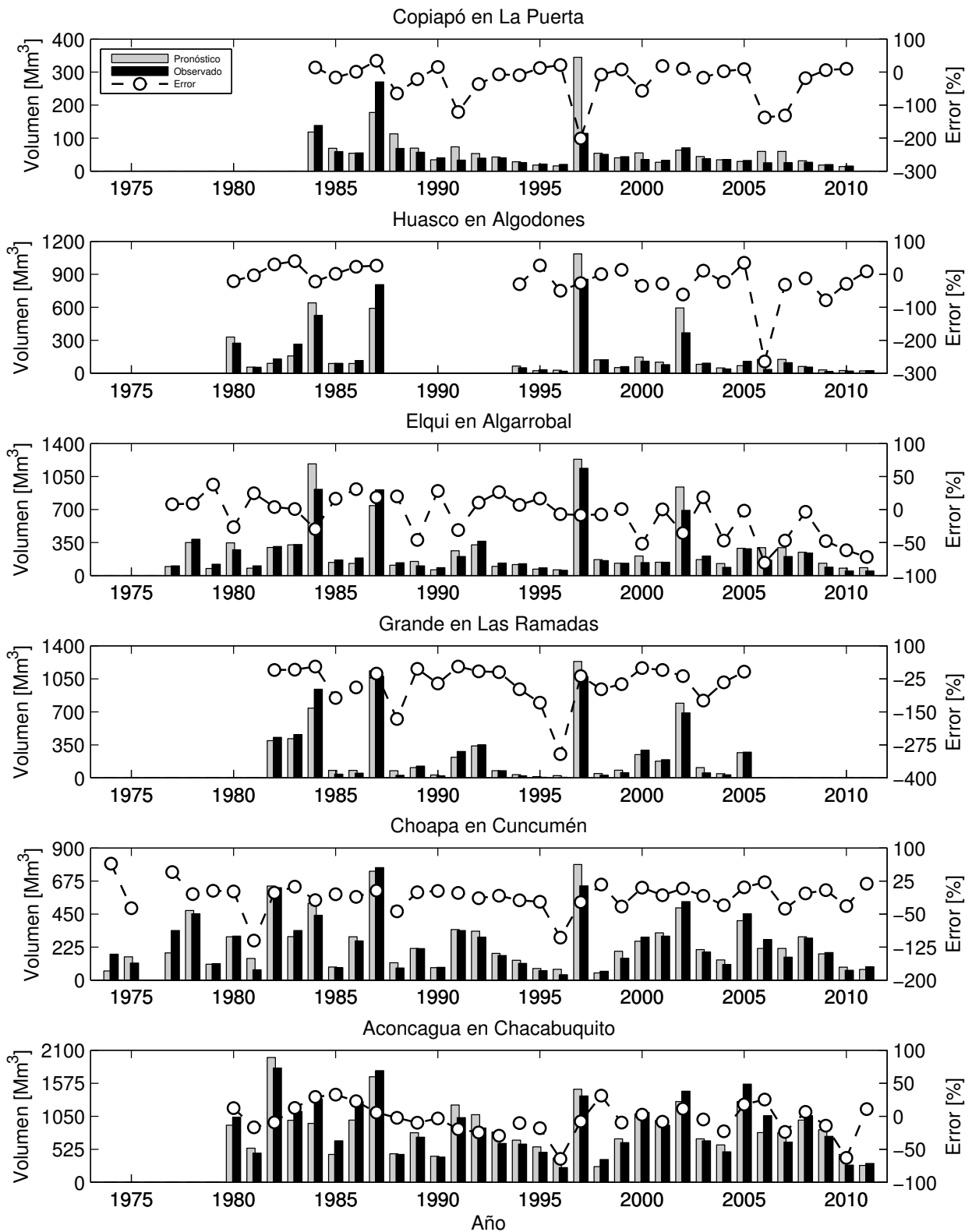


Figura 4-5. Comparación de volúmenes zona centro-norte.

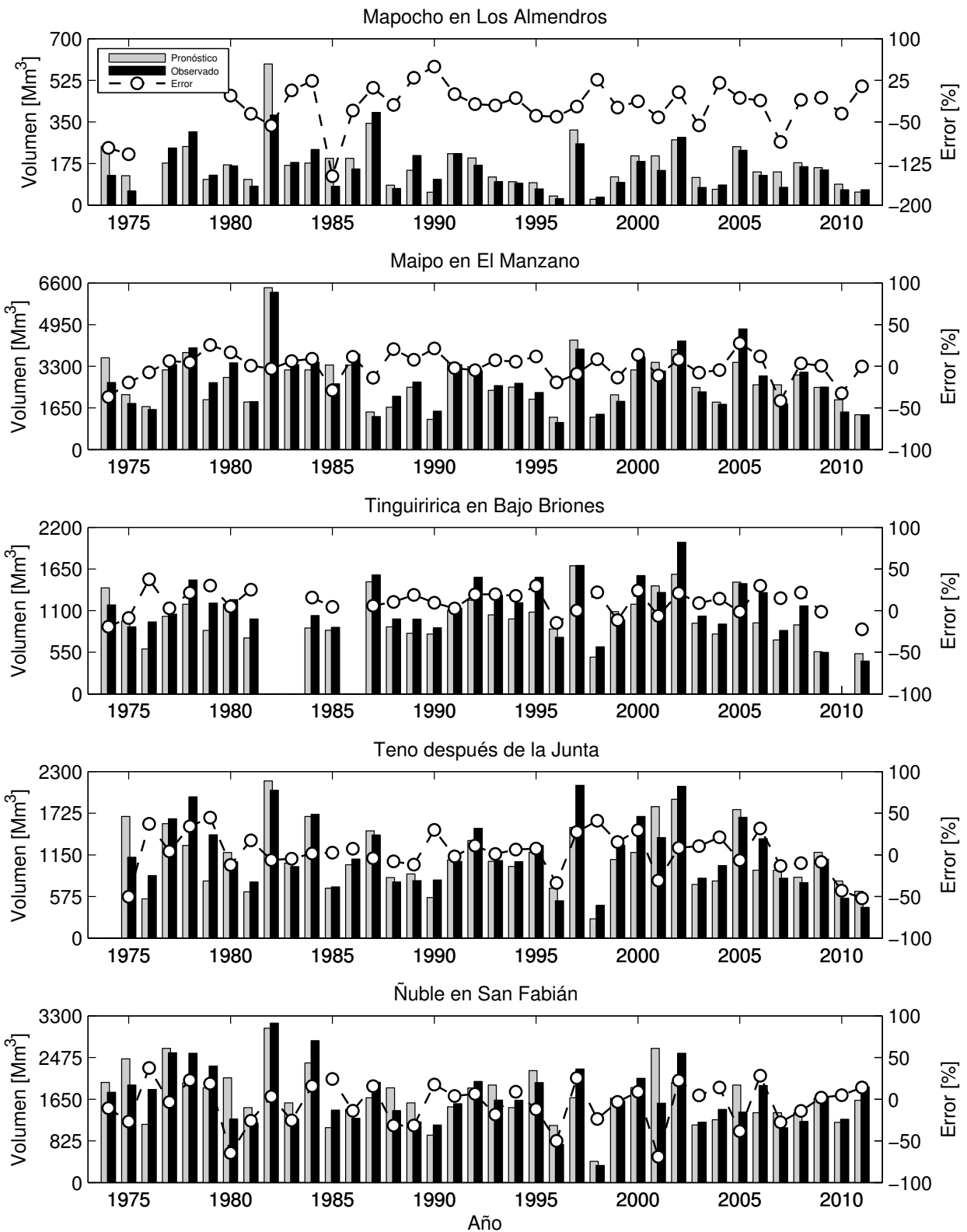


Figura 4-6. Comparación de volúmenes zona centro-sur.

Si se observan los resultados, se aprecia que las dos estaciones ubicadas más al norte, "Copiapó en La Puerta" y "Husco en Algodones" muestran años en que el desempeño a nivel de volúmenes estimados es bastante deficiente. En estas mismas estaciones se aprecia en casi todo el periodo analizado, una sobreestimación de volúmenes.

Para el resto de las estaciones, los errores en los volúmenes oscilan en el rango ± 50 %. Desde la estación "Maipo en El Manzano" hacia el sur, a nivel de volumen se tiene un muy buen ajuste, observándose errores que en general son bastante cercanos a 0 %. Además, estas estaciones coinciden en ser las que mayores volúmenes registran.

Los errores de más alto valor se observan cuando los volúmenes involucrados son bajos en relación a una estación. Esto se debe principalmente a la forma en que se calcula dicho error, donde para valores bajos, pequeñas diferencias generarán un alto valor del error y para valores altos ocurre lo contrario.

5 EVALUACIÓN DE RUTAS DE NIEVE Y SNOW PILLOW

5.1 Estaciones disponibles

La DGA cuenta con una amplia red de rutas de nieve apostadas en diferentes cuencas de Chile central, que se muestran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Rutas de nieve DGA.

Estación	Región	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Cota[m.s.n.m.]
Mina El Indio	IV	405936	6709588	4300
Alto Del Toro Muerto	IV	402090	6703953	3870
Meseta De La Laguna	IV	398692	6658699	3200
Cerro Olivares (*)	IV	409339	6651865	3550
Mina Igualdad	IV	352782	6627941	2100
QuebradaLarga(*)	IV	376125	6599752	3500
Cerro Vega Negra (*)	IV	354927	6579747	3600
Cerro Los Pinos	IV	357776	6575198	2070
Maitenes	IV	350459	6557543	2480
La Olla	IV	330121	6518951	2190
Paso Pelambres	IV	358744	6487840	3000
El Soldado (*)	IV	374984	6457684	3290
Nacimiento Del Sobrante (*)	V	359989	6437346	3380
Portillo (*)	V	395838	6365033	3000
CanteraDonoso	V	380063	6334438	3720
Cerro Negro	V	384416	6333003	3450
Estero Plomo	RM	375104	6333221	3150
Los BroncesRn	RM	378760	6331018	3500
Barros Negros(*)	RM	381681	6310262	3100
Rodeo Alfaro	RM	380746	6279231	2350
Laguna Negra (*)	RM	397090	6273967	2780
El YesoEmbalse	RM	398880	6272785	2475
Las Arenas	RM	403895	6258052	2700
El Zorro Norte	RM	391534	6252959	2100
El Zorro	RM	391533	6251857	2100
Chapa Verde (*)	VI	368582	6230550	2370
Corral De Mora	VII	363755	6120098	1640
La Dormida (*)	VII	341442	6113217	1800
MesetaBarroso (*)	VII	363871	6076018	2100

(*): Estaciones activas.

Tabla 5-1. Rutas de nieve DGA (continuación).

Estación	Región	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Cota[m.s.n.m.]
Lo Aguirre (*)	VII	358324	6014570	2000
Guaiquivilo	VII	322259	5994073	1470
Cerro La Gloria (*)	VIII	290721	5945040	1500
Experimental Volcán Chillan	VIII	286508	5914713	2440
Volcán Chillan (*)	VIII	284870	5913839	2060
Los Quemazones	VIII	284198	5911047	1650
Alto Mallines (*)	VIII	300873	5885147	1720
Meseta El Toro (*)	VIII	302195	5876173	1450

(*): Estaciones activas.

Actualmente, no todas las estaciones se encuentran en funcionamiento, ya sea por su difícil acceso (todas están ubicadas en zonas altas de la Cordillera de Los Andes) o porque la información entregada no fue considerada de utilidad. Dada la dificultad para levantar información de estos sistemas se cuenta con pocos datos, los que van entre seis (en el mejor de los casos) y cero lecturas anuales, con algunos vacíos de varios años en la estadística.

Se observa además, que en la III región no se tienen estaciones, y que en la VI hay una notable carencia de las mismas, contando solo con Chapa Verde.

En relación a los snow pillows, se dispone de una red relativamente nueva (fines del año 1999 en adelante). Estos dispositivos permiten tener una medida continua en el tiempo del equivalente en agua para su ubicación. Los sensores de los cuales se dispone de mediciones se muestran en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Estaciones snow pillow DGA.

Estación	Región	UTM Este [m]	UTM Norte [m]	Cota [m.s.n.m.]
QuebradaLarga	IV	376125	6599752	3500
Cerro Vega Negra	IV	354927	6579747	3600
El Soldado	IV	374984	6457684	3290
Portillo	V	395279	6366259	3000
Laguna Negra	RM	397090	6273967	2780

5.2 Representatividad de rutas de nieve

Se cuenta con las mediciones realizadas en las rutas de nieve y con el registro de los snow pillows. Se plantea entonces, la opción de cruzar la información disponible para ver cómo se ajustan ambas mediciones. En la Figura 5-1 se muestran las mediciones hechas por los snow pillow, así como la de las rutas de nieve relacionadas.

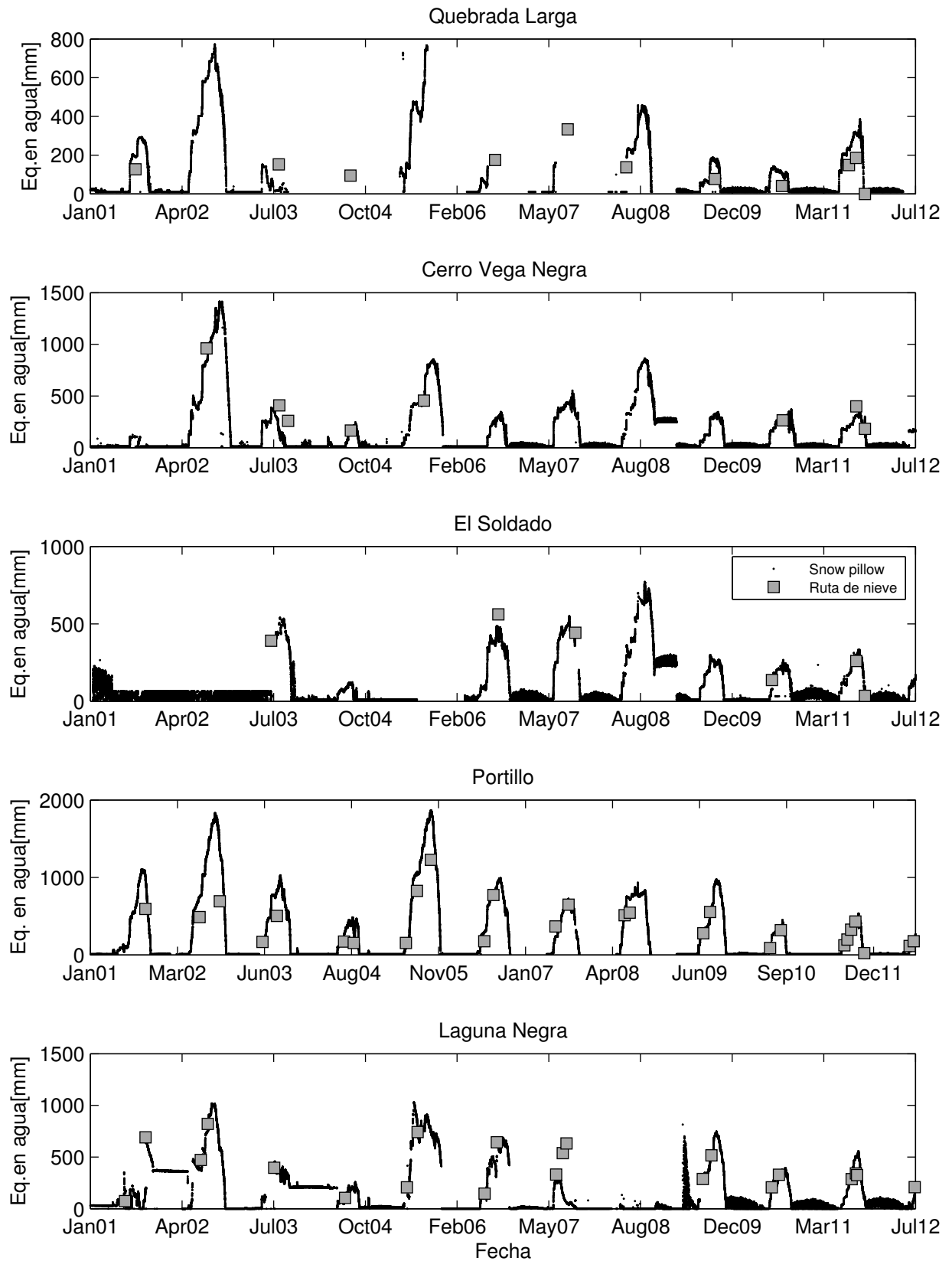
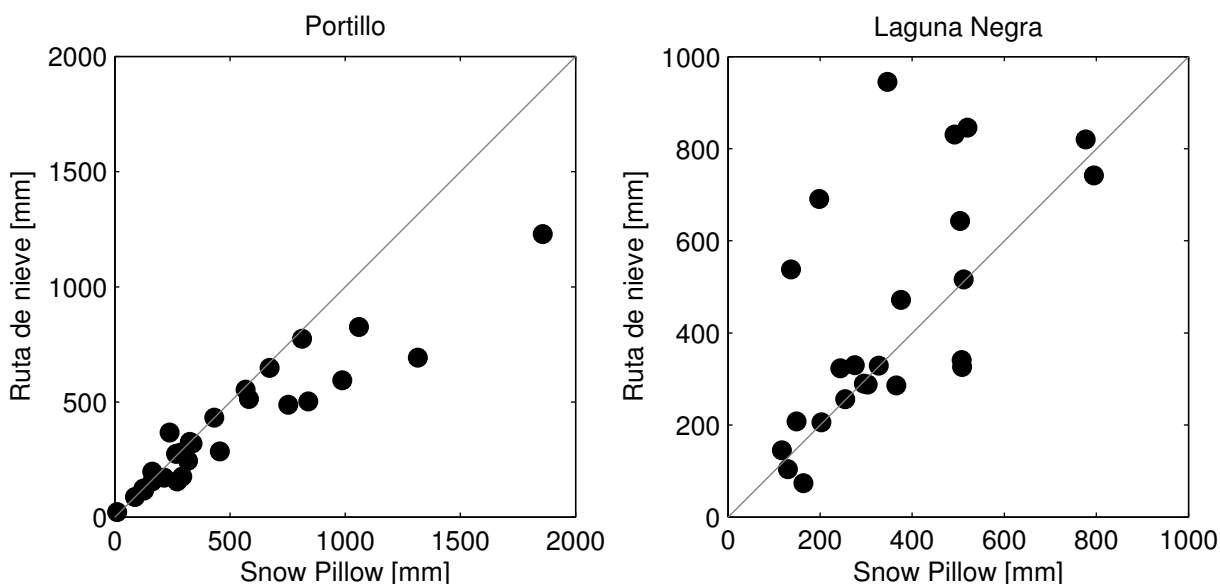


Figura 5-1. Snow pillows y rutas de nieve.

Se aprecia que en general hay un buen ajuste entre las mediciones realizadas con ambos métodos. Lamentablemente, no se dispone de una medición continua por parte de los snow pillows, salvo en la estación Portillo, donde los datos son de mejor calidad. Con respecto a esta misma estación, se cuenta con un mayor número de mediciones en la ruta, debido posiblemente al fácil acceso a su ubicación. Se observa que durante la fase de acumulación (tramos ascendentes en la curva) hay mejor ajuste entre ambos métodos, que al compararlo con los puntos de la fase de derretimiento (tramos descendentes en la curva). Esto último se podría atribuir a una “obstaculización” por parte del snow pillow a flujos de energía (calor) que causan derretimiento, lo que hace que se sobreestimen los valores de equivalente en agua en esta etapa.

En el resto de las estaciones, pese a que no se dispone de un registro continuo, se observa bastante congruencia entre las mediciones. Se tiene, que para lugares de difícil acceso y donde no es posible realizar un registro periódico de las alturas en las rutas de nieve, un sensor del tipo snow pillow que realice buenas mediciones y continuas (como en Portillo), resulta confiable y necesario.

Se hace un gráfico de dispersión para las estaciones Portillo y Laguna Negra (que presentan más datos comparables) donde se contrastan las mediciones de cada método para una misma fecha. Los resultados se muestran en la Figura 5-2.



Figra 5-2. Gráfico de dispersión entre los distintos métodos de medición.

En el caso de las dos estaciones mostradas ocurre lo antes descrito, donde para bajas acumulaciones ambos métodos coinciden en los valores entregados. Sin embargo, al aumentar la acumulación se tienen diferencias bastante notables, donde en Portillo se observa que el snow pillow tiende a medir más que la ruta de nieve, mientras que en Laguna Negra no queda tan claro que alguno de los métodos mida más que el otro.

5.3 Mediciones en terreno

Durante el final del invierno del año 2012 (últimos días de agosto e inicios de septiembre) se realizaron campañas de terreno en dos cuencas de la zona central de Chile. Los lugares escogidos fueron Cerro Vega Negra y Portillo. La elección de los terrenos se basó en que en ellos se encuentran midiendo desde los años 1999 y 2000 respectivamente, un sensor del tipo snow pillow, el que entrega información acerca de la nieve disponible (en equivalente en agua) cada una hora. El objetivo de los terrenos fue ver la calidad de la información entregada por estos instrumentos.

Durante los terrenos, fueron hechas mediciones de altura de nieve (mediante sondaje) en una grilla previamente definida y que corresponde al entorno cercano del snow pillow que se quiere estudiar.

Con las coordenadas de los puntos de la grilla cargadas en un GPS se recorrió el terreno, donde para cada ubicación se realizaron al menos tres mediciones y por lo tanto la altura medida en dicho punto corresponderá al promedio de los sondajes.

En caso de que hubiese nieve suficiente se realizaron calicatas, con el fin de medir temperatura, densidad y tamaño de grano en los distintos estratos que se puedan identificar.

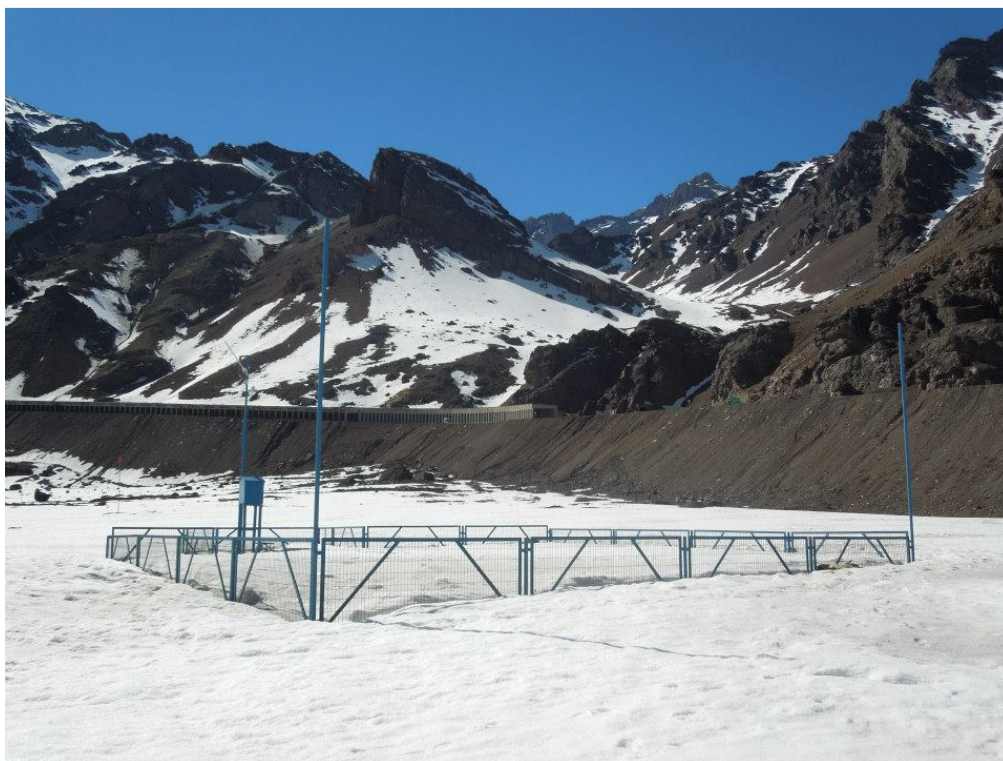


Figura 5-3. Snow pillow en estación Portillo, 14 de septiembre de 2012. Fuente: Archivo personal.

Cerro Vega Negra

Dada la dificultad para acceder al lugar en que se debían realizar las mediciones, se utilizó un helicóptero para ahorrar tiempo y con el fin de que un mayor número de personas pudiese participar en el terreno. De esta forma se contó con un equipo de esquiadores que realizaron sondajes en las laderas colindantes al snow pillow, mientras otros integrantes del grupo realizaron calicatas y sondajes en los alrededores del sensor.

Portillo

En este terreno se realizaron solamente medidas de sondaje, ya que la poca nieve encontrada en el lugar no permitió efectuar calicatas para reconocer estratos. Además, dado que el punto que se había entregado por referencia no calzaba con lo visto en terreno, no se pudo seguir la grilla previamente definida y se planteó una nueva metodología de sondajes en el terreno mismo. Ésta consistió en realizar mediciones a lo largo de una línea equiespaciada cada 5 [m] aproximadamente, cruzando por el punto donde se encontraba el snow pillow.

En la Figura 5-4 se muestran las grillas de los sondajes realizados en los terrenos anteriormente mencionados.

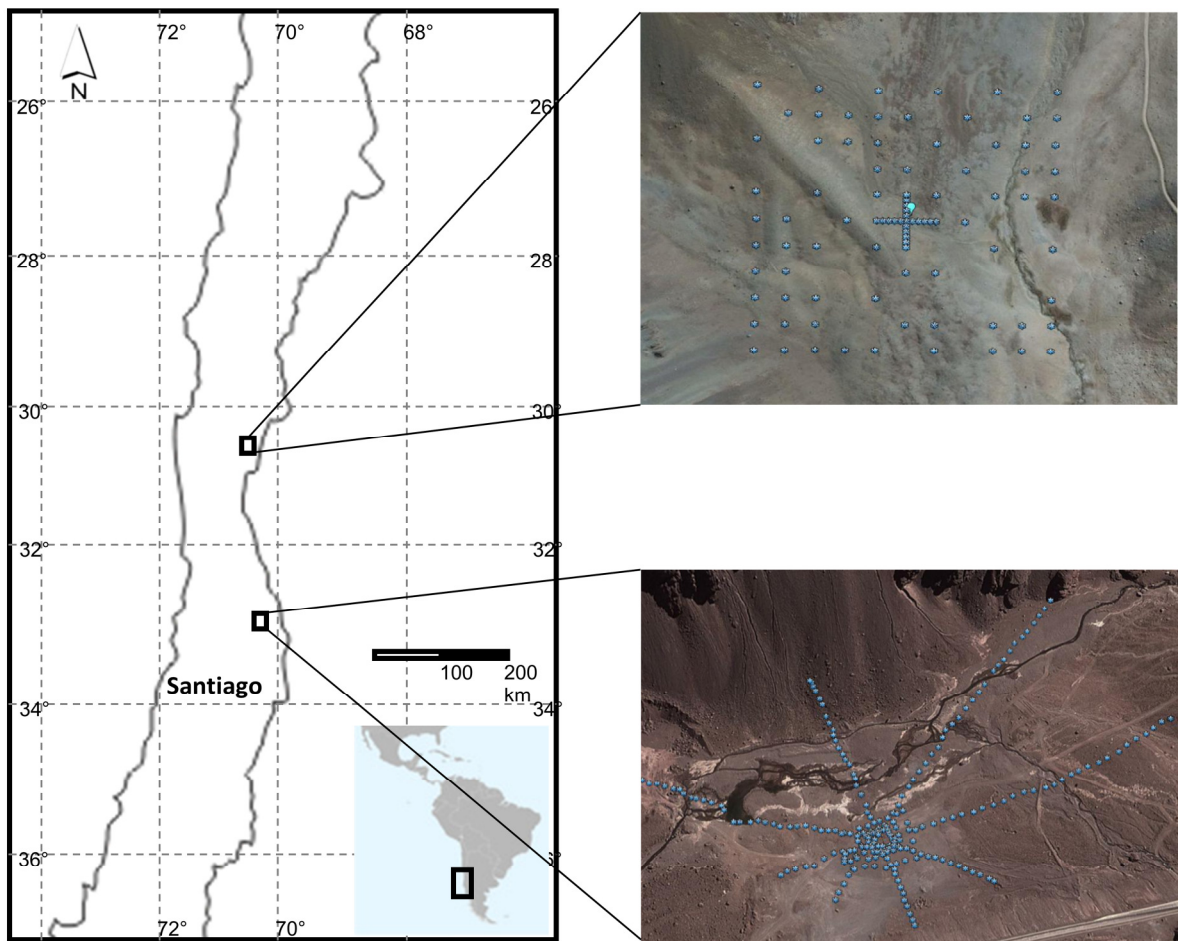


Figura 5-4. Ubicación de sondajes en terrenos "Cerro Vega Negra" (arriba) y "Portillo" (abajo).

En el terreno de Cerro Vega Negra se realizaron tres calicatas, una junto al snow pillow, otra más arriba en una ladera cercana y la última en una zona más baja. En particular, la que se utiliza en este caso es la que se realiza en las cercanías del snow pillow. A continuación (Figura 5-5) se presenta el perfil de densidades obtenidos de esa calicata, donde la parte inferior del gráfico (profundidad 0 [cm]) corresponde a la interfaz nieve-suelo.

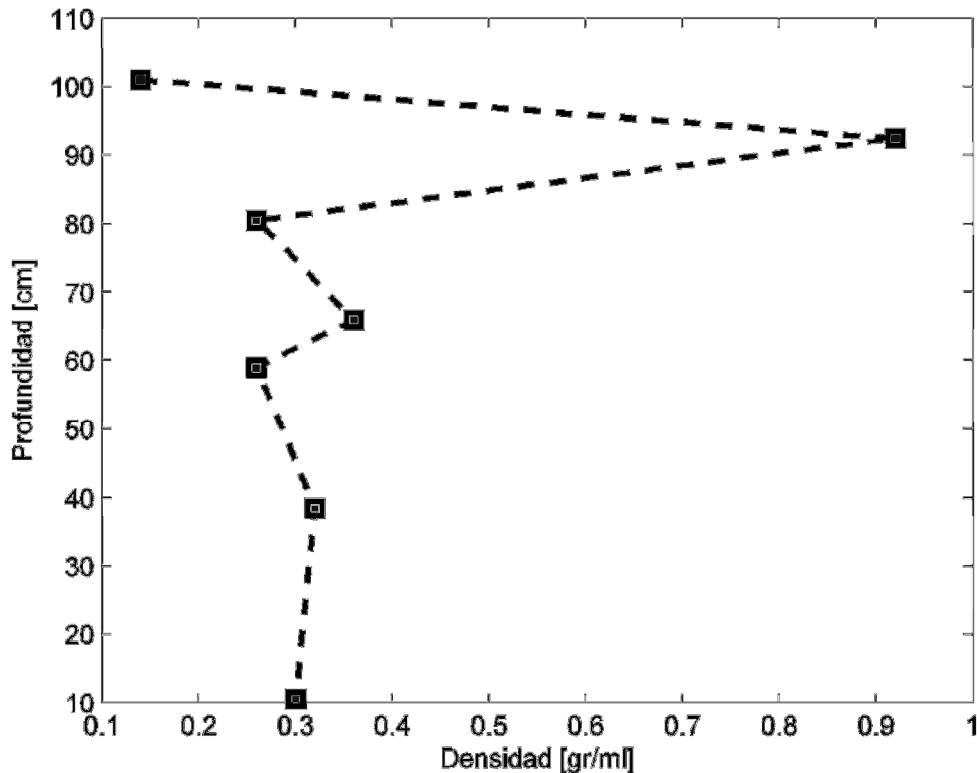


Figura 5-5. Densidad de acuerdo a la profundidad en calicata realizada en Cerro Vega Negra⁶.

Se aprecia que en la parte más superficial del perfil la nieve presenta baja densidad, lo que se asocia con nieve fresca (que precipitó hace poco tiempo). Luego en torno a los 10 [cm] de profundidad existe una capa bastante densa, lo que evidencia la presencia de un lente de hielo, producido por fenómenos de derretimiento y posterior congelamiento. Para el resto del perfil se tienen los valores cercanos a 0.3 [gr/ml], situación esperable en nieve que ya tiene un tiempo de haber sido depositada.

Teniendo en cuenta los sondeos que se realizaron en Cerro Vega Negra y que fueron realizados en los puntos mostrados en la Figura 5-4, además de los valores de densidad mostrados en la figura anterior para la calicata, se pueden obtener los valores aproximados de equivalente en agua para las cercanías del snow pillow. Para esto se consideró la medición que realizó el sensor a la hora en que se hizo tanto la calicata como los sondeos. Se obtuvieron resultados que se muestran en la Figura 5-6, donde

⁶Esta calicata corresponde a la más cercana a los sondeos realizados, y se ubica junto al snow pillow

los círculos blancos indican los sondajes y el círculo negro indica el valor que midió el snow pillow en ese momento, así como el tamaño muestra la magnitud de la medición. En la Figura 5-7 se muestra la distribución de las mediciones realizadas con los sondajes en negro, el promedio de los sondajes con una línea gris oscura y el valor de la medición del snow pillow en ese momento con una línea gris clara.

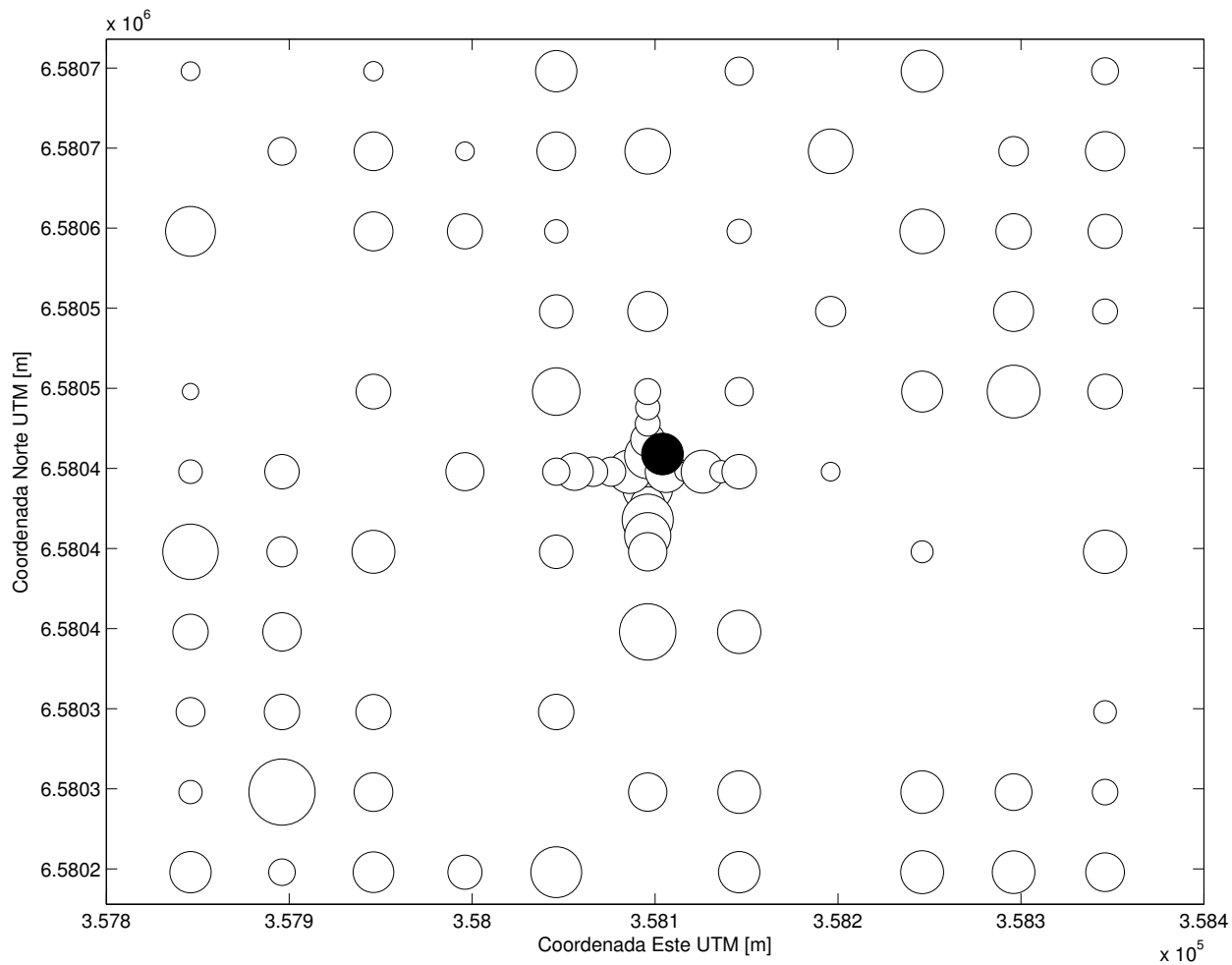


Figura 5-6. Equivalente en agua mediciones Cerro Vega Negra.

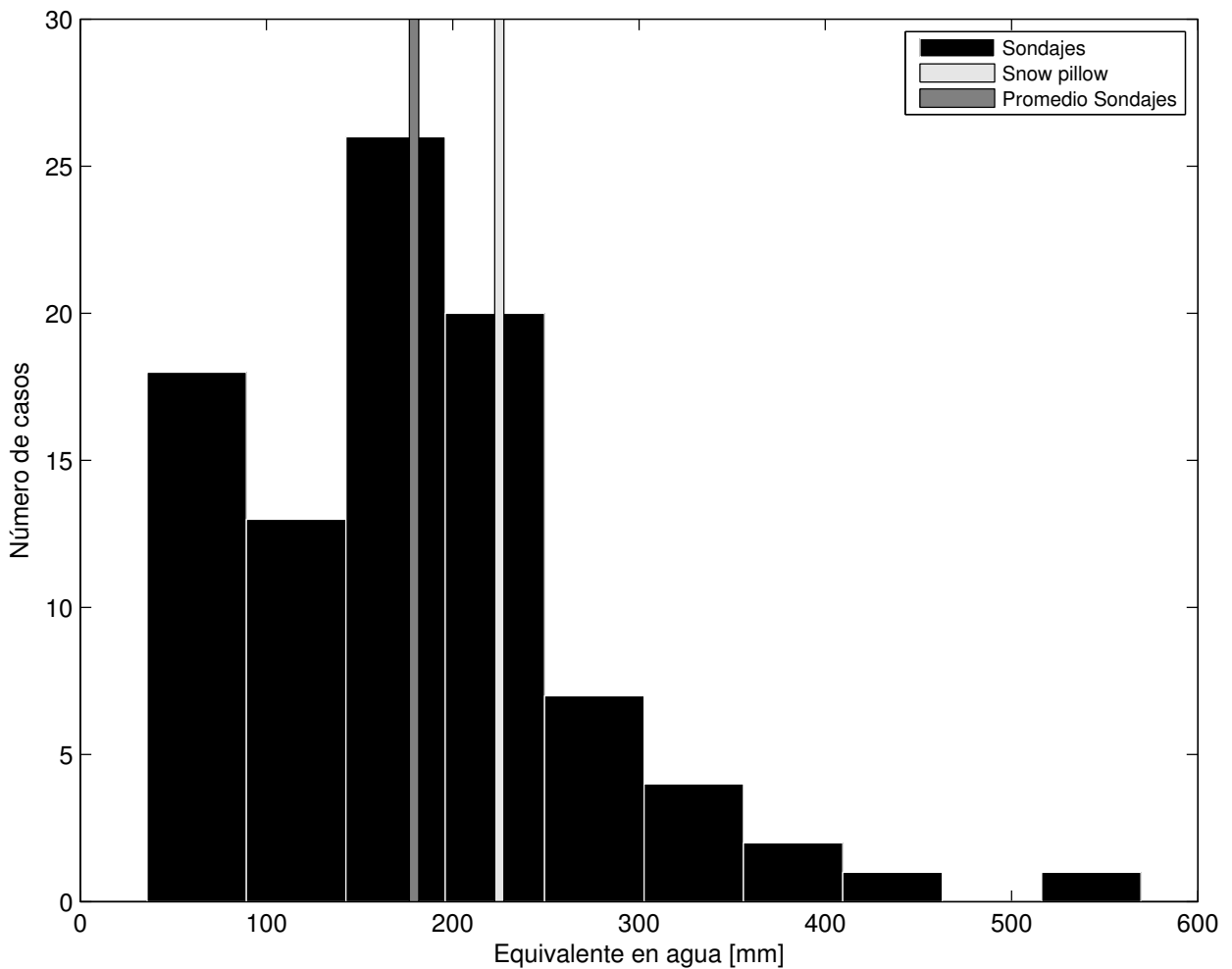


Figura 5-7. Histograma de mediciones en Cerro Vega Negra.

De las dos figuras anteriores, se desprende que el snow pillow representa de buena forma la acumulación en su entorno cercano y confirma lo ya visto en la Figura 5-1, donde se observa que estos sensores tienen un buen desempeño cuantificando el equivalente en agua.

Algunos valores estadísticos para las mediciones realizadas en terreno se muestran en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Estadísticos de mediciones de terreno.

N° de datos	92
Promedio	179
Mediana	164
Desviación estándar	95

El valor de la desviación estándar es alto si se compara con el promedio, lo que muestra que los valores de la acumulación están altamente dispersos. Además, el hecho de que la mediana sea menor a la media coincide con lo que se observa en la figura 5-7, donde se pueden ver los datos con mayor concentración a la izquierda de la línea del promedio.

5.4 Análisis de rutas de nieve

Teniendo en cuenta el informe “Análisis de las rutas de nieve del país”⁷(Escobar & Anabalón, 1991), se plantea realizar algunos análisis similares con la información disponible de las mediciones en las rutas de nieve, con el fin de actualizar el diagnóstico efectuado hace más de 20 años.

5.4.1 Relaciones espaciales entre rutas

Considerando las mediciones históricas para diferentes rutas de nieve, se plantea buscar si para distintas estaciones, la información registrada por ellas indica la existencia de alguna relación entre los equivalentes de agua medidos. Para esto, se procede a graficar las mediciones obtenidas en distintas rutas.

Se busca que las mediciones correspondan en ambas rutas a datos obtenidos en fechas parecidas (con no más de cuatro días de diferencia). Según este criterio, los datos medidos en las regiones cuarta y octava son los más útiles, porque es donde más mediciones en distintas rutas, pero en fechas similares, se pudo encontrar.

Se tienen entonces dos situaciones, la primera en que las rutas no se encuentran en la misma subcuenca ni cuenca y otra en que a pesar de no compartir subcuenca, sí están en la misma cuenca.

En particular, las estaciones utilizadas en la cuarta región son:

- Cerro Olivares (cuenca del Elqui, subcuenca del Turbio).
- Cerro Vega Negra (cuenca del Limarí, subcuenca del Grande, sector alto).
- Quebrada Larga (cuenca del Limarí, subcuenca del Grande, sector medio).

Para la octava, se tienen:

- Volcán Chillán (cuenca del BíoBío, subcuenca del Laja).
- Las Quemazones (cuenca del Itata, subcuenca del Itata medio).
- Cerro La Gloria (cuenca del Itata, subcuenca del Ñuble Alto).

Se grafica entonces, el equivalente en agua medido en las distintas estaciones para fechas similares. Se muestran además líneas de tendencia y el coeficiente de correlación (R^2), que indica la relación lineal entre dos variables cuantitativas.

En la Figura 5-8 se muestran las rutas de la IV región, mientras que en la Figura 5-9 las rutas de la VIII región.

⁷ Para revisar extractos del informe, ver la sección ANEXOS I.

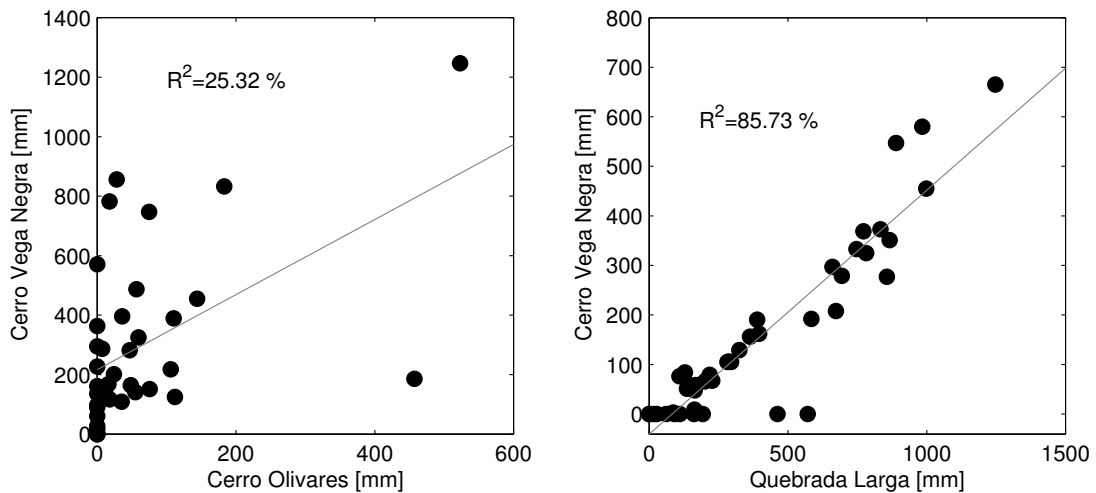


Figura 5-8. Relación entre rutas de nieve de la IV Región.

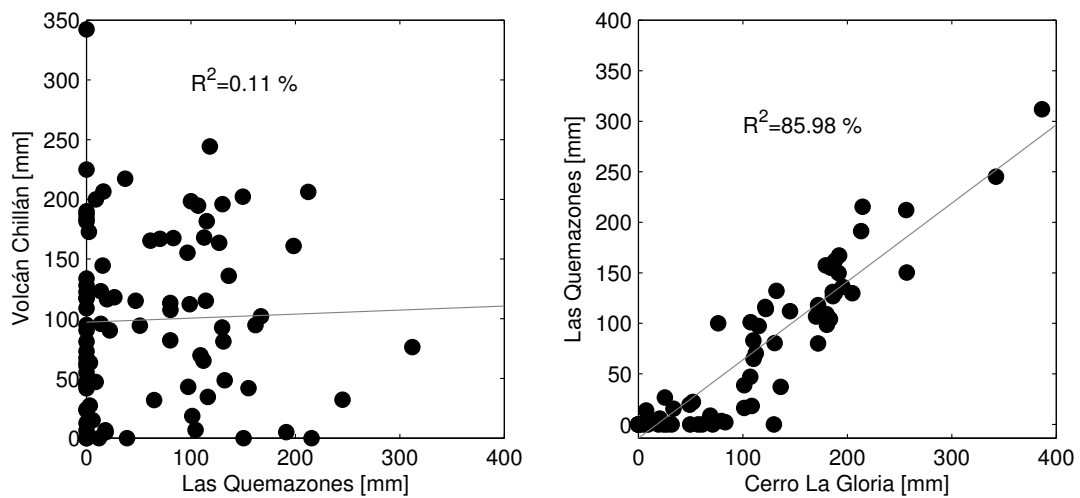


Figura 5-9. Relación entre rutas de nieve de la VIII Región.

Para ambas regiones se aprecia que cuando se analizan estaciones que se ubican en distintas cuencas, las mediciones registradas no muestran relación alguna entre ellas (R^2 muy bajo), mientras que para el caso en que están en la misma cuenca, la acumulación de nieve registrada está altamente relacionada (R^2 sobre el 85%).

Se hizo un estudio similar para estaciones más distantes (cuencas de diferentes regiones), encontrando pocos puntos comparables y bajos coeficientes de correlación.

Se plantea la idea de evaluar la relación que existe entre los volúmenes de deshielo registrados por algunas de las estaciones mostradas en la Tabla 4-1 y rutas de nieve que se encuentren cercanas a ella. Se calcula entonces el valor de R^2 al relacionar para un mismo año el registro de acumulación máxima y el volumen registrado en el intervalo septiembre-marzo posterior. Las estaciones seleccionadas se muestran en la Figura 5-10, donde para un mismo símbolo, el que está más al este

corresponde a la ruta de nieve y el otro a la estación fluviométrica. Los resultados se muestran en la Tabla 5-4.

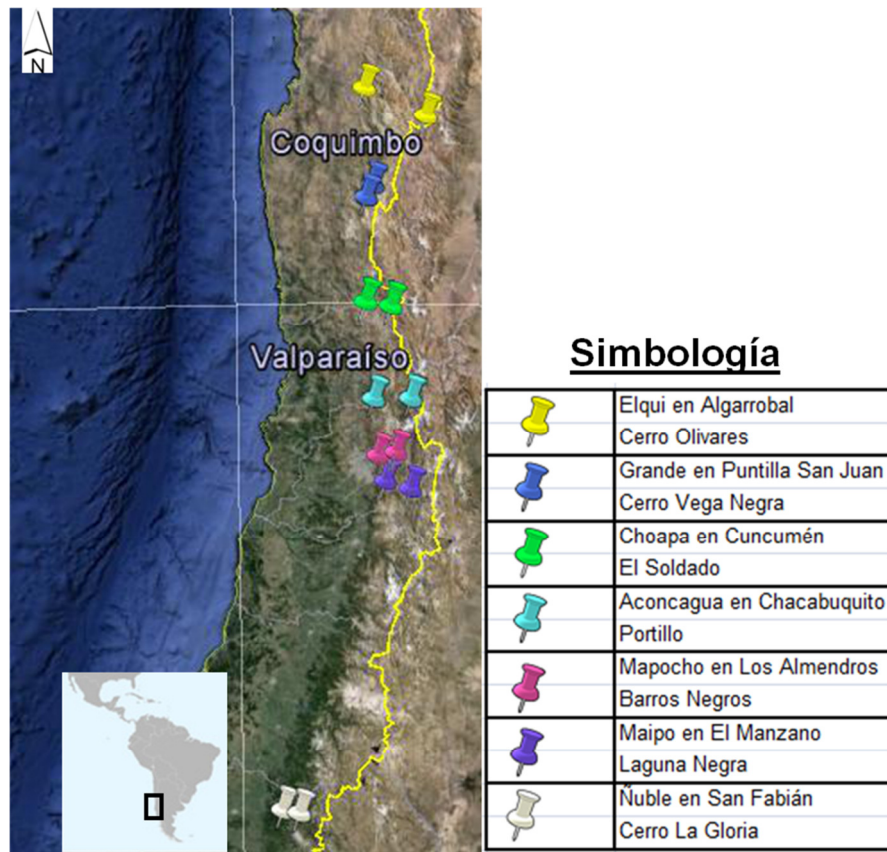


Figura 5-10. Estaciones fluviométricas y rutas de nieve. Fuente: Modificado de Google Earth.

Tabla 5-4. Coeficientes de correlación entre rutas de nieve y volúmenes de deshielo.

EstaciónFluviométrica	Ruta de nieve	R^2
Elqui en Algarrobal	Cerro Olivares	0,84
Grande en Puntilla San Juan	Cerro Vega Negra	0,73
Choapa en Cuncumén	El Soldado	0,88
Aconcagua en Chacabuquito	Portillo	0,84
Mapocho en Los Almendros	Barros Negros	0,85
Maipo en El Manzano	Laguna Negra	0,79
Ñuble en San Fabián	Cerro La Gloria	0,33

De la tabla anterior se puede rescatar el hecho de que para la gran parte de las estaciones en las que se realiza un pronóstico de caudales, una ruta de nieve cercana se relaciona de muy buena forma con el volumen de deshielo total que se tendrá durante la temporada siguiente. Para el caso de las que no se encontró una buena correlación, esto se podría adjudicar al hecho de que quizás el punto en que se ubica la ruta y por ende los registros que se toman en ella, no son realmente los que controlan los caudales que se tendrán en el río.

5.4.2 Comportamiento de la acumulación máxima mensual y anual

Es de interés ver de qué forma se comporta la acumulación de nieve. Para esto, se utilizan las estaciones de rutas de nieve que actualmente se están midiendo.

Estas estaciones están midiendo desde distintas fechas, y el registro que poseen también varía. En la Tabla 5-5 se muestra el año de inicio de las mediciones, la cantidad de años en que no se midió y los años de registro de las estaciones que se siguen midiendo actualmente.

Tabla 5-5. Registro de las estaciones utilizadas.

Estación	Año de inicio	Años sin registro	Años de registro
Cerro Olivares	1974	3	35
Quebrada Larga	1956	2	54
Cerro Vega Negra	1972	6	34
El soldado	1970	13	29
Nacimiento del Sobrante	1981	7	24
Portillo	1951	2	59
Barros Negros	1965	2	45
Laguna Negra	1965	2	45
Chapa Verde	1987	4	21
La Dormida	1983	4	25
Meseta Barroso	1967	14	31
Lo Aguirre	1953	1	58
Cerro La Gloria	1969	3	40
Volcán Chillán	1966	1	45
Alto Mallines	1967	18	27
Meseta El Toro	1956	23	33

De la Tabla 5-5 se desprende que la mayoría de las estaciones fueron iniciadas durante las décadas de 1950 y 1960. Además, se observa que las estaciones que presentan mayor registro son las de Quebrada Larga, Portillo y Lo Aguirre, todas con más de 50 años de información.

Considerando lo anterior, se determinan los valores máximos históricos para cada mes en que se han realizado mediciones (entre mayo y diciembre), así como el número de datos con que se cuenta y la desviación estándar de los mismos. Los resultados de esto, se muestran en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6. Equivalente en agua máximo mensual.

Estación		MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Cerro Olivares	Eq. en Agua [mm]	36	61	523	531	457	411	112	--
	n° de Mediciones	7	7	13	23	12	6	1	--
	Desv. Estándar [%]	14	23	140	118	131	163	0	--
Quebrada Larga	Eq. en Agua [mm]	162	137	665	696	866	704	411	0
	n° de Mediciones	4	9	24	39	27	23	7	2
	Desv. Estándar [%]	79	49	168	148	234	203	168	0
Cerro Vega Negra	Eq. en Agua [mm]	396	310	1247	960	1471	998	462	571
	n° de Mediciones	7	10	12	26	15	17	3	1
	Desv. Estándar [%]	145	104	382	280	403	322	169	0
El soldado	Eq. en Agua [mm]	269	110	846	538	1222	856	1026	75
	n° de Mediciones	3	2	9	13	13	5	1	1
	Desv. Estándar [%]	135	68	303	175	423	316	0	0
Nacimiento del Sobrante	Eq. en Agua [mm]	140	--	775	564	1257	792	--	--
	n° de Mediciones	2	--	6	12	12	4	--	--
	Desv. Estándar [%]	99	--	324	167	401	281	--	--
Portillo	Eq. en Agua [mm]	274	533	1135	1208	1662	1526	1334	333
	n° de Mediciones	13	23	49	62	48	47	22	6
	Desv. Estándar [%]	100	165	300	295	386	468	440	129
Barros Negros	Eq. en Agua [mm]	371	589	1181	1318	1198	1290	943	547
	n° de Mediciones	12	30	43	51	41	28	15	6
	Desv. Estándar [%]	87	148	251	291	277	359	286	241
Laguna Negra	Eq. en Agua [mm]	206	345	1600	1430	1875	1760	1430	620
	n° de Mediciones	8	21	34	45	34	24	15	5
	Desv. Estándar [%]	66	116	338	310	365	543	398	289
Chapa Verde	Eq. en Agua [mm]	0	0	579	569	366	389	--	--
	n° de Mediciones	2	2	12	7	6	6	--	--
	Desv. Estándar [%]	0	0	188	185	171	156	--	--
La Dormida	Eq. en Agua [mm]	0	582	737	1836	1072	1468	376	--
	n° de Mediciones	1	8	15	17	10	13	3	--
	Desv. Estándar [%]	0	253	204	431	369	432	217	--
Meseta Barroso	Eq. en Agua [mm]	--	--	1126	1515	1587	1789	1238	--
	n° de Mediciones	--	--	24	29	28	23	21	--
	Desv. Estándar [%]	--	--	329	367	410	461	368	--
Lo Aguirre	Eq. en Agua [mm]	396	287	1250	1675	1859	1897	1713	983
	n° de Mediciones	5	1	23	42	39	44	27	4
	Desv. Estándar [%]	162	0	376	397	444	484	579	329

Tabla 4-4. Equivalente en agua máximo mensual (continuación).

Estación		MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Cerro La Gloria	Eq. en Agua [mm]	0	714	1252	1692	1831	1331	157	384
	n° de Mediciones	2	15	21	21	19	21	8	5
	Desv. Estándar [%]	0	240	271	348	415	415	70	172
Volcán Chillán	Eq. en Agua [mm]	99	739	1257	1184	2007	1256	1039	1742
	n° de Mediciones	3	17	24	32	20	25	11	8
	Desv. Estándar [%]	57	205	322	309	395	373	295	590
Alto Mallines	Eq. en Agua [mm]	--	1393	1354	1329	1342	1029	--	--
	n° de Mediciones	--	18	17	20	13	6	--	--
	Desv. Estándar [%]	--	366	376	363	439	474	--	--
Meseta El Toro	Eq. en Agua [mm]	--	--	1319	1819	1725	1468	733	--
	n° de Mediciones	--	--	20	32	31	30	8	--
	Desv. Estándar [%]	--	--	413	428	448	437	275	--

De la Tabla 4-4, se desprende que las máximas acumulaciones han sido observadas, en la mayoría de los casos en el mes de septiembre, situación esperable, ya que es ahí cuando cesan las precipitaciones y se tiene un aumento en las temperaturas, lo que genera el derretimiento de la nieve acumulada. Los altos valores de las desviaciones estándar evidencian la alta variabilidad de la acumulación nival, incluso al considerar los valores máximos a nivel mensual.

Por otra parte, son notorias las pocas mediciones que se realizan tanto al inicio de la temporada de nieves (Mayo y Junio), como al final de la misma (Noviembre y Diciembre).

Si se comparan estos resultados con los obtenidos por Escobar y Anabalón, se tiene que en muchos casos se repiten, lo que indica que posterior al año 1991 no se han registrado nuevos máximos. En relación a la desviación estándar, ésta no ha sufrido grandes variaciones en comparación al informe anterior.

Para ver estos resultados de forma más clara, se grafican los valores máximos de acumulación a nivel mensual, comparando los datos 1991 y los actuales. Esto se hace en algunas estaciones que coinciden en análisis y que además han incorporado nueva información en los últimos 22 años. En la Figura 5-11 se muestran los resultados obtenidos.

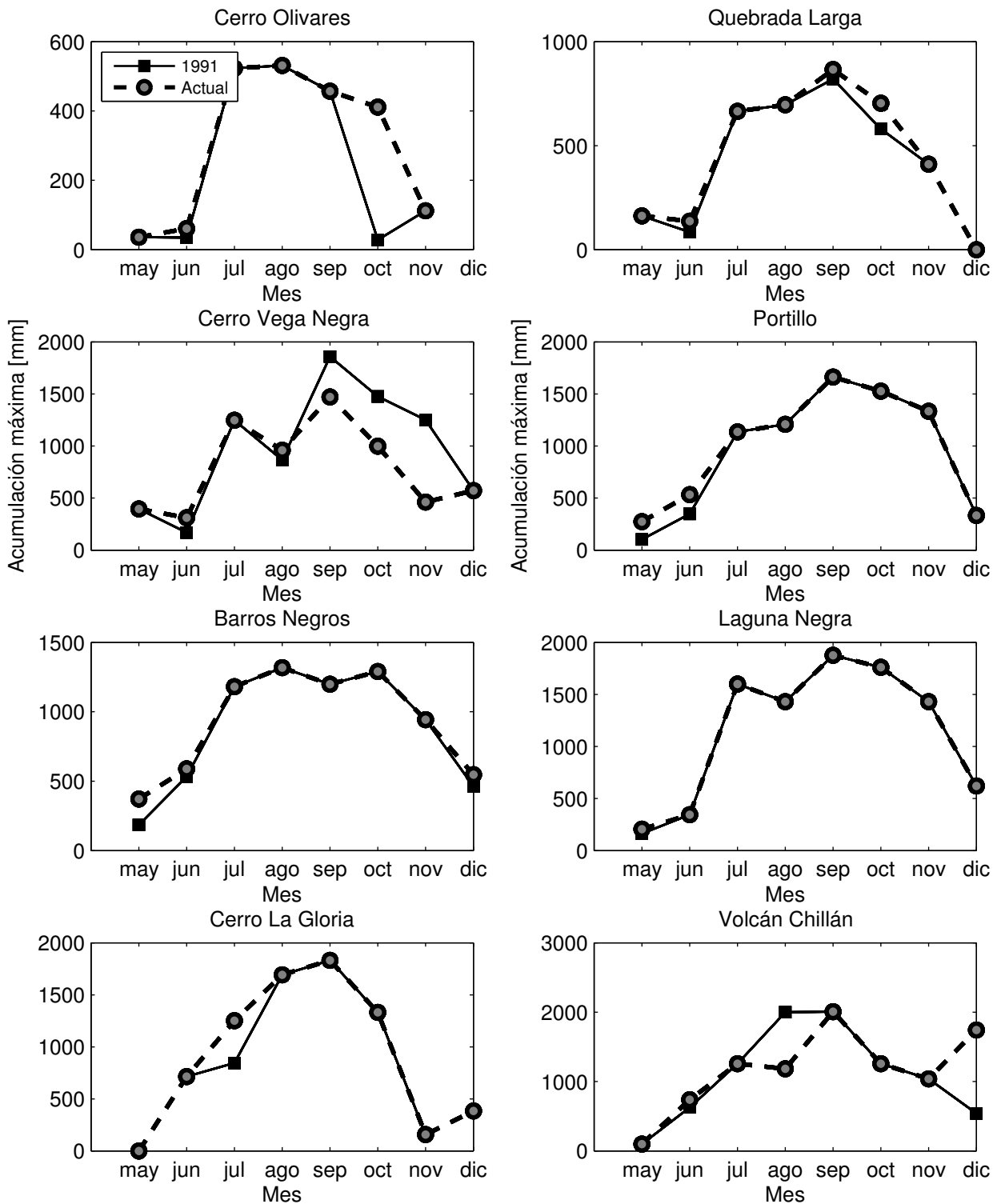


Figura 5-11. Comparación de máximos para informe de 1991 e información actual.

Se observa que para la mayoría de los casos los valores del informe de Escobar y Anabalón, y los datos actuales coinciden, es decir en 20 años no se han observado acumulaciones mayores a las que ya se tenían en 1991. Esto es claro en las estaciones de Portillo, Barros Negros y Laguna Negra, donde las curvas se superponen. También hay situaciones ilógicas, como lo que ocurre en Cerro Vega Negra, donde se tiene que

los máximos calculados para algunos meses ahora son menores que los anteriores. Esto se podría atribuir a que no fueron bien calculados en el pasado o que los registros con los que se contó para este trabajo no poseían toda la información levantada en terreno.

A continuación, se calculan distintos indicadores estadísticos para la acumulación máxima anual registrada en las estaciones que presentan al menos 25 años de lecturas. Se calcula entonces el promedio, el tipo de curva de análisis de frecuencia a la que mejor se ajustan los valores y los valores de acumulación máxima para distintas probabilidades de excedencia: 20%, 50% y 85%. Las curvas de variación estacional se encuentran en la sección ANEXOS II. Además y entre paréntesis se muestran los valores que habían sido presentados por Escobar y Anabalón en su informe de 1991. Los resultados se muestran en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7. Indicadores estadísticos para acumulación máxima anual en rutas de nieve.

Estación	Promedio [mm]	Distribución	Equivalente en agua máximo [mm]		
			Pexc		
			20%	50%	85%
Cerro Olivares	139 (108)	Gumbel (Lognormal)	263 (154)	123 (81)	50 (34)
Quebrada Larga	193 (206)	Pearson (Gamma)	332 (320)	152 (166)	39 (54)
Cerro Vega Negra	473 (475)	Gumbel (Lognormal)	812 (709)	439 (341)	108 (139)
El Soldado	510	Pearson	631	334	94
Nacimiento del Sobrante	499	Pearson	642	333	87
Portillo	611 (630)	Gumbel (Lognormal)	922 (910)	563 (511)	244 (251)
Barros Negros	472 (453)	Normal (Lognormal)	733 (668)	482 (368)	173 (176)
Laguna Negra	562 (566)	Pearson (Gumbel)	844 (795)	503 (503)	217 (243)
La Dormida	460	Pearson	812	450	182
Meseta Barroso	851 (917)	Lognormal (Gamma)	1245 (1235)	734 (853)	383 (497)
Lo Aguirre	951	Normal	1321	958	511
Cerro La Gloria	658	Pearson	961	629	310
Volcán Chillán	724 (879)	Normal (Normal)	1056 (1235)	724 (879)	314 (441)
Alto Mallines	732	Normal	1055	732	334

Es posible observar en el promedio una tendencia al aumento de la acumulación de norte a sur. Asimismo, en las estaciones ubicadas más al norte las curvas de variación estacional presentan una distribución del tipo Gumbel o Pearson, mientras que en el sur su ajuste es del tipo Normal o Pearson.

Este resultado es bastante interesante, ya que el hecho de tener distribuciones tipo Pearson y Gumbel indican que la acumulación máxima anual está regida por eventos extremos, donde hay años en que la acumulación máxima es mucho mayor a la de los otros. Por su parte la distribución Normal indica que los datos de acumulación máxima tienen valores más similares durante todos los años de registro.

Al comparar estos resultados con los valores obtenidos en informes previos, se tiene que en general los promedios han disminuido, lo que muestra una tendencia a una baja en la acumulación nival.

En cuanto a las distribuciones obtenidas, se aprecia que estaciones que antes presentaban una de tipo Lognormal ahora lo hacen de Pearson y Gumbel. Estas tres distribuciones coinciden en que representan eventos extremos, por lo que si bien cambió el tipo de distribución, no lo ha hecho la tendencia general de la acumulación.

5.5 Cálculo coeficiente de grado-día

Teniendo en cuenta la información disponible gracias a los snow pillows, se busca encontrar el coeficiente de grado día. Para esto, además de la información de equivalente en agua y su variación en el tiempo, se utiliza la de temperatura que para este caso está disponible de manera sinóptica, es decir, cada seis horas solamente en algunas de las estaciones. Cabe destacar que el coeficiente se calibra para la fase de derretimiento de la nieve y por lo tanto se toma como punto inicial alguno cercano a la máxima acumulación registrada.

Como se aprecia en la Figura 5-1, de los snow pillows ahí presentados, no todos tienen una buena calidad en el registro de la acumulación de nieve, mostrando grandes espacios de tiempo sin datos. En el caso de Cerro Vega Negra, se tiene que pese a que el snow pillow entrega datos de manera relativamente continua, la información de temperatura es la que presenta vacíos que imposibilitan el cálculo del DDF. Por lo tanto, se calcula el coeficiente solamente para la estación Portillo que presenta mejor registro de equivalente en agua y de temperatura.

Se muestran en la Figura 5-12 las zonas del registro de equivalente en agua que fueron escogidas para el cálculo del coeficiente de grado-día (DDF), donde en rojo se encierran los intervalos en que se realiza el cálculo.

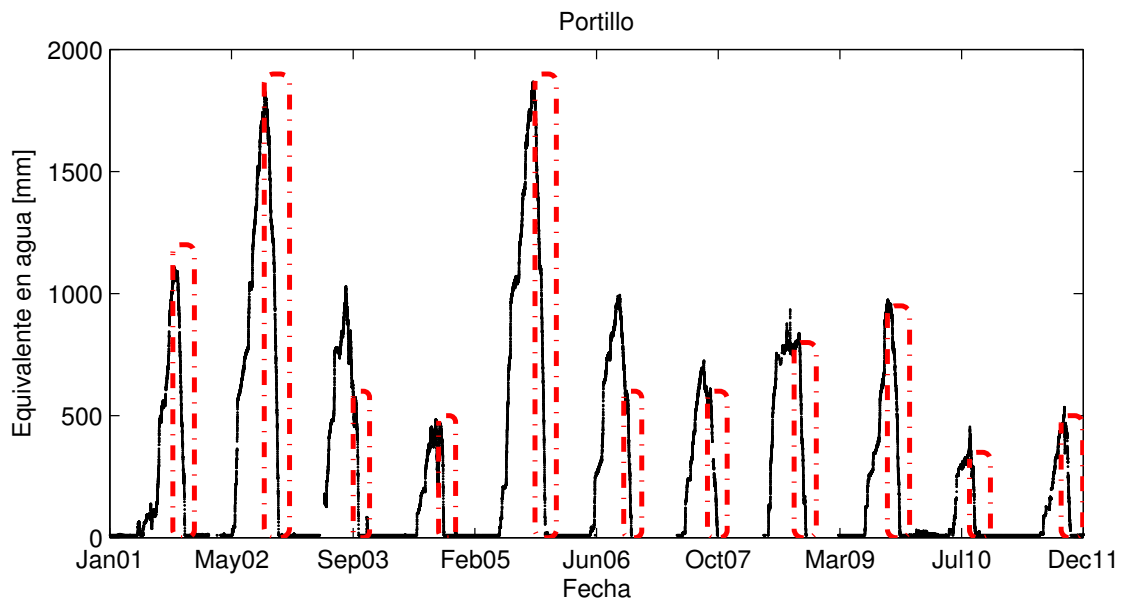


Figura 5-12. Zonas de cálculo del coeficiente de grado-día .

A pesar de que el registro del snow pillow es bastante continuo y de buena calidad, las temperaturas no siempre fueron medidas para los intervalos de interés. Por lo mismo, se decidió llenar algunos de los registros de temperatura mediante relaciones con estaciones meteorológicas cercanas (El Yeso), para disponer de mayor información. Teniendo esto en consideración, los valores que pudieron ser obtenidos para el coeficiente de grado día en Portillo son los mostrados en la Tabla 5-8, donde también se muestran los intervalos en los que se calculó el DDF.

Tabla 5-8. Valores de DDF para Portillo.

Año	DDF [$mmd^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	Fecha inicial	Fecha final
2001	6,4*	16 de septiembre	24 de octubre
2002	5,9*	25 de septiembre	18 de noviembre
2003	4,7*	24 de septiembre	11 de octubre
2004	4,6	8 de septiembre	28 de septiembre
2005	10,3	8 de octubre	14 de noviembre
2006	5,5	6 de octubre	30 de octubre
2007	5,2	14 de septiembre	15 de octubre
2008	7,4	3 de septiembre	14 de octubre
2009	5,6*	20 de septiembre	31 de octubre
2010	6,6	22 de agosto	27 de septiembre
2011	4,1	2 de septiembre	10 de octubre

Obs: * implica que hay registro de nieve, pero la temperatura fue completada por estaciones meteorológicas cercanas.

En la mayoría de los años, la fecha de inicio para el cálculo del DDF fue escogida a partir de septiembre, esto ya que es ahí cuando empieza el derretimiento y no se observan grandes acumulaciones posterior al mes de de agosto. Esto se puede ver de forma más clara en la Figura 5-12.

En relación a los años para los que se tuvo que rellenar la información de temperatura, los valores obtenidos resultaron bastante acordes a los otros mostrados en la Figura 5-8.

En bibliografía relacionada (Hock, 2003), se encuentran valores bastante acordes a los que se obtienen aquí, ya que para la nieve se espera obtener DDF entre 3 y 8 [$mm d^{-1}C^{-1}$]. En este caso, para mejorar la calidad de los resultados, ayudaría tener resoluciones de temperatura al menos de forma horaria. También, se debe tener en cuenta el problema de la sobreestimación de nieve que generan los snow pillows, que ya fue mencionado.

6 LÍNEAS DE NIEVE

6.1 Evolución temporal de la línea de nieve

Considerando la información satelital disponible se puede estudiar la evolución temporal de la línea de nieve (entiéndase como el límite entre donde hay nieve y donde ya no la hay) a partir del año 2001 (fecha en que se inicia el registro entregado por el DGF). Las cuencas en las cuales se dispone de la posición de línea de nieve son las siguientes:

Tabla 6-1. Cuencas con información de línea de nieve.

Cuenca	Región
Choapa	IV
Aconcagua en Chacabuquito	V
Maipo en El Manzano	RM
Cachapoal en Cortaderal	VI
Maule en Pehuén	VII
Bío-Bío en Ralco	VIII

También, se cuenta con la información para la cuenca “Ñuble” de la VIII región, pero sus datos presentan amplios intervalos de tiempo con vacíos, por lo que se prefirió omitirla en este análisis.

Se muestran a continuación en la Figura 6-1 y la Figura 6-2, la evolución temporal de la cota de la línea de nieve para las seis cuencas antes nombradas. Vale destacar que lo que se grafica son medias móviles de 14 días, esto para eliminar un poco el ruido de la información y los vacíos de la misma, para así observar tendencias de forma más clara. Se agrega una línea de tendencia, calculada simplemente como la recta a la cual se ajustan mejor los puntos graficados.

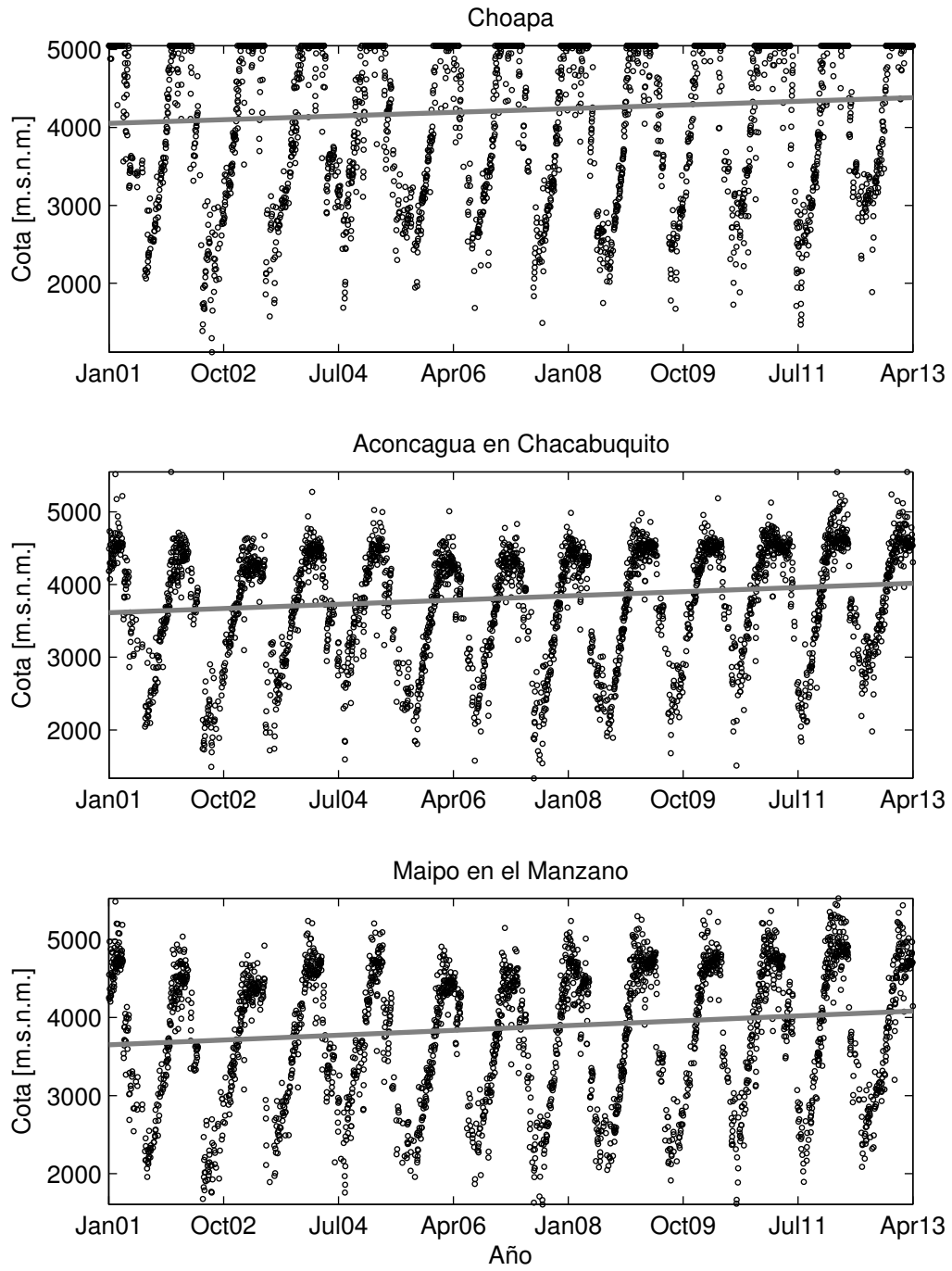


Figura 6-1. Evolución temporal de líneas de nieve en cuencas zona centro norte.

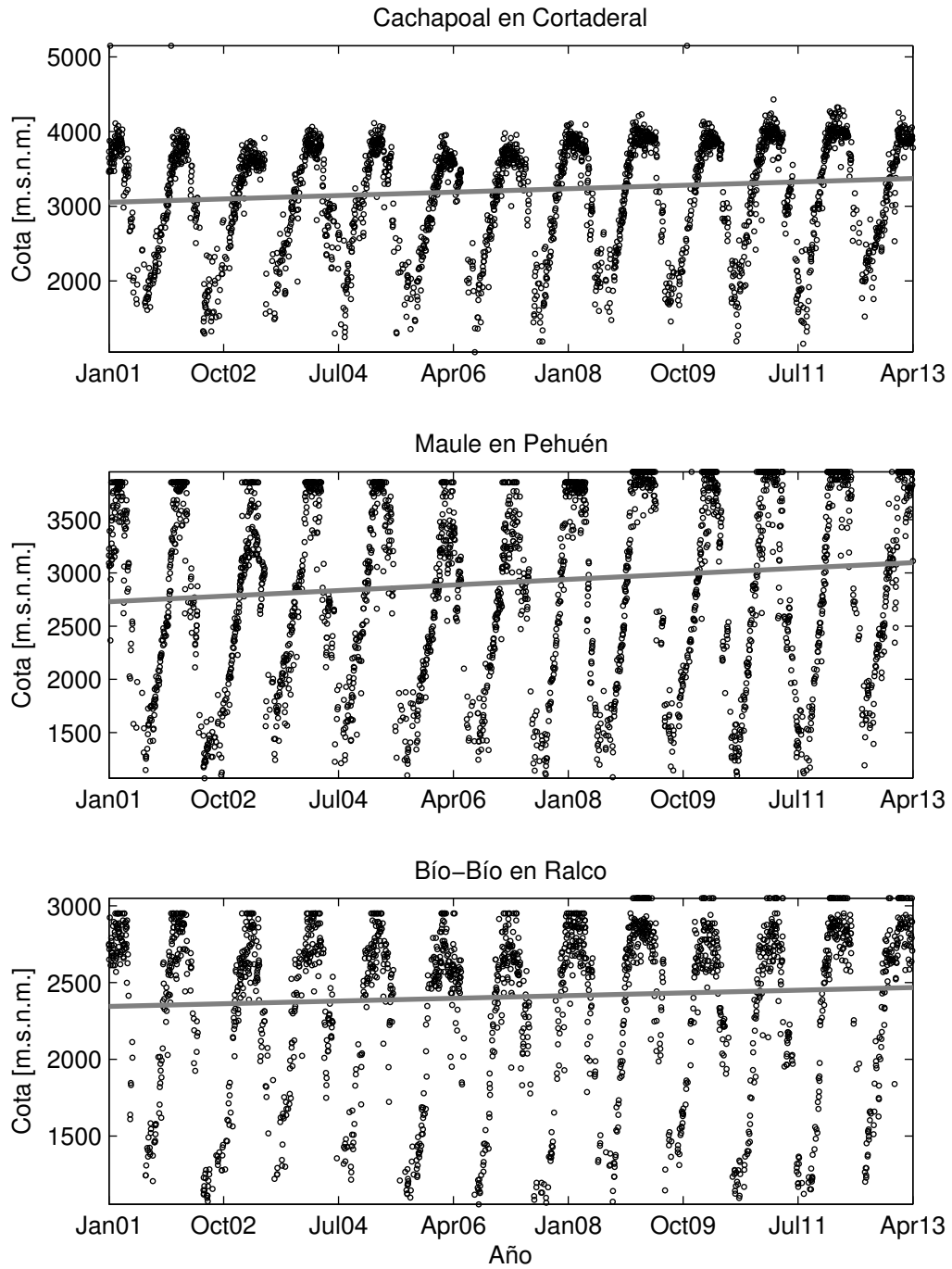


Figura 6-2. Evolución temporal de líneas de nieve en cuencas zona centro sur.

Se observa que en todos los casos la tendencia general (expresada en la línea gris), es que la línea de nieve vaya subiendo, es decir, que la nieve precipita cada vez

menos a cotas bajas. Para confirmar esto, se muestran en la Tabla 6-2 los valores de las pendientes de las líneas de tendencia.

Tabla 6-2. Pendientes de la línea de tendencia.

Cuenca	Pendiente
Choapa	0.090
Aconcagua en Chacabuquito	0.098
Maipo en El Manzano	0.122
Cachapoal en Cortaderal	0.095
Maule en Pehuén	0.085
Bío-Bío en Ralco	0.027

Se observa que para todas las cuencas la pendiente de la línea de tendencia es mayor que cero, lo que confirma que la línea de nieve ha subido con el paso del tiempo.

6.2 Cota mínima de la línea de nieve y su relación con volúmenes de deshielo y meteorología

Es de interés saber si la elevación que alcanza la línea de nieve tiene relación con las mediciones de precipitación, temperatura y volúmenes de la temporada de deshielo. Por lo mismo, se determina en primer lugar la cota mínima alcanzada por la nieve durante el período de estudio. Estas cotas mínimas, al igual que en el análisis anterior, se obtienen en base a una media móvil de catorce días de duración. Esto se hace con el fin de eliminar los errores de apreciación que podría causar el elegir el punto de cota mínima, ya que dicho valor no necesariamente representa una permanencia de la nieve en esa cota.

Con respecto a los registros meteorológicos, una publicación reciente (Cortés, et al., 2011) se utiliza como base para determinar con qué estaciones se pueden relacionar las seis cuencas analizadas. Para los volúmenes de deshielo, se usan registros fluviométricos de estaciones cercanas a la cuenca de estudio. Las estaciones seleccionadas se muestran en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3. Estaciones meteorológicas y fluviométricas asociados.

Cuenca MODIS	Estación meteorológica asociada		Volumen de deshielo
	Precipitación	Temperatura	
Choapa	Rivadavia	La Laguna	Choapa en Cuncumén
Aconcagua en Chacabuquito	Riecillos	El Yeso	Aconcagua en Chacabuquito
Maipo en El Manzano	El Yeso	El Yeso	Maipo en El Manzano
Cachapoal en Cortaderal	El Yeso	El Yeso	Tinguiririca en Bajo Briones
Maule en Pehuén	Los Queñes	Ancoa	Teno después de la junta
Bío-Bío en Ralco	Ancoa	Ancoa	Nuble en San Fabián

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, se procede a graficar en distintas figuras, las relaciones de la cota mínima alcanzada por la línea de nieve con precipitación anual acumulada (Figura 6-3), la temperatura promedio de los meses de junio, julio y agosto (JJA) (Figura 6-4) y finalmente el volumen total de la temporada de deshielo (Figura 6-5), calculada a partir de los caudales registrados entre los meses de septiembre y marzo.

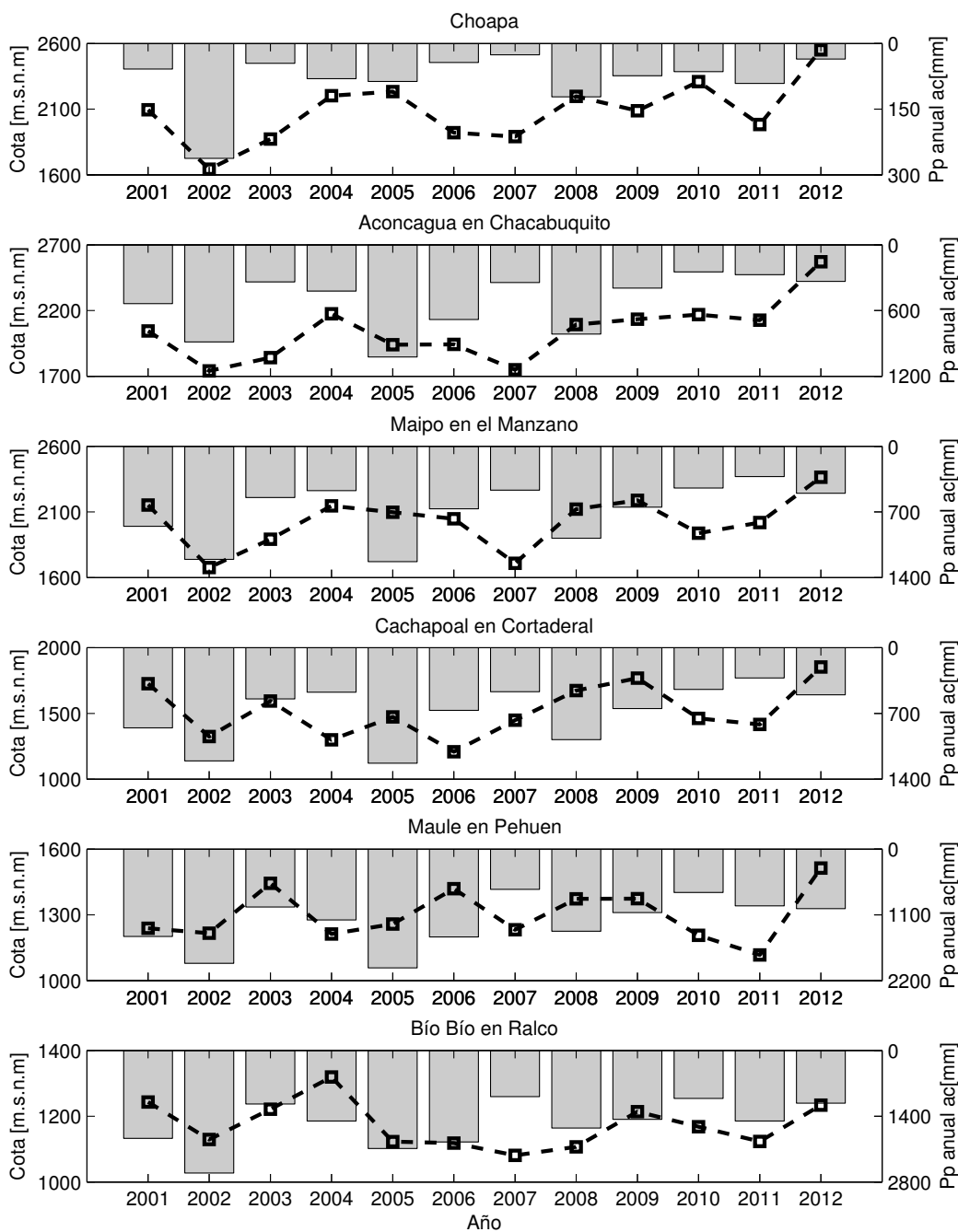


Figura 6-3. Relación entre cota mínima de la línea de nieve y la precipitación anual acumulada Las barras grises muestran la precipitación anual acumulada, y la serie de marcadores cuadrados negros muestra la evolución de la cota mínima de la línea de nieve.

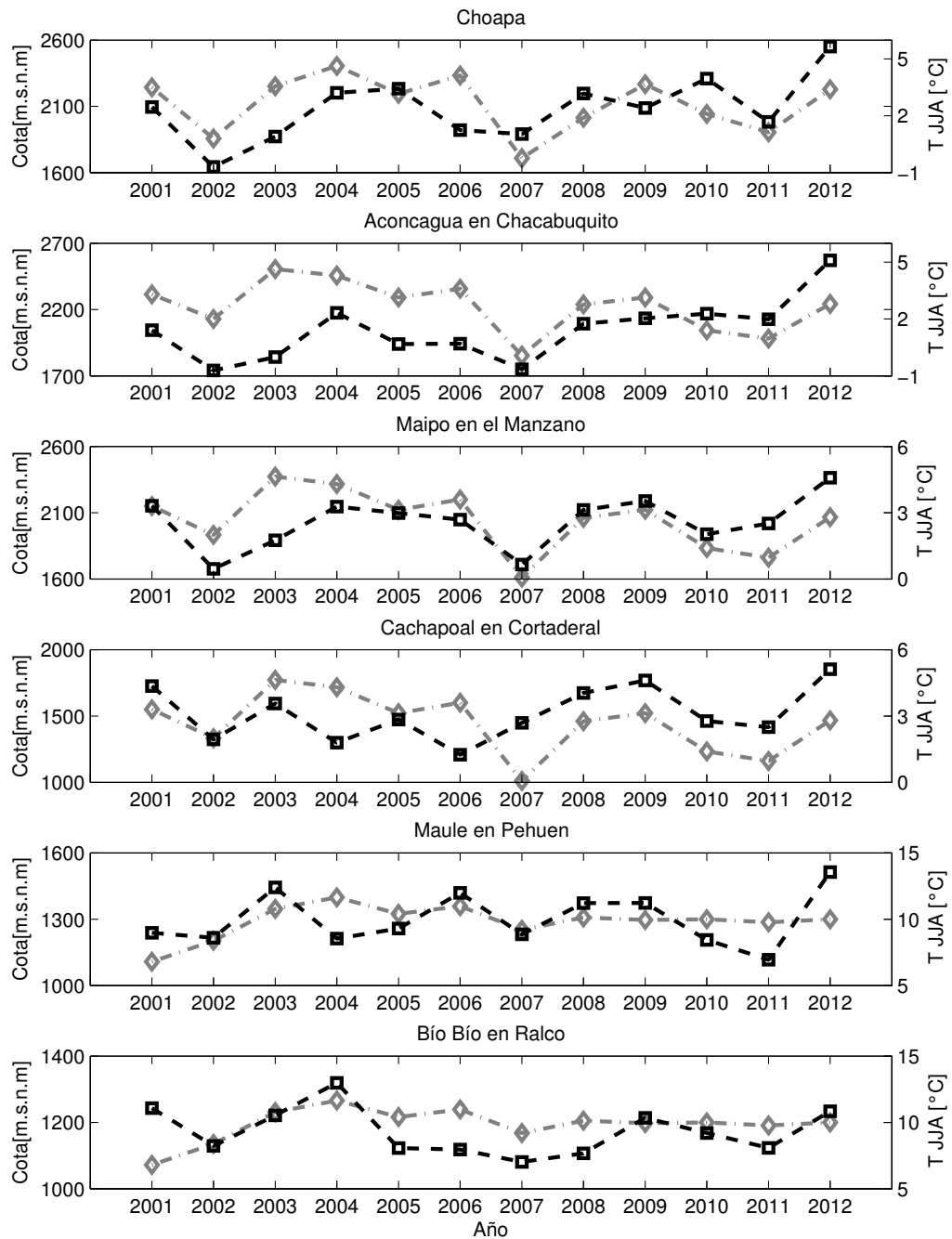


Figura 6-4. Relación entre cota mínima de la línea de nieve y temperatura promedio JJA. La serie de marcadores tipo rombo color gris claro muestra la temperatura promedio de los meses de Junio, Julio y Agosto (JJA), y la serie de marcadores cuadrados negros muestra la evolución de la cota mínima de la línea de nieve.

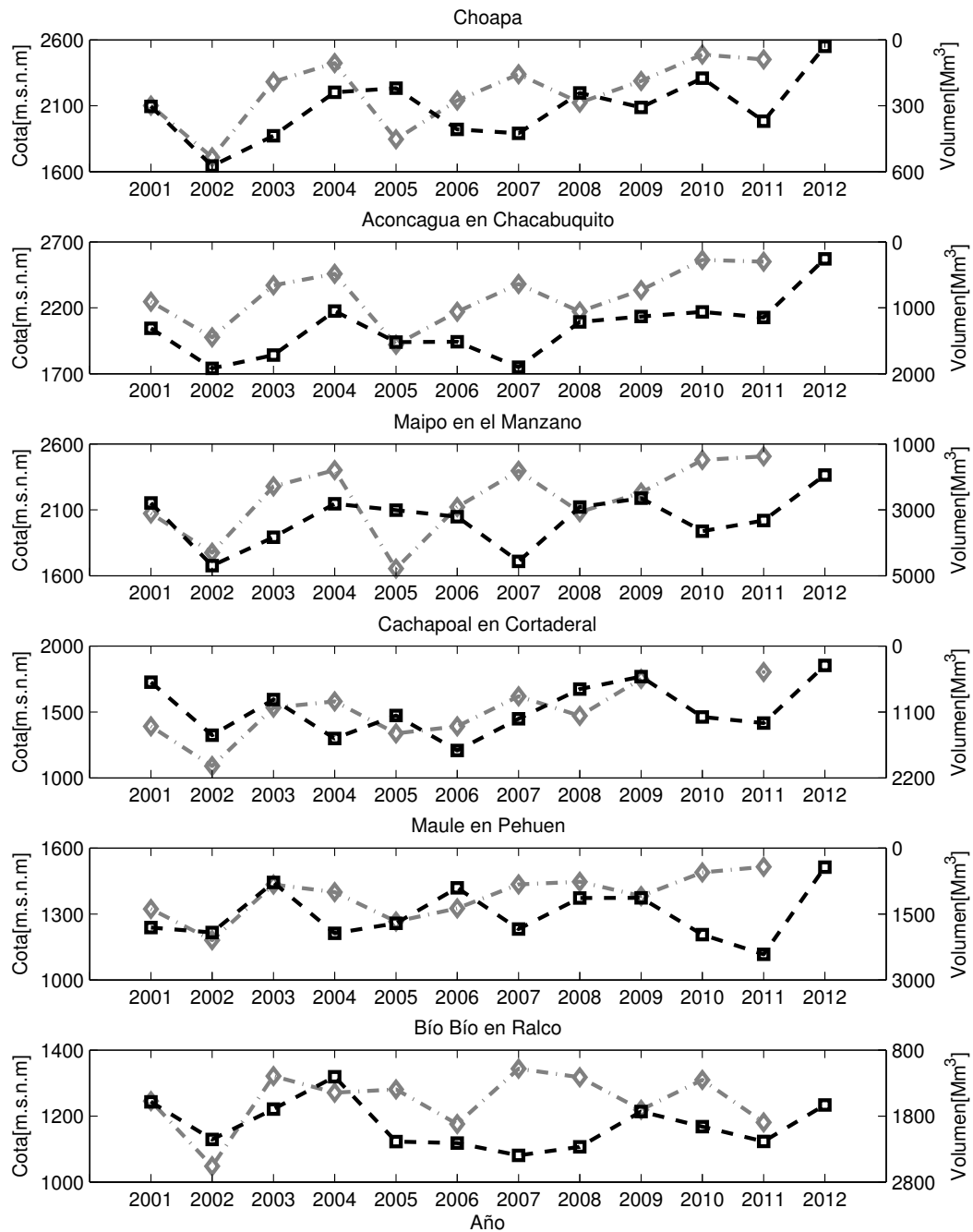


Figura 6-5. Relación entre cota mínima de la línea de nieve y volumen de deshielo. La serie de marcadores tipo rombo color gris claro muestra el volumen de deshielo para la temporada, y la serie de marcadores cuadrados negros muestra la evolución de la cota mínima de la línea de nieve.

En primer lugar, y en relación al valor que toma la cota mínima de la línea de nieve, se observa de forma clara que en las cuencas de más al norte, dicho valor es altamente variable, moviéndose por ejemplo, en el caso de “Choapa” en un rango de 1000 [m] (entre los 1600 [m.s.n.m.] en 2002, y los 2600 [m.s.n.m.] en 2012). Por otra parte, en las cuencas de más al sur, “Maule en Pehuen” y “BíoBío en Ralco”, esta variación es bastante menor y del orden de 300 [m]. Este hecho coincide con lo que se obtuvo en las rutas de nieve, que mostraron que para estaciones de más al norte la

acumulación máxima es dominada por eventos extremos y en el sur la acumulación no sufre variaciones tan importantes de un año a otro.

Las precipitaciones son un factor clave en la cota que alcanza la línea de nieve, sin embargo, se observan casos en que a pesar de haber precipitaciones por sobre el promedio, no se alcanzan cotas bajas, como ocurre para la mayoría de las cuencas en el año 2005. Para ese mismo año, las temperaturas promedio JJA tienen valores altos, lo que puede explicar este comportamiento. Además, esto puede deberse a que las altas temperaturas inducen un derretimiento, evitando que la nieve se mantenga a cotas bajas.

En relación a los volúmenes de deshielo, es evidente que para los primeros cuatro años de estudio (entre 2001 y 2004) este valor presenta una buena relación con la cota de la línea de nieve. Un año extraño es el 2007, ya que se observa que pese a que la línea de nieve alcanzó cotas bajas en la mayoría de las cuencas, esto no se tradujo posteriormente en un elevado volumen. Estudiando un poco más este caso, se ven bajas precipitaciones y bajas temperaturas, lo que causó el bajo volumen fue que ese año precipitó poco, pero al haber bajas temperaturas la nieve se mantuvo en cotas bajas. Al no haber un gran volumen de nieve (producto de que no precipitó mucho), los caudales de deshielo observados posteriormente no fueron altos. Otro caso es el que ocurre con elevadas precipitaciones y altas temperaturas invernales, que adelantan el derretimiento evitando así que la nieve pueda permanecer acumulada hasta la primavera.

Finalmente, de las tres variables estudiadas (precipitaciones, temperaturas y volúmenes de deshielo), las temperaturas son las que mayor relación tienen con respecto a la cota mínima.

7 CONCLUSIONES

7.1 Comparación de Caudales de deshielo

Al comparar los caudales observados con los pronosticados, se aprecia que los resultados obtenidos son bastante diferentes dependiendo de la estación evaluada.

En particular, para las estaciones ubicadas al norte de la latitud 30° S, se tiene que los pronósticos no han sido del todo positivos, no cumpliendo en la mayoría de los años con el 20% de error buscado por la DGA. Esto se puede atribuir a unas cuantas razones. En primer lugar, el hecho de que los caudales tengan un valor bajo, produce que pequeñas diferencias de éstos se transformen en altos errores, porcentualmente hablando. Otra causa está relacionada con la medición de los caudales en las estaciones fluviométricas (y que se asumen como correctos), los cuales podrían no siempre estar bien medidos. Es así como se observan casos, en que por ejemplo para la estación “Huasco en Algodones”, el caudal medio mensual del mes de diciembre tiene variaciones de más de 3000% de un año a otro (subiendo de 1 a $30[\frac{m^3}{s}]$), sin que los otros meses presenten variaciones de esa magnitud. Casos similares suceden en las otras estaciones de la zona norte, lo que podría indicar que ciertas observaciones no son del todo correctas, lo que generarían un error al ser evaluados los pronósticos.

Para las estaciones más al sur, se tiene que en general han cumplido con lo buscado por la DGA, teniendo incluso años en los que se ha logrado que los errores del pronóstico sean menores al 5%.

En relación a una posible influencia de fenómenos climáticos como lo son los años Niño y Niña, se observa que para el primero, el aumento de temperaturas que tiene asociado genera una inclinación a la subestimación de caudales de deshielo. Mientras que para los años Niña, se aprecia que los caudales han sido sobreestimados. A pesar de esto, los resultados no son concluyentes en este aspecto.

Respecto a los volúmenes de deshielo, se tiene que el pronóstico de esta variable muchas veces resulta mejor que el de los caudales durante el período de deshielo. Esto se debe a que previo a la temporada de deshielo se tiene una idea del agua total disponible y en base a eso se predicen los caudales. Por lo mismo, es más sencillo predecir el volumen total, que el hidrograma con que se distribuirá. En este caso, un resultado evidente es que para volúmenes altos el pronóstico tendrá menos error porcentual, dada la forma en cómo se evalúa. Saber los volúmenes es de suma importancia para la planificación del manejo de las reservas de agua, tanto para la temporada en que ocurre el deshielo, como para los meses venideros.

Finalmente, en relación a las causas de los problemas para pronosticar, de acuerdo a las categorías propuestas por Leavisley (1989), en Chile Central los que mayor influencia tienen son los asociados a la región de estudio y la calidad de la información. El primero es causado principalmente por las características geográficas de las zonas que se deben estudiar para realizar predicciones de caudales, donde el principal generador de escorrentía (la nieve) se deposita en las zonas más altas de las

cuencas, las que son de difícil acceso. Luego, la calidad de la información está relacionada con el problema anterior, ya que producto de la gran dificultad para obtener datos, éstos son insuficientes y de mediana calidad.

7.2 Rutas de nieve y snow pillows

Del análisis se puede concluir que los sensores tipo snow pillow representan de buena forma la región en que se encuentran. Esto se observa en la comparación con las mediciones de ruta de nieve, así como también en los datos recogidos en el terreno de Cerro Vega Negra. El gran problema que presentan radica en que su información muestra grandes vacíos, habiendo estaciones con prolongados periodos sin información. Una correcta utilización y levantamiento de información de estos dispositivos podría significar una mejora en la calidad y cantidad de los datos de nieve disponibles.

Respecto a las rutas de nieve, las mediciones no se realizan con la frecuencia esperada. De acuerdo a experiencias internacionales, lo correcto sería efectuarlas a partir del mes de mayo y al menos de manera quincenal. En caso de que esto no sea posible, se recomienda medir la mayor cantidad de veces posibles durante los meses de agosto y septiembre, ya que es ahí cuando se logra la máxima acumulación.

También, es importante destacar el hecho de que la acumulación registrada por las rutas de nieve presentan una buena correlación entre ellas, al pertenecer a la misma cuenca. En el caso de rutas más distantes, no se observó ningún tipo de correlación, evidenciando la gran variabilidad que posee la acumulación nival.

Las relaciones encontradas entre volúmenes de deshielo y acumulación máxima de nieve en rutas cercanas a las estaciones fluviométricas, resultan importantes y muestran el valor que tiene realizar mediciones periódicas para determinar la acumulación máxima y así obtener buenas predicciones de caudales. A su vez, resulta interesante que las estaciones ubicadas más al norte presenten ajustes tipo Gumbel y Pearson, ya que señalan que las acumulaciones máximas están regidas por eventos extremos, es decir, hay años en que la nieve que cae es mayor a la de otros años, presentando una gran variación interanual. En el informe del año 1991 elaborado por Escobar y Anabalón, los resultados mostrados son similares ya que las estaciones muestran una distribución del tipo Lognormal que también se atribuye a eventos extremos. En cuanto a las estaciones ubicadas más al sur, la distribución observada de la acumulación máxima muestra curvas de variación estacional del tipo Normal, señalando que en general en la mayoría de los años hay una acumulación que no varía mucho al ser comparada con los otros, es decir, poseen poca variación interanual en la acumulación máxima observada.

Finalmente, en relación al cálculo del coeficiente grado-día, se tiene que los valores coinciden con los esperados para el caso de derretimiento de nieves, incluso en las estaciones en que se rellenaron los datos de temperatura. Sin embargo, los resultados no son concluyentes, principalmente debido a que la calidad de la información de entrada no es de la mejor calidad. Si se mejorasen, por ejemplo, las

mediciones de los snow pillows y los registros de temperaturas en las cercanías de los mismos, este método podría resultar útil.

7.3 Líneas de nieve

En todas las cuencas estudiadas, se observa una tendencia general a que la línea de nieve se encuentre más arriba, es decir, cada año la nieve precipita a cotas más elevadas.

En relación a lo que se definió como cota mínima anual para la línea de nieve, los parámetros (precipitaciones, temperaturas y volúmenes de deshielo) que se usaron para su estudio mostraron diversos resultados. En primer lugar, como se podría suponer, el hecho de que se tengan abundantes precipitaciones a veces se traduce en que la línea de nieve se ubique en cotas bajas, sin embargo, esto dependerá altamente de la temperatura promedio durante los meses de invierno.

En segundo lugar, se tiene que la temperatura es la que mejor relación muestra con la cota mínima de la línea de nieve. Teniéndose que para altas temperaturas, la línea de nieve no baja a pesar de haber altas precipitaciones y en el caso contrario (año 2007 en un buen ejemplo) las bajas temperaturas permiten a la nieve mantenerse a cotas bajas, aún sin muchas precipitaciones.

Por su parte los volúmenes de deshielo no muestran en particular una buena relación con la cota mínima de la línea de nieve, ya que a excepción de los primeros cuatro años de estudio, el hecho de que la nieve se pueda ver a menores cotas no se traduce en que haya más agua disponible en la temporada de derretimientos (y viceversa).

Finalmente, se tiene que las relaciones más fuertes encontradas en este caso, fueron la de la línea de nieve con la temperatura por un lado y la de las precipitaciones con el volumen de deshielo por otro.

7.4 Comentarios finales

El pronóstico de caudales de deshielo resulta de vital importancia, sobre todo cuando se habla de una zona como Chile Central, donde sus cuencas de régimen marcadamente nival sostienen el mayor número de las actividades productivas del país.

Es por lo anterior que la calidad de los pronósticos debe mejorar, sobre todo en las zonas de más al norte, donde la poca información disponible hace que predecir los caudales tenga una alta complejidad y grado de error. Por ejemplo, en el caso de las estaciones “Copiapó en La Junta” y “Huasco en Algodones”, no se encontraron siquiera rutas de nieve cercanas, que como se observó en otras zonas podrían significar una importante ayuda al momento de cuantificar el agua que habrá disponible.

En esta misma línea, siendo conscientes de la dificultad que presentan muchos lugares para realizar mediciones, ya sea por el difícil acceso, falta de personal e incluso la complejidad que presenta la planificación de terrenos, resulta vital aprovechar de buena forma los medios disponibles actualmente. El hecho de que se disponga de snow pillows que tengan grandes vacíos de información, es una problemática que se debe corregir, ya que como se vio son dispositivos que pueden entregar buena información. Asimismo, es recomendable continuar con la implementación de estos sensores, que permiten tener mediciones de manera constante y remota.

Es importante señalar que las mediciones en rutas de nieve son de altísimo valor, ya que permiten conocer mejor el terreno, así como caracterizarlo no solo de forma cuantitativa, sino que también cualitativa, por lo que realizar campañas de mediciones con la mayor frecuencia posible es vital, tanto para validar otros métodos, como para contar con la mayor cantidad de información posible al momento de realizar el análisis

8 BIBLIOGRAFÍA

Cartes, M., 2009. *Pronóstico de volúmenes de deshielo mediante redes neuronales recurrente e imágenes satelitales MODIS*, Santiago: Tesis para optar al grado de magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Universidad de Chile.

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

Cortés, G., Vargas, X. & McPhee, J., 2011. Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *Journal of Hidrology*, Volumen 405, pp. 93-109.

DGA, 1974-2012. *Pronóstico de disponibilidad de agua: temporada de riego.*, Santiago de Chile: DGA.

Escobar, F. & Anabalón, R., 1991. *Análisis de las rutas de nieve del país*, Santiago de Chile: DGA.

Fassnacht, S., Heun, C., López-Moreno, J. & Jatron, J., 2010. Variability of snow density measurement in the Río Esera Valley, Pyrenees Montains, Spain. *Cuadernos de Investigación Científica*, pp. 59-72.

Garreaud, R., 1993. *Impacto de la línea de nieve en crecidas invernales en cuencas pluvio-nivales de Chile Central*. Concepción, s.n.

Garreaud, R., s.f. *Condicion Nival en Chile Central*. [En línea] Available at: <http://www.dgf.uchile.cl/rene/MODIS/> [Último acceso: 2 Abril 2013].

Goodison, B., 1981. Compatibility of Canadian Snowfall and Snow Cover Data. *Water Resources Research*, 17(4), pp. 893-900.

Gupta, H. V., Sorooshian, S. & Yapo, P. O., 1999. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), pp. 135-143.

Hock, R., 2003. Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, Volumen 282, pp. 104-115.

Jansson, P., Hock, R. & Schneider, T., 2003. The concept of glacier storage: a review. *Journal of Hydrology*, Volumen 282, p. 116–129.

Leavesley, G. H., 1989. Problems of snowmelt runoff modelling for a variety of physiographic and climatic conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 6(34), pp. 617-634.

Marks, D., Cooley, K. R., Robertson, D. C. & Winstral, A., 2001. Long-term snow database, Reynolds Creek Experimental Watershed, Idaho, United States. *Water Resources Research*, 37(11), pp. 2835-2838.

Martinec, J., Rango, A. & Roberts, R., 1998. *Snowmelt Runoff Model (SRM), User's Manual*. Berna: Department of Geography, University of Berne.

Martínez, N., 2010. *Reconstrucción del equivalente en agua de la cobertura nival en la cuenca alta del río Aconcagua. Empleo de imágenes MODIS.*, Santiago: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Masiokas, M. y otros, 2008. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change*, Issue 60, pp. 85-100.

McGraw-Hill Companies, Inc., 2002. *McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology*. Sexta ed. s.l.:The McGraw-Hill Companies, Inc.

Moriasi, D. y otros, 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation. *Transactions of the ASABE*, 50(3), pp. 885-900.

NASA, s.f. *Aqua Project Science*. [En línea] Available at: http://aqua.nasa.gov/about/instrument_modis.php [Último acceso: 2 Abril 2013].

NASA, s.f. *MODIS Web*. [En línea] Available at: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/> [Último acceso: 2 Abril 2013].

NASA, s.f. *National Snow & Ice Data Center*. [En línea] Available at: <http://nsidc.org/> [Último acceso: 1 Abril 2013].

Nash, J. & Sutcliffe, J., 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hidrology*, 10(3), pp. 282-290.

Ohmura, A., 2001. Physical Basis for the Temperature-Based Melt-Index Method. *Journal of Applied Meteorology*, Volumen 40, pp. 753-761.

Pagano, T., Garen, D. & Sorooshian, S., 2004. evaluation of Official Western U.S. Seasonal Water Supply Outlooks, 1922-2002. *Journal of Hidrometereology*, Volumen 5, pp. 896-909.

Parker, S. P., 2003. *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*. Nueva York: McGraw-Hill.

Peña T., H. & Nazarala G., B., 1982. *Pronósticos de caudales de deshielo en el corto plazo*, Santiago de Chile: DGA.

Peña T., H. & Nazarala G., B., 1987. *Snowmelt-runoff simulation model of a Central Andean basin with relevant orographic effects*. Vancouver, s.n.

Roethlisberger, H. & Lang, H., 1987. Glacio-Fluvial Sediment Transfer: An Alpine Perspective. En: A. Gurnell & M. Clark, edits. *Glacial hydrology*. New York: Wiley, p. 207–284.

Sato, A., Takahashi, S., Naruse, R. & Wakahama, G., 1984. Ablation and heat balance of the Yukikabe snow patch in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan. *Annals of Glaciology*, Volumen 5, pp. 122-126.

Van Liew, M. W., Arnold, J. G. & Bosch, D. D., 2005. Problems and Potential of Autocalibrating a Hydrologic Model. *Transactions of the ASAE*, 48(3), pp. 1025-1040.

WMO, 1986. *Intercomparison of models for snowmelt runoff*. s.l., Operational Hydrology Report 23.

ANEXOS I

Se presentan a continuación, algunos de los resultados mostrados en el informe "Análisis de las rutas de nieve del país" (1991).

TABLA N° 4.- EQUIVALENTE EN AGUA MAXIMO MENSUAL
(mm. equivalente en agua)

RUTA		MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
OLIVARES	N	6	5	8	10	8	4	1	--
	mm.	9	13	129	79	122	7	112	--
	d.est.	14	13	153	153	142	12	--	--
	máx.	36	35	523	531	457	28	112	--
Q. LARGA	N	1	7	16	25	22	18	7	3
	mm.	162	44	143	130	177	209	116	0
	d.est.	--	31	164	145	199	208	156	--
	máx.	162	84	665	696	820	580	411	--
V. NEGRA	N	5	6	5	12	12	12	3	1
	mm.	122	70	495	399	564	558	662	571
	d.est.	145	67	432	306	498	431	423	--
	máx.	396	168	1247	866	1859	1476	1250	571
PORTILLO	N	6	9	27	32	33	32	20	3
	mm.	48	118	321	500	576	535	310	169
	d.est.	37	114	289	313	388	450	430	116
	máx.	102	348	1135	1208	1662*	1526	1334	332
C. NEGRO	N	2	12	10	13	12	15	6	2
	mm.	149	283	584	671	779	903	603	993
	d.est.	133	175	323	327	372	555	322	--
	máx.	282	754	1130	1201	1796	1603	932	1802
B. NEGROS	N	8	16	23	22	24	19	13	6
	mm.	107	185	333	460	424	438	354	147
	d.est.	51	122	285	335	270	346	281	202
	máx.	185	533	1181	1318	1198	1290	943	462

(*) : Valor correspondiente al máximo medido el año 1982, pero e cual no corresponde al máximo real, el que se estima alcanzo alrededor de los 2.000 mm.

Figura A I - 1. Equivalente en agua máximo mensual. Fuente: Escobar y Anabalón (1991).

TABLA N° 4.- EQUIVALENTE EN AGUA MAXIMO MENSUAL
(mm. equivalente en agua)
(contrinuación)

RUTA		MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
R. ALFARO	N	4	12	15	19	14	11	3	--
	mm.	48	104	297	362	297	192	0	--
	d.est.	49	99	240	282	257	275	--	--
	máx.	110	335	844	1113	919	886	0	--
L. NEGRA	N	5	13	19	22	22	18	12	3
	mm.	119	162	338	508	557	437	252	338
	d.est.	41	125	393	347	408	509	416	--
	máx.	163	345	1600	1430	1875	1760	1430	620
LA GLORIA	N	1	10	10	11	15	17	10	4
	mm.	0	184	388	684	752	543	30	--
	d.est.	--	267	228	385	437	393	53	--
	máx.	--	714	845	1692	1831	1331	157	--
V. CHILLAN	N	2	12	12	18	14	21	11	7
	mm.	50	180	412	639	795	712	419	160
	d.est.	--	172	338	433	450	376	281	187
	máx.	99	627	1257	2000	2007	1256	1039	540
QUEMAZONES	N	2	14	15	15	13	19	10	4
	mm.	15	123	256	393	452	247	0	0
	d.est.	--	177	244	362	389	297	0	0
	máx.	30	589	879	1285	1201	854	0	0

Figura A I - 2. Equivalente en agua máximo mensual (continuación). Fuente: Escobar y Anabalón (1991).

**TABLA N° 8.- RUTAS DE NIEVE
ESTADIGRAFOS Y PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA
PERIODO 1951-90 (40 años)**

RUTA DE NIEVE	CUENCA	LAT. (° ')	H (m.)	PROM. mm eq. agua	DESV. mm eq. agua	C.V.	C.AS.	DIST.	20% (mm. eq. agua)	50% (mm. eq. agua)	85% (mm. eq. agua)
C. OLIVARES	ELQUI	30 15	3600	108	108	1.00	2.59	LOGNOR	154	81	34
Q. LARGA	LIMARI	30 43	3500	206	184	0.89	1.68	GAMMA	320	166	54
V. NEGRA	LIMARI	30 55	3600	475	396	0.83	1.60	LOGNOR	709	341	139
PORTILLO	ACONC.	32 50	3000	630	405	0.64	1.02	LOGNOR	910	511	251
C. NEGRO	ACONC.	33 08	3450	807	644	0.80	1.95	GUMBEL	1154	706	294
B. NEGROS	MAIPO	33 21	3380	453	293	0.65	1.41	LOGNOR	668	368	176
R. ALFARO	MAIPO	33 37	2200	334	239	0.72	1.44	GUMBEL	484	294	125
L. NEGRA	MAIPO	33 40	2760	566	379	0.67	1.59	GUMBEL	795	503	243
L. AGUIRRE *	MAULE	36 00	2000	1035	460	0.44	0.57	GUMBEL	1453	972	544
M. BARROSO *	MAULE	35 39	2350	917	365	0.40	0.23	GAMMA	1235	853	497
CALABOZO *	MAULE	35 36	1850	544	278	0.51	0.12	NORMAL	778	544	256
C. GLORIA #	ITATA	36 36	1500	714	329	0.46	0.76	NORMAL	991	714	373
V. CHILLAN #	ITATA	36 51	1938	879	423	0.48	0.98	NORMAL	1235	879	441
QUEMAZONES #	ITATA	36 53	1650	505	293	0.58	0.31	NORMAL	753	509	193
P. CHILLAN #	BIOBIO	37 12	1380	457	241	0.53	0.29	NORMAL	659	457	207
M. EL TORO #	BIOBIO	37 24	1450	817	460	0.56	0.10	NORMAL	1204	817	340

(*) : Período 1953-90 (38 años)

(#) : Período 1956-90 (35 años)

PROM. : Promedio de la estadística de máximos anuales (mm. eq. en agua)
 DESV. : Desviación estandar (mm. eq. en agua)
 C.V. : Coeficiente de variación
 C.AS. : Coeficiente de asimetría
 DISTRIB.: Distribución de probabilidades teórico

**Figura A I - 3. Rutas de nieve, estadígrafos y probabilidades de excedencia periodo 1951-1990.
Fuente: Escobar y Anabalón (1991).**

TABLA N° 9.- COEFICIENTES DE CORRELACION
ENTRE RUTAS, PRECIPITACIONES Y VOL. DE DESHIELO.
(continuación)

	PRECIPITACION		RUTAS		VOLUMENES
Laguna Teniente					
	La Rufina	0,64			Ting. B.B. 0,68
Lo Aguirre					
	Bullileo	0,60	Calabozo	0,85	Maule Arm. 0,75
	E. Digua	0,62	M. Barroso	0,96	L. Invern.
	Armerillo	0,76			
	C. Cipreses				
Meseta Barroso					
	Bullileo	0,61	Calabozo	0,90	Maule Arm. 0,96
	E. Digua	0,63	L. Aguirre	0,96	L. Invern.
	Armerillo	0,76			
	C. Cipreses				
Calabozo					
	Bullileo	0,52	L. Aguirre	0,85	Maule Arm. 0,71
	E. Digua	0,55	M. Barroso	0,90	L. Invern.
	Armerillo	0,66			Ñuble
	C. Cipreses				
Quemazones					
	Atacalco	0,17	C.L. Gloria	0,90	Ñuble S.F. 0,52
	Chillan S.	0,34	V. Chillan	0,53	
	E.Diguillín				
	S. Fabian				
Volcan Chillan					
	Atacalco	0,54	C.L. Gloria	0,48	Ñuble S.F. 0,77
	Chillan S.	0,68	V. Chillan	0,53	
	E.Diguillín				
	S. Fabian				
Cerro la Gloria					
	Atacalco	0,12	V. Chillan	0,48	Ñuble S.F. 0,53
	Chillan S.	0,37	Quemazones	0,90	
	E.Diguillín				
	S. Fabian				
Punta Chillan					
	C. Abanico		M. El Toro	0,92	L. Laja
Meseta el Toro					
	C. Abanico		P. Chillan	0,92	L. Laja

Figura A I - 4. Coeficientes de correlación entre rutas, precipitaciones y volumen de deshielo.
Fuente: Escobar y Anabalón (1991).

ANEXOS II

Se presentan a continuación las curvas de variación estacional para las rutas de nieve aún activas.

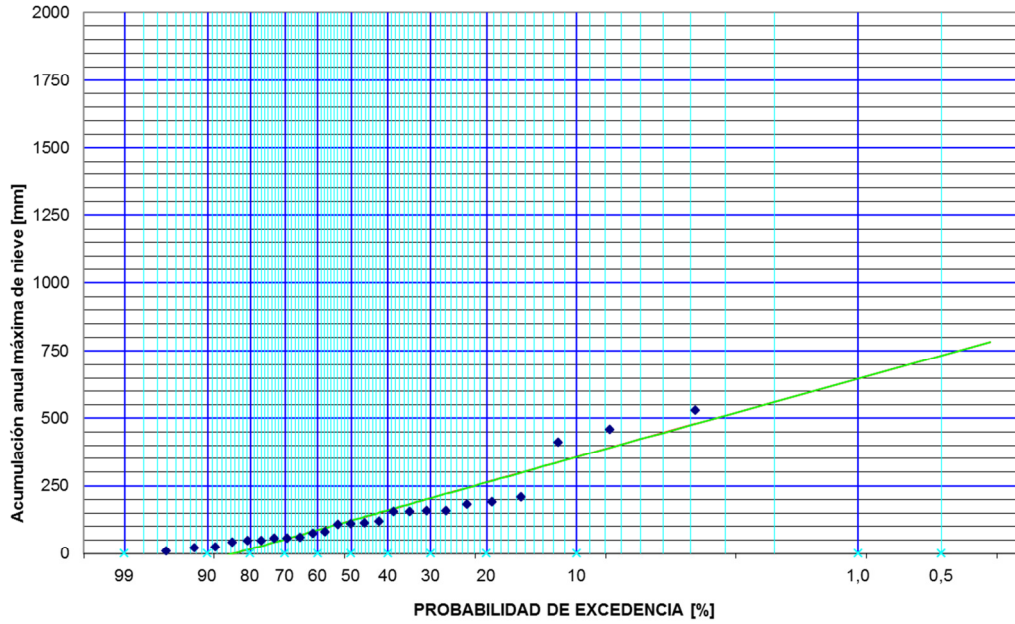


Figura A II - 1. Cerro Olivares (Gumbel) .

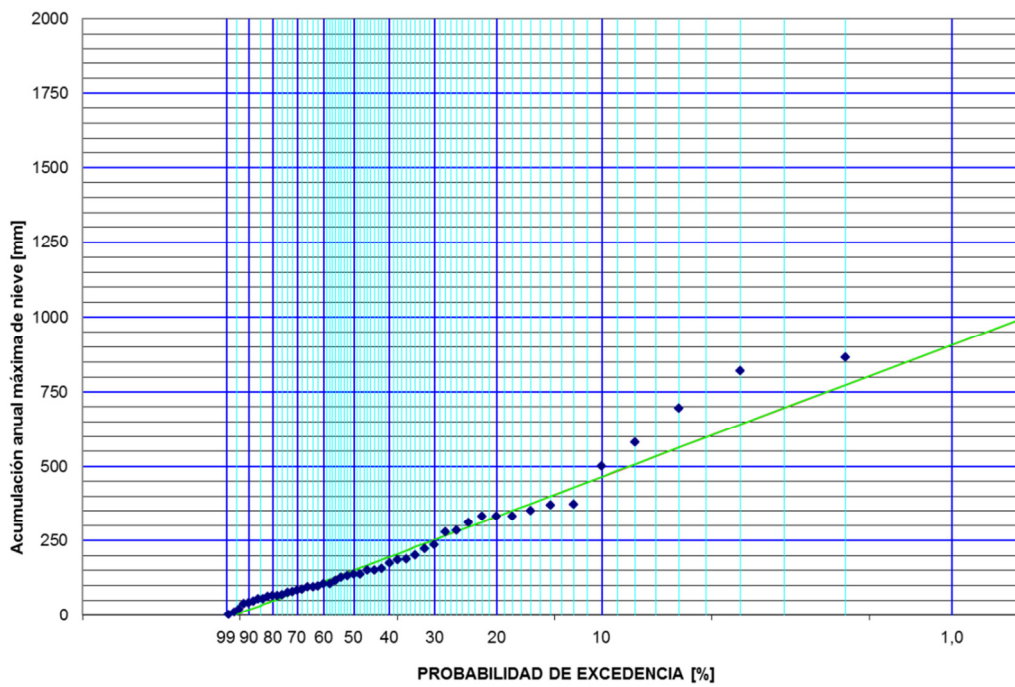


Figura A II - 2. Quebrada Larga (Pearson) .

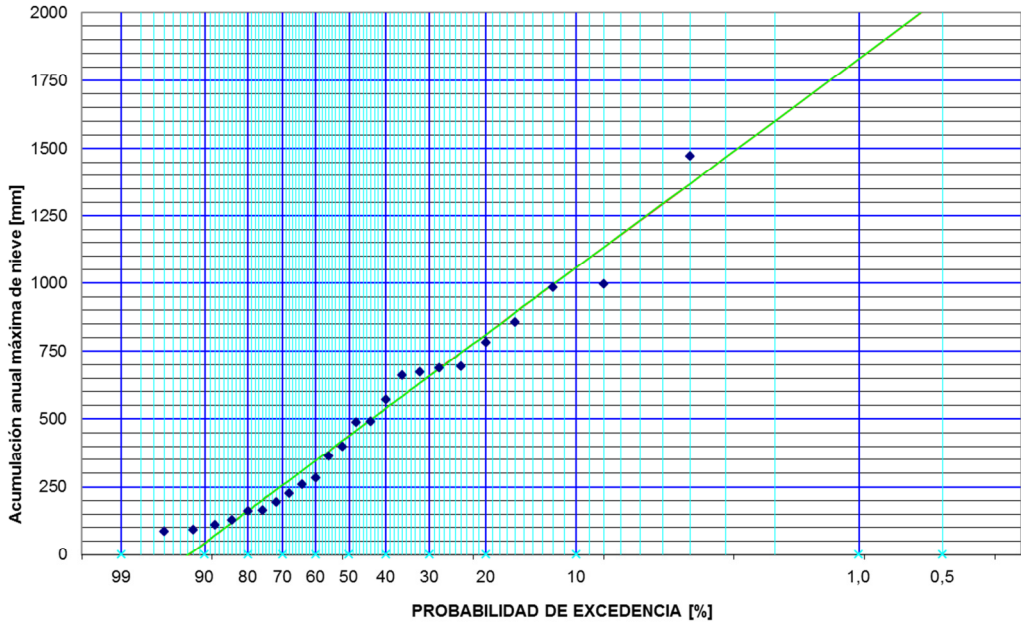


Figura A II - 3. Cerro Vega Negra (Gumbel) .

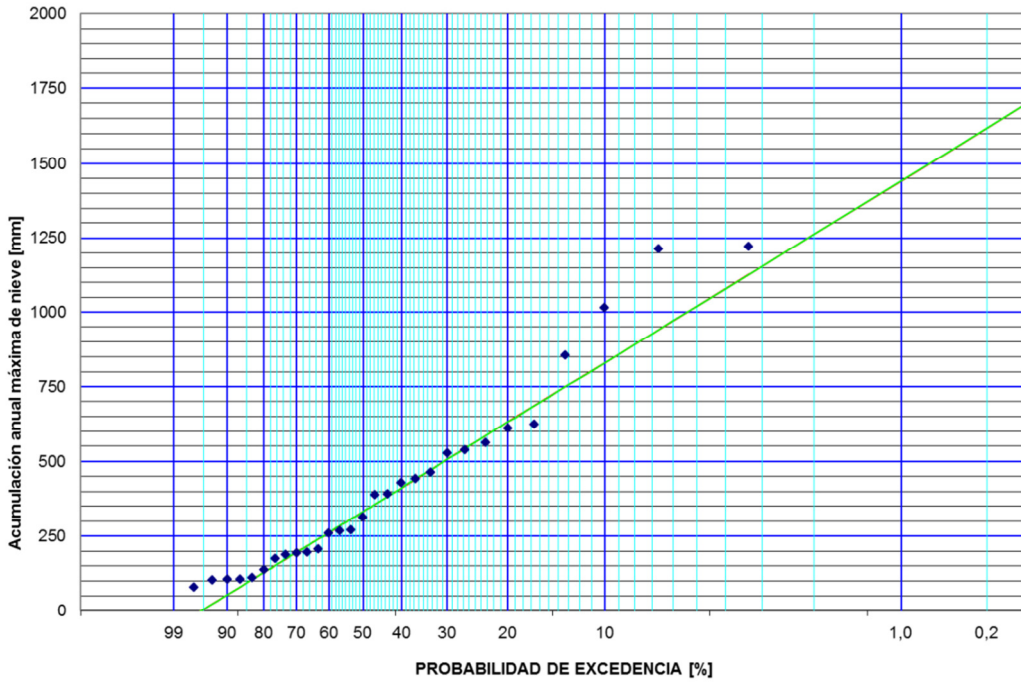


Figura A II - 4. El Soldado (Pearson) .

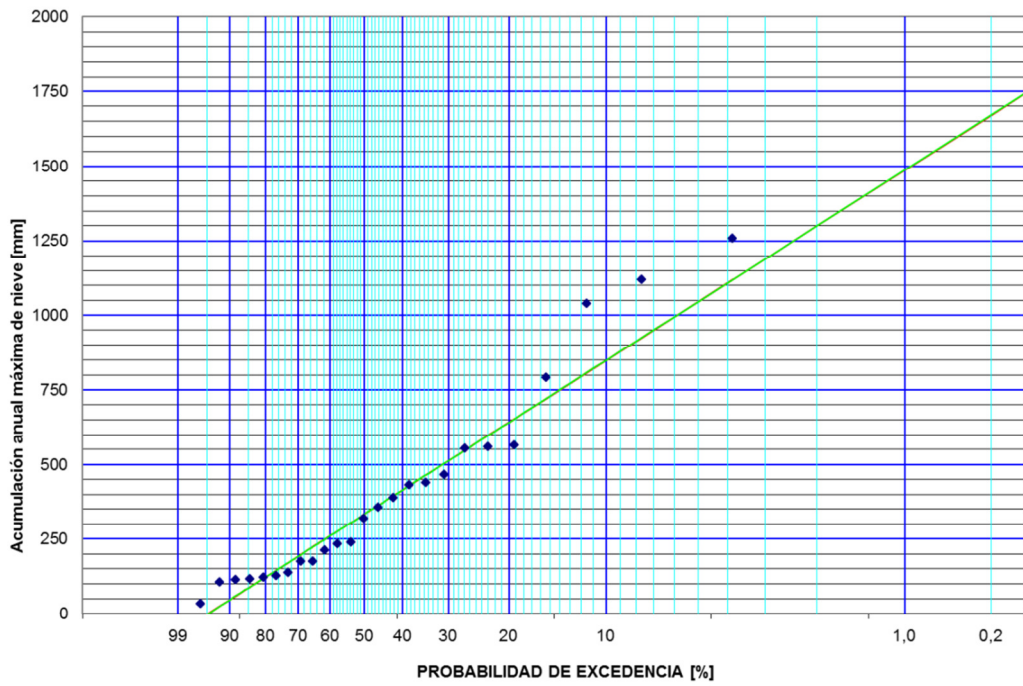


Figura A II - 5. Nacimiento El Sobrante (Pearson) .

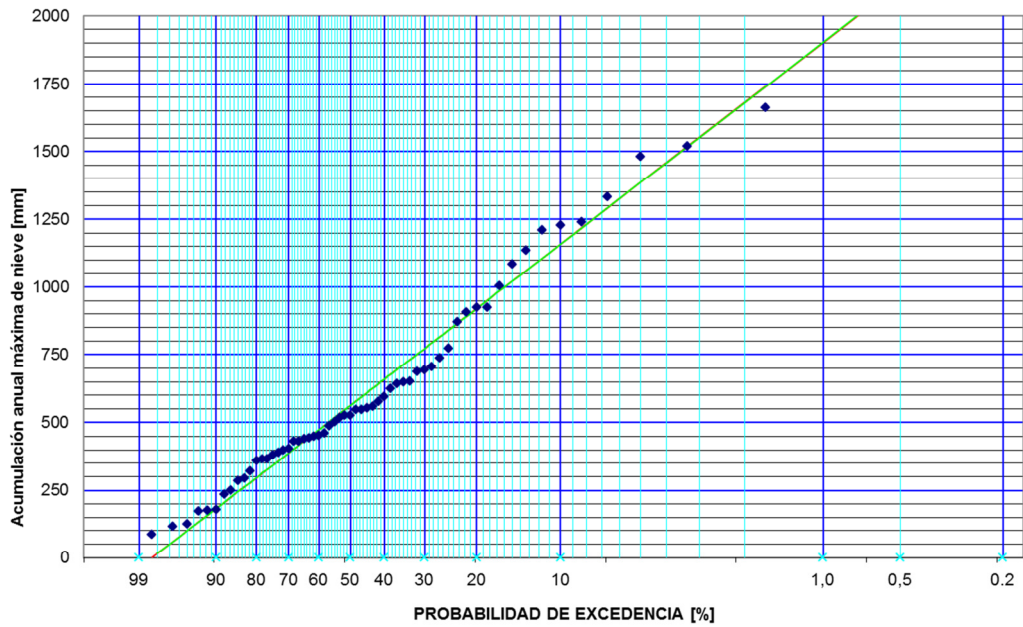


Figura A II - 6. Portillo (Gumbel) .

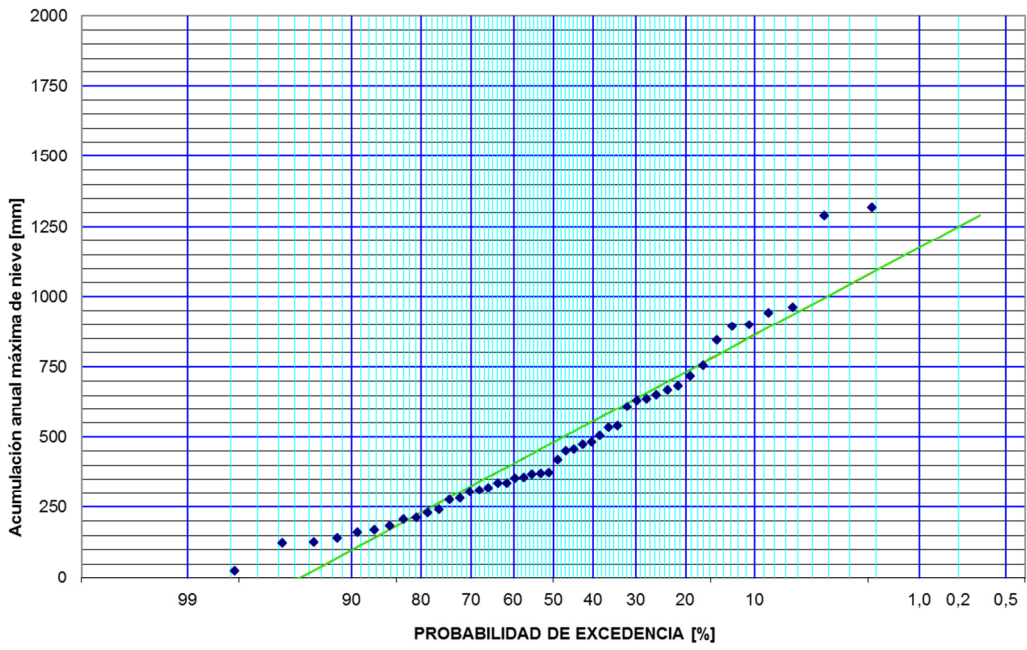


Figura A II - 7. Barros Negros (Normal) .

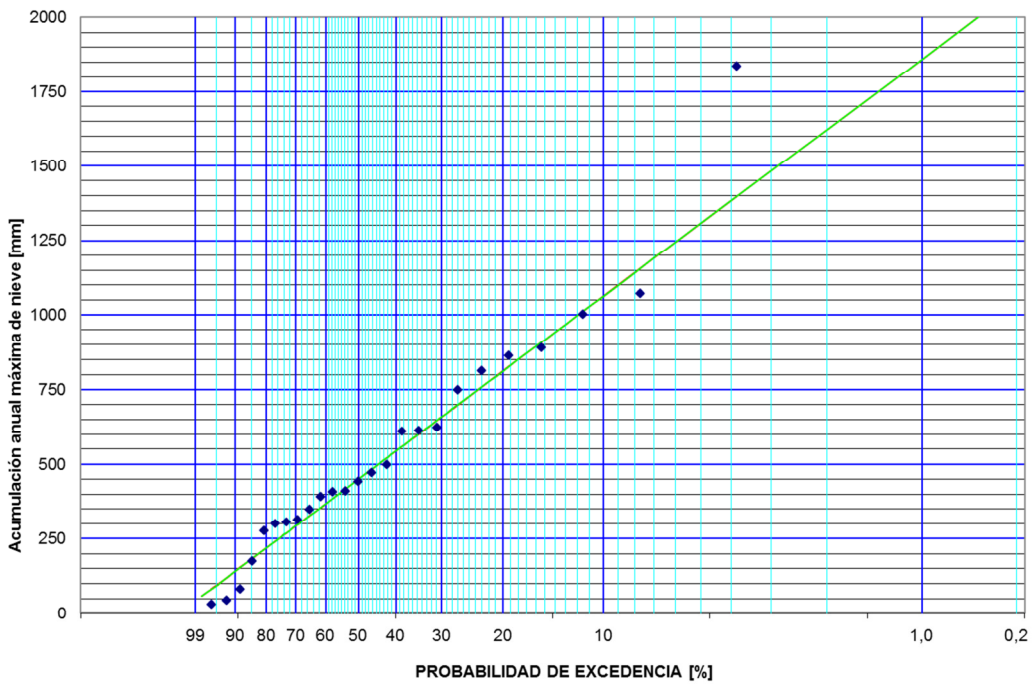


Figura A II - 8. La Dormida (Pearson) .

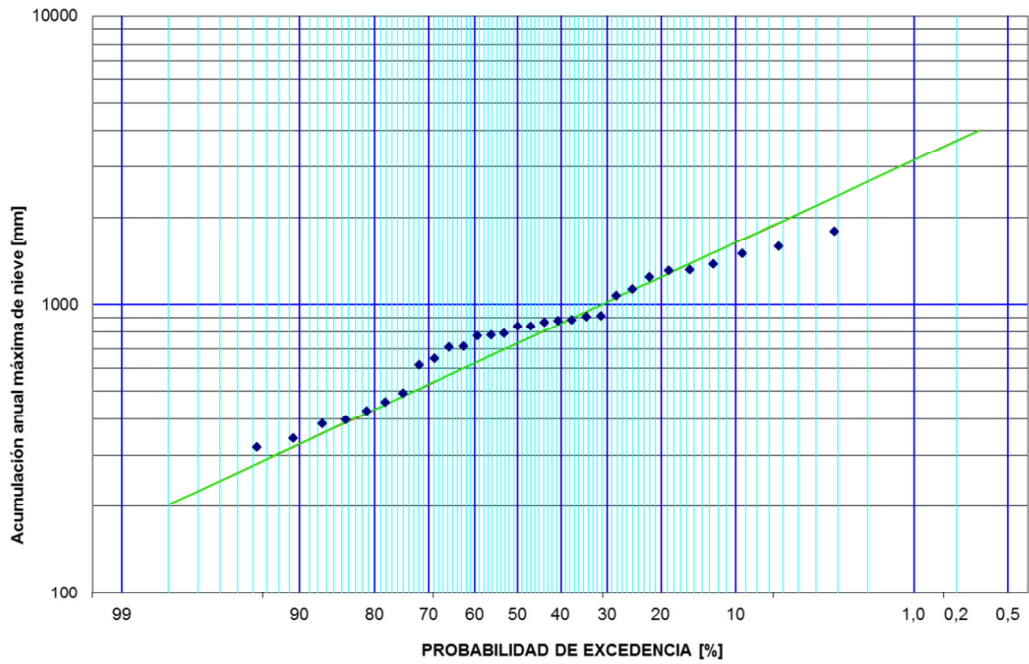


Figura A II - 9. Meseta Barroso (Log-Normal) .

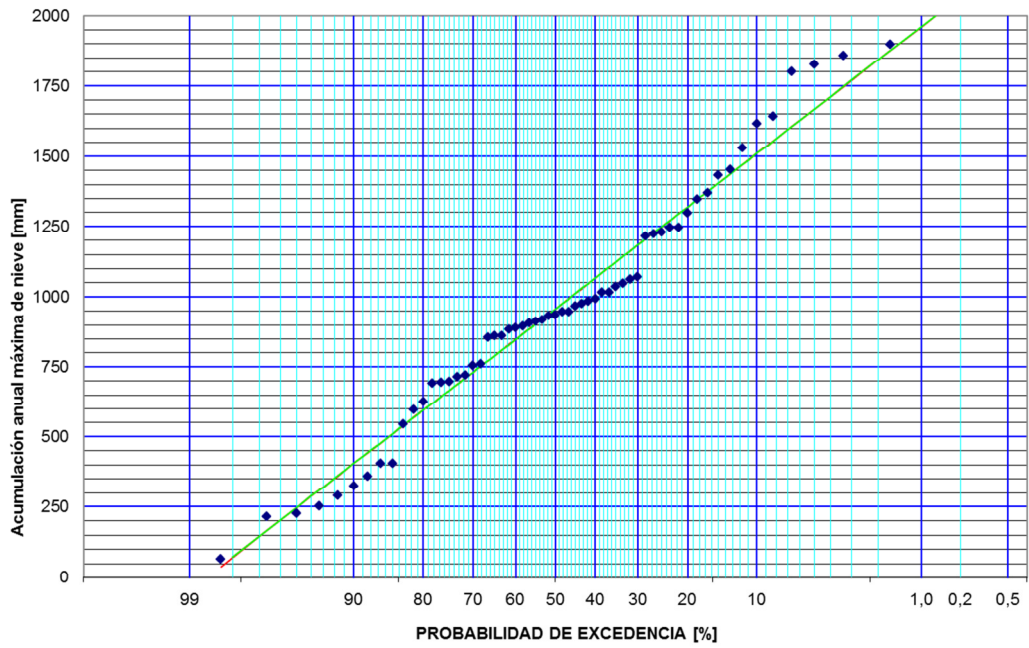


Figura A II - 10. Lo Aguirre (Normal) .

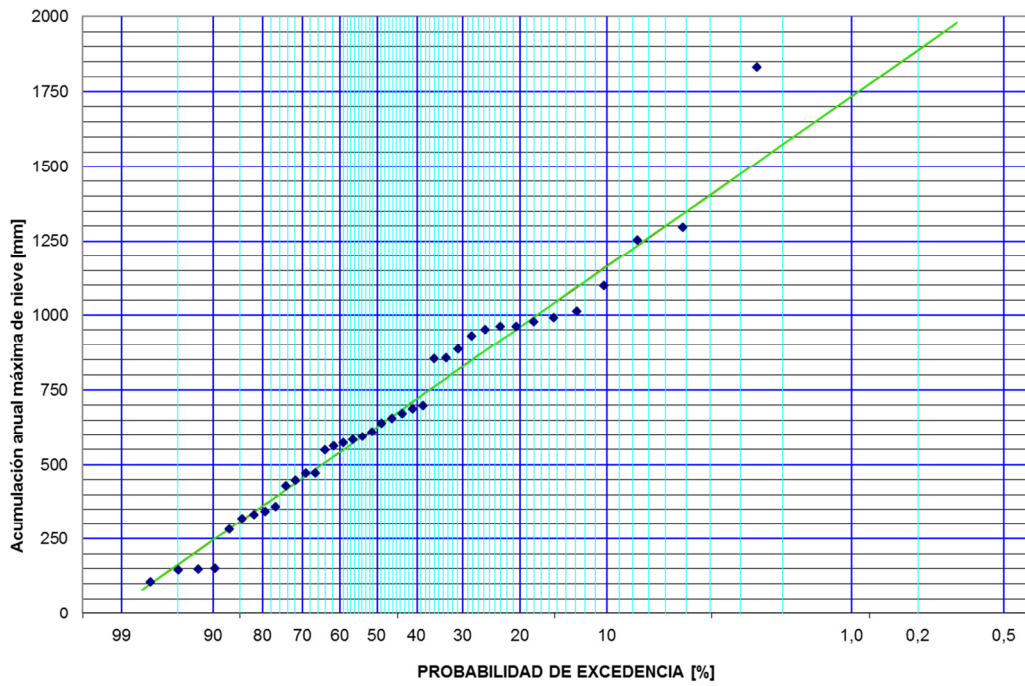


Figura A II - 11. Cerro La Gloria (Pearson) .

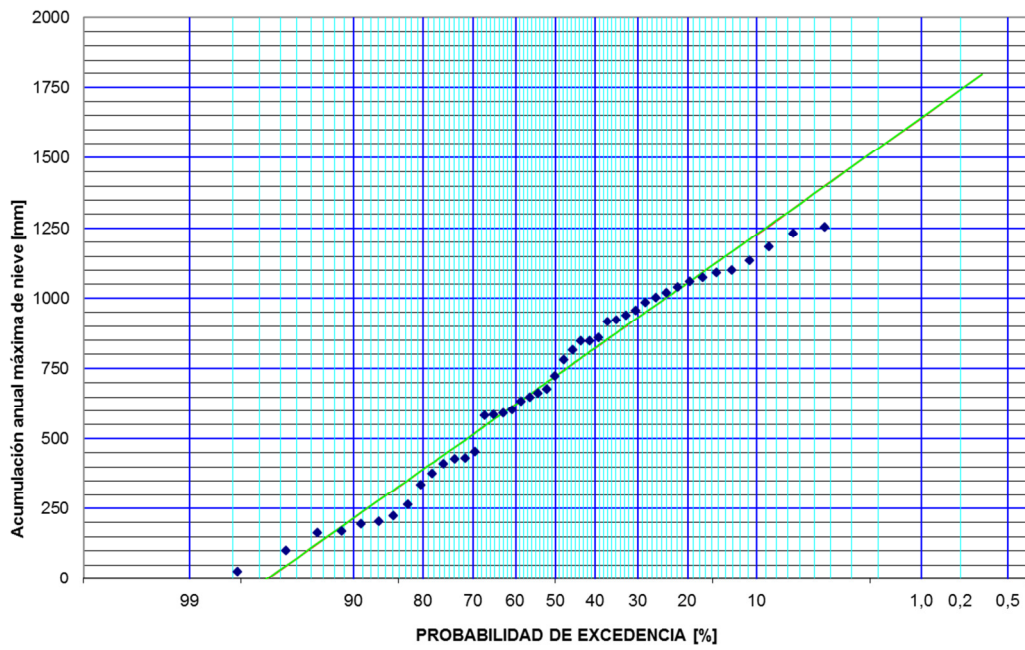


Figura A II - 12. Volcán Chillán (Normal) .

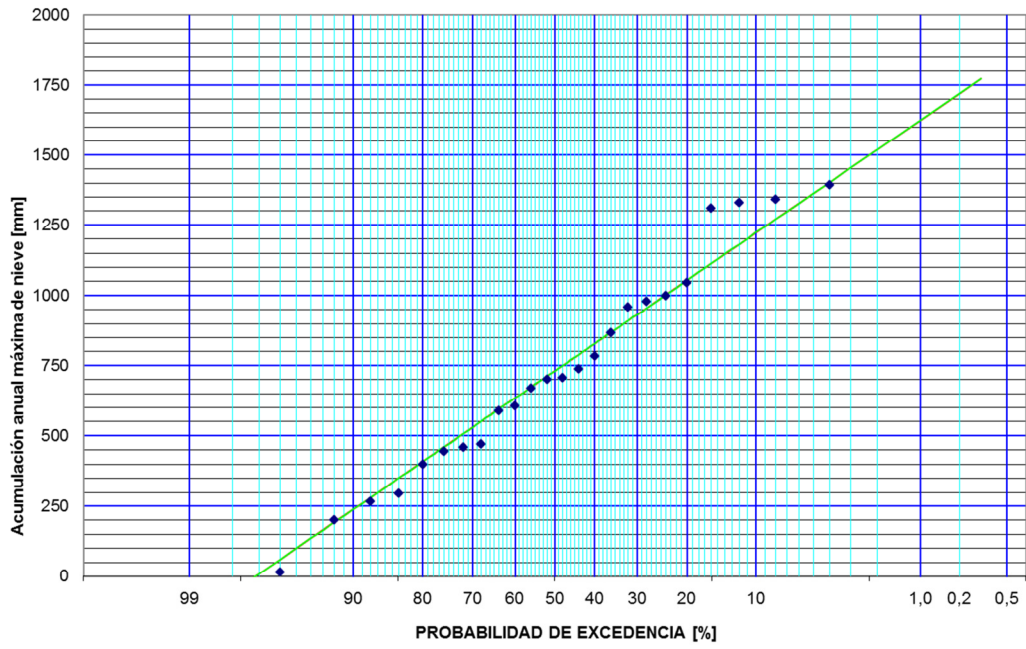


Figura A II - 13. Alto Mallines (Normal) .