



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE HIDROLOGÍA**

**ANÁLISIS DE LA RED NIVAL NECESARIA
PARA CUANTIFICAR LOS
RECURSOS HÍDRICOS, ETAPA II**

**REALIZADO POR:
UNIVERSIDAD DE CHILE
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y MEDIO AMBIENTE**

S.I.T. N° 353

SANTIAGO, NOVIEMBRE 2014

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Sr. Alberto Undurraga V.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez V.

Jefe División de Hidrología
Ingeniero Civil Sr. Javier Narbona N.

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Brahim Nazarala G.

UNIVERSIDAD DE CHILE

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil PhD. Sr. James McPhee T.

Profesionales:

Ingeniero Civil MSc. Sr. Edward Cornwell V.
Ingeniero Civil PhD. Sr. Santiago Montserrat M.

Geógrafo Sr. Yohann Videla G.

Ingeniero Civil MSc. Sr. Miguel Lagos Z.
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables Sr. Yuri Castillo A.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio titulado "ANÁLISIS DE LA RED NIVAL NECESARIA PARA CUANTIFICAR LOS RECURSOS HÍDRICOS, ETAPA II" corresponde a la generalización y extensión del estudio homónimo realizado en 2012. En esta ocasión, el estudio comprende tres líneas, las cuales abarcan la generación, implementación y aplicación de una nueva metodología de pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo en 16 cuencas ubicadas entre el río Copiapó y el río Ñuble y controladas por la Dirección General de Aguas; el desarrollo de una modelación distribuida del manto nival durante el periodo de deshielo, entre los años 2001 y 2012 en dichas cuencas de control, respaldada con el levantamiento de información de terreno y; la evaluación de la condición actual de la red nival y generación de criterios técnicos para su mejoramiento. Los resultados obtenidos tras la realización del trabajo en terreno y gabinete durante los años 2012, 2013 y 2014, junto con la generación de los modelos de reconstrucción nival y pronóstico de caudales de deshielo dan cuenta de la necesidad de efectuar mejoras en cuanto a la calidad de la información in situ del equivalente en agua de nieve registrado instrumentalmente junto con correcciones afines a la representatividad local de dichas mediciones. Por otra parte, se proponen dos estándares de instrumentalización nivo - climatológico en zonas de alta montaña, indicando mediante herramientas derivadas de la modelación distribuida, zonas para la extensión de la red nivométrica actual. A su vez, la metodología de pronóstico generada es factible de implementar computacionalmente debido a la no dependencia directa de juicio experto, aportando al resultado determinístico una cuantificación de la incertidumbre asociada a este. Respecto a las actividades en terreno y posterior modelación del manto nival, cabe destacar que se ha podido representar la condición de máxima acumulación nival en un periodo de tiempo considerable dada la extensión espacio - temporal del estudio, generando una representación histórica preliminar pero fundamental a la hora de desarrollar futura investigación relacionada a la evaluación y cuantificación de los recursos hídricos provenientes de cuencas cordilleranas de los Andes de Chile central.

TABLA DE CONTENIDOS	PAG.
1. INTRODUCCIÓN.	11
1.1. Introducción.	11
1.2. Objetivos del estudio.	12
1.3. Estructura del informe.	12
2. PRONÓSTICO DE CAUDALES DE DESHIELO.	14
2.1. Metodología propuesta para el pronóstico de caudales de deshielo.	14
2.2. Datos para la construcción del modelo de pronóstico de caudales de deshielo 2014 – 2015.	22
2.3. Evaluación del pronóstico de caudales de deshielo.	32
2.4. Resultados del pronóstico de caudales de deshielo propuesto para la temporada 2014 – 2015. Metodología de actualización al día 30 de Noviembre.	36
3. MUESTREO DEL EQUIVALENTE EN AGUA DE NIEVE EN TERRENO.	42
3.1. Metodología para la caracterización en terreno del manto nival.	42
3.2. Diseño de las campañas de terreno (2012 – 2014).	46
3.3. Cronograma de las campañas de terreno (2012 – 2014).	52
3.4. Observación de la densidad y temperatura del manto nival.	53
3.5. Estimación del equivalente en agua de nieve en terreno.	55
4. MODELACIÓN DISTRIBUIDA DEL EQUIVALENTE EN AGUA DE NIEVE PARA EL PERIODO DE DESHIELO.	63
4.1. Metodología para la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve para el periodo de deshielo.	63
4.2. Metodología para la estimación de información satelital MODIS en condición de cobertura nubosa.	67
4.3. Dominio de la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve.	70
4.4. Generación de forzantes meteorológicas distribuidas y cálculo de parámetros agregados.	72

4.5. Post - procesamiento de las imágenes satelitales MODIS de albedo - cobertura fraccional nival y temperatura superficial.	76
4.6. Resultados de la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve.	77
4.7. Validación de la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve.	82
5. ANALISIS DE LA RED NIVAL NECESARIA PARA CUANTIFICAR LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LOS ANDES DE CHILE CENTRAL.	89
5.1. Evaluación de la representatividad local de las estaciones nivométricas visitadas en 2012 - 2014.	89
5.2. Evaluación del estado actual y futura expansión en cobertura de la red nivométrica respecto a la capacidad predictiva del volumen total de deshielo.	92
5.3. Evaluación técnico - operacional de la medición nivométrica (estaciones nivométricas visitadas en 2012 - 2014).	109
5.4. Propuesta final para la ampliación y mejoramiento de la red nival necesaria para cuantificar los recursos hídricos.	112
6. CONCLUSIONES.	120
7. BIBLIOGRAFÍA.	122
8. ANEXOS.	126
8.1. Información de entrada para la construcción del pronóstico de caudales de deshielo (2014 - 2015). Resumen operacional y actualización al 30 de Noviembre.	126
8.2. Perfiles de densidad y temperatura nival (2012 - 2014).	133
8.3. Post - procesamiento de los productos satelitales MODIS.	140
8.4. Fotografías de las campañas de terreno (2012 - 2014).	145
8.5. Glosario de siglas y términos utilizados en este informe.	154

ÍNDICE DE TABLAS	PAG.
Tabla 2.1 - Cuenca a pronosticar en 2014 (cuencas pronosticadas por la DGA).	15
Tabla 2.2 .- Variables y estaciones consideradas en cada cluster para la generación de los predictores.	19
Tabla 2.3 .- Condiciones para la utilización del paso 5 y formula que para estimar el caudal medio mensual de Agosto.	21
Tabla 2.4 .- Vectores propios de la componente principal (vector principal).	24
Tabla 2.5a .- Parámetros de los modelos de regresión lineal múltiple óptimos sugeridos para el pronóstico de cada componente principal por cluster.	26
Tabla 2.5b .- Estadísticos de optimalidad de los modelos lineales propuestos.	26
Tabla 2.6 .- CDM para el VD por cuenca (para cada tipo de año hidrológico).	31
Tabla 2.7a .- Pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo temporada 2014 - 2015.	37
Tabla 2.7b .- Banda de incertidumbre estadística en términos de porcentaje del caudal medio mensual para el pronóstico 2014 - 2015.	37
Tabla 3.1a - f .- Caracterización cuenca piloto Cerro Vega Negra.	48 - 49
Tabla 3.2 .- Caracterización fisiográfica y presencia de cobertura vegetal (todas las cuencas piloto).	52
Tabla 3.3 .- Cronogramas de campañas de terreno (años 2012, 2013 y 2014) - días del mes por semana.	53
Tabla 3.4a - c .- Estadística de las calicatas realizadas.	54 - 55
Tabla 3.5 .- Resumen del muestreo de la altura nival - calicatas y respectiva estimación del equivalente en agua de nieve (valor promedio, desviación estándar y rango observado en terreno).	56
Tabla 3.6 .- Resumen del muestreo en términos de equivalente en agua de nieve respecto a la fisiografía muestreada y el número de puntos muestreados.	56
Tabla 4.1 .- Parámetro κ para diferentes tipos de especies vegetales (bosques).	67
Tabla 4.2a .- Resumen de variables y parámetros puntuales utilizados por cluster.	72
Tabla 4.2b .- Resumen de variables distribuidas utilizadas por cluster.	72
Tabla 4.3 .- Ajuste lineal por estación y cuenca para $T_a = m \cdot LST + n$. Los snow pillows son destacados.	74

Tabla 4.4. - Calibración del parámetro a_r según los registros de equivalente en agua de nieve máximos observados directamente en los snow-pillows (máximo entre el 15 de Agosto y el 15 de Septiembre).	76
Tabla 4.5. - Comparación de los resultados obtenidos en ambos esquemas de validación del SWE.	87
Tabla 5.1. - Resumen del equivalente en agua de nieve verdadero de terreno y los valores observados y registrados instrumentalmente en los snow pillos junto con los errores relativos asociados a la respuesta del terreno cercano.	90
Tabla 5.2. - R^2 SWE – VD para valores del SWE considerados por la DGA (superior). R^2 SWE – VD para valores modelados en 12 años de modelación.	94
Tabla 5.3a - b. Especificaciones instrumentos de estación nivométrica.	109 - 110
Tabla 5.3c. Especificaciones de dispositivos de control, energización, almacenamiento y transmisión.	110
Tabla 5.4. - Parámetros medidos por la red nivométrica actual de la DGA.	116
Tabla 5.5a- b. - Expansión de la cobertura espacial de la red nivométrica actual.	118
Tabla A1.1. - Volumen total de deshielo (VD) calculado (rellenado) para las 16 cuencas a pronosticar más las 2 cuencas auxiliares (cluster4).	126
Tabla A1.2a. - Componente principal calculada (histórica) y modelada (pronóstico).	127
Tabla A1.2b. - Predictores primarios históricos y para 2013, 2014.	128
Tabla A1.3. - Valores para la inicialización del pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo (años 2014- 2015) por cada cluster.	128
Tabla A1.4. - Variables utilizadas para construir los predictores de la componente principal del VD (pronóstico 2014 - 2015).	130
Tabla A1.5. - Actualización del pronóstico de caudales de deshielo (2014 - 2015).	132
Tabla A3.1. - Estaciones nivométrica actuales – coordenadas.	144
Tabla A3.2. - Datos para validación del modelo según el esquema de validación 1.	144

ÍNDICE DE FIGURAS	PAG.
Figura 1.1.- Esquema detallado de la estructura del presente estudio.	13
Figura 2.1.- (izquierda) agrupación final de los 16 (+2) cuencas incorporados a la metodología de pronóstico de caudales de deshielo medio mensual, (derecha) criterio de partición del conjunto de cuencas.	23
Figura 2.2.- Valores propios para cada cluster.	24
Figura 2.3.- Búsqueda del modelo de regresión lineal para la predicción de la componente principal de VD (óptimo para cada cluster) presentado como el ranking de GCV y los respectivos estadísticos asociados.	25
Figura 2.4.- Coeficiente de determinación para las correlaciones lineales individuales de cada predictor respecto al predictando $PC1_{VD_{cluster\ i}}^*$.	27
Figura 2.5a - b.- Verificación del modelo predictivo y su validación cruzada respecto a la serie de volúmenes total de deshielo histórico por cuenca (Copiapó a Mapocho).	28 - 29
Figura 2.6a.- Curvas de concentración (VD vs. probabilidad de excedencia) para las 16 cuencas a pronosticar. Se señala el rango para los tres tipos de años hidrológicos sugeridos.	30
Figura 2.6b.- Distribución general de caudales medios mensuales (promedio años 1990 al 2012).	32
Figura 2.7.- Comparación del efecto en el error introducido por la representación del VD vía componente principal y por el pronóstico de este predictando sintético.	33
Figura 2.8a.- Calidad de la predicción de la componente principal versus la componente principal histórica en términos de R^2 .	34
Figura 2.8b.- Histogramas de error relativo respecto al observado del caudal medio mensual pronosticado por la DGA y la Universidad de Chile en el periodo completo 1990 - 2012.	35
Figura 2.8c.- Histograma de error relativo respecto al observado VD pronosticado por la DGA y la Universidad de Chile en el periodo completo 1990 - 2012. Todas las cuencas.	35
Figura 2.9a - b.- Pronóstico de caudales de deshielo medios mensuales 2014 - 2015.	39 - 40
Figura 3.1a.- Mapa general de las cuencas estudiadas el año 2013 - 2014.	47
Figura 3.1b.- Cuenca piloto Cerro Vega Negra.	50
Figura 3.1c.- Cuenca piloto Ojos de Agua.	50

Figura 3.1d - Cuenca piloto Mardones.	50
Figura 3.1e - Sistema cuencas piloto Morales y Lo Valdez.	51
Figura 3.1f - Sistema cuencas piloto Olla Blanca DET y Río Blanco DET.	51
Figura 3.1g - Cuenca piloto Valle Hermoso.	51
Figura 3.2a - Campañas de terreno - Cerro Vega Negra - transectas.	57
Figura 3.2b - Campañas de terreno - Cerro Vega Negra - grilla entorno al SP.	58
Figura 3.2c - Campañas de terreno - Ojos de Agua - transectas.	58
Figura 3.2d - Campañas de terreno - Portillo - grilla entorno al SP.	59
Figura 3.2e - Campañas de terreno - Mardones- transectas.	59
Figura 3.2f - Campañas de terreno - Morales- transectas.	60
Figura 3.2g - Campañas de terreno - Laguna Negra - grilla entorno al SP.	60
Figura 3.2h - Campañas de terreno - Lo Valdez - transectas.	61
Figura 3.2i - Campañas de terreno - Río Blanco (DET) - transectas.	61
Figura 3.2j - Campañas de terreno - Olla Blanca - DET - transectas.	62
Figura 3.2k - Campañas de terreno - Valle Hermoso - transectas.	62
Figura 4.1 - Mapa general de las cuencas modeladas / pronosticadas (2013 - 2014).	71
Figura 4.2 - Series de tiempo de temperatura del aire y horas sol para las estaciones base consideradas en cada cluster.	73
Figura 4.3 - Acoplamiento de variables distribuidas en la modelación del SWE.	73
Figura 4.4 - Estimación del parámetro de flujo de energía turbulenta a_r .	75
Figura 4.5 - Calidad de la información satelital (días con información completa) en términos de porcentaje sobre el dominio temporal.	77
Figura 4.6a - b - Modelación distribuida del SWE (promedios del 1/9 al 15/9 - máxima acumulación).	78 - 79
Figura 4.6c - Comparación normalizada por cluster del SWE modelado (máxima acumulación) y el volumen de deshielo promedio para cada cluster (2001 - 2012).	80
Figura 4.6d - Series de tiempo del SWE promedio espacial y desviación estándar espacial por cluster.	81

Figura 4.6e. - Análisis de la representatividad espacial del SWE modelado respecto a la fisiografía.	81
Figura 4.7. - Explicación ejemplificada de los supuestos adoptados para la validación propuesta.	84
Figura 4.8a. - Visualización de la calidad de la modelación según el esquema de validación 1.	84
Figura 4.8b - c. -Validación por snow pillow de la modelación, esquema de validación 1.	85 - 86
Figura 4.9. - Validación vía terrenos de la modelación según el esquema de validación 2.	88
Figura 5.1. - Resumen de los errores relativos estimación puntual vs. local (píxel) observados en terreno.	90
Figura 5.2. - Distribuciones del muestreo en cada píxel evaluado.	91
Figura 5.3. - Capacidad predictiva del SWE modelado, estimado y observado en distintos snow pillow respecto al volumen total de deshielo.	93
Figura 5.4a - I. - Mapa de la herramienta R_{SWE-VD}^2 para el caso 12 años, 4 grupos significativos.	96 - 107
Figura 5.5. - Elevación mínima en función del equivalente en agua de nieve umbral mínimo en un escenario estándar año hidrológico tipo seco.	118
Figura 5.6. Ejemplo de disposición en planta de una estación nivométrica (básica o avanzada).	111
Figura A1.1. - Reelaboración del pronóstico para 2013 y comparación con la metodología anterior.	129
Figura A1.2. - Resumen operacional de la metodología de pronóstico de caudales de deshielo propuesta.	131
Figura A2.1a - g. - Perfiles de densidad nival (por estrato) y temperatura nival (graduado) para la cuencas piloto en estudio (círculos celestes representan estratos de hielo).	133 - 139
Figura A3.1a - b. - Estimación series de tiempo FSCA, ALBS.	140 - 141
Figura A3.1c - d. - Estimación series de tiempo LST.	142 - 143
Anexo de Fotografías de las Campañas de Terreno (selección).	145 - 153

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción.

El volumen máximo de agua contenido en el manto de nieve durante la temporada de acumulación nival es determinante en la generación de esorrentía disponible durante la temporada de deshielo. El conocimiento de esta variable permite realizar mejoras en la construcción, implementación y validación de modelos predictivos del volumen total o mensual de deshielo. A nivel regional, el estudio de la distribución espacial del equivalente en agua en algunas cuencas piloto contenidas en macro cuencas de la zona cordillerana de Chile central permitirá el estudio de los patrones de acumulación nival, necesario a la hora de modelar el manto nival y mejorar los pronósticos de volúmenes de deshielo mensuales especialmente en años extremos. Retroactivamente, el conocimiento generado por el estudio del proceso de acumulación y derretimiento del manto nival puede ser usado para identificar oportunidades de mejora en la actual red de monitoreo nival tanto en cobertura espacial como en la metodología de medición utilizada en la actualidad. Mejorando la red de monitoreo nival será posible incrementar la calidad de la modelación histórica y de los modelos predictivos del caudal de deshielo a utilizar en el futuro.

En el marco del proyecto "ANÁLISIS DE LA RED NIVAL NECESARIA PARA CUANTIFICAR LOS RECURSOS HÍDRICOS, ETAPA II", se presenta el informe final que constituye la consolidación del trabajo en terreno y gabinete realizado en 2013 y 2014 (apoyado con datos de terreno de 2012). Las actividades realizadas en este estudio contemplan cuatro líneas de trabajo. En primer lugar se presenta una propuesta metodológica de pronóstico de caudales de deshielo medio mensual alternativa a la utilizada por la Dirección General de Aguas en la actualidad. En segundo lugar se muestra el análisis de la condición nival en terreno y los patrones de acumulación nival observados en las cuencas muestreadas. En tercer lugar se presenta la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve a modo de generar un producto útil tanto para la verificación de la representatividad de las estaciones nivométricas actuales así como para la extensión de la red nivométrica entre las cuencas del río Copiapó y Bio Bío. Finalmente, se presenta el análisis global de los requerimientos de la red nival necesaria para cuantificar los recursos hídricos provenientes de zonas montañosas. El propósito último de este análisis apunta a la proposición de mejoras en cuanto a la metodología de las mediciones nivométricas, determinando ubicaciones para nuevas estaciones de control, incorporando los nuevos parámetros que sean necesarios a la hora de conocer con mayor precisión la cantidad de agua contenida en el manto nival, tanto en su distribución espacial como temporal. La información futura que aporte la ampliación de la actual red de medición será de gran utilidad para realizar los diversos estudios que requieren los usuarios de recursos hídricos como sistema, entre los que se cuentan como los productos de mayor importancia, los pronósticos del volumen de deshielo mensuales para el periodo Septiembre – Marzo.

1.2. Objetivos del estudio.

El objetivo general de este estudio comprende el análisis de la red nival necesaria para cuantificar los recursos hídricos provenientes de cuencas de régimen nival o nivo-pluvial en los Andes de Chile central a modo de reforzar los predictores que determinan los modelos de pronóstico de deshielo realizados por la Dirección General de Aguas. Este análisis involucra la evaluación de la condición actual de la red, una propuesta de mejoras en cuanto a instrumentalización, metodologías de medición en terreno, modelación del manto nival, localización de estaciones nivométricas y pronóstico de caudales de deshielo a nivel mensual. Los objetivos específicos de este estudio comprenden:

- Proponer una metodología alternativa para el pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo que considere un pronóstico determinístico y una banda de incertidumbre asociada a este.
- Modelar el equivalente en agua de nieve de manera distribuida en el espacio - tiempo a escala regional, incorporando información satelital, a modo entender el proceso de derretimiento y poder establecer zonas de medición que aporten información para el pronóstico de volumen de deshielo. Esto deberá ser validado con los patrones de acumulación observados en terreno.
- Analizar la situación actual de la red nival y generar una propuesta técnica en base a la modelación desarrollada en este estudio que satisfaga los requerimientos mínimos para una correcta cuantificación de los recursos hídricos de cuencas nivales y nivo-pluviales de los Andes de Chile central.

1.3. Estructura del informe.

El presente informe se divide en cuatro partes. Estas son (1) presentación de la metodología y resultados del pronóstico de caudales medios mensuales para la temporada de deshielo 2014 - 2015, (2) presentación de los trabajos en terreno temporadas 2013 - 2014 y los análisis respectivos, (3) presentación de la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve y validación del modelo distribuido, (4) análisis de la red nival propiamente tal en donde se integran los resultados de las partes anteriores tales como la representatividad local de las estaciones visitadas y, la generación y utilización de la herramienta para evaluar futuras ubicaciones. Estos contenidos derivan finalmente en el capítulo de conclusiones generales que apuntan de manera global a los temas tratados en este estudio.

En la **Figura 1.1** se presenta un esquema de la estructura del informe y actividades asociadas al trabajo realizado en este estudio. Además, se sugiere revisar el glosario de siglas y términos utilizados en este informe para ver y seguir la terminología utilizada (**Anexos**).

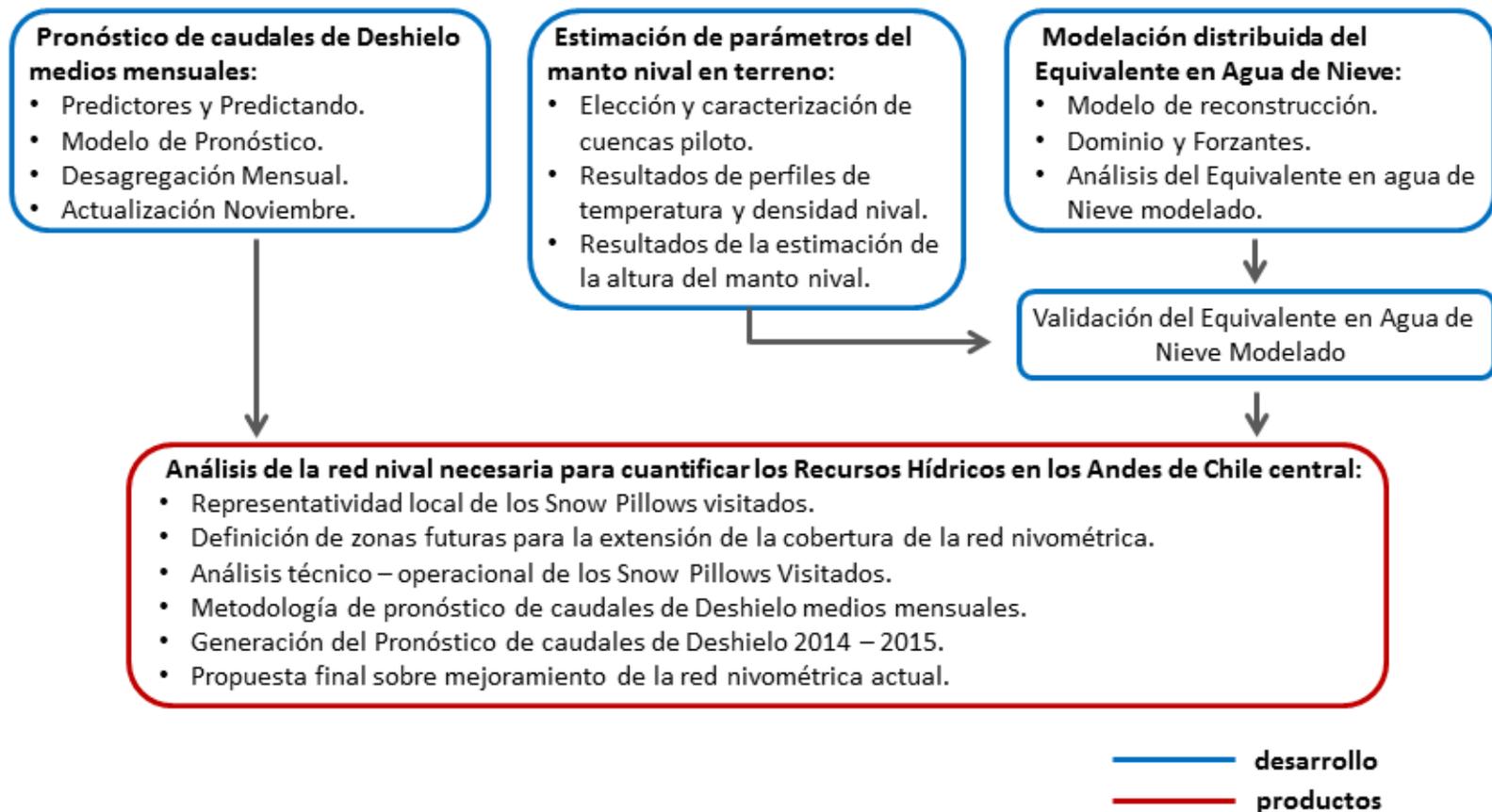


Figura 1.1.- Esquema detallado de la estructura del presente estudio.

2. PRONÓSTICO DE CAUDALES DE DEHIELO.

Dentro de los objetivos de este estudio está el de presentar un pronóstico de caudales de deshielo a escala mensual para las temporadas de deshielo 2013 – 2014 y 2014 – 2015. En 2013 se presentó una metodología preliminar para el pronóstico de las cuencas Grande en Las Ramadas, Aconcagua en Chacabuquito, Mapocho en Los Almendros, Maipo en el Manzano y Cachapoal 5 Km. aguas abajo del río Cortaderal. En esta oportunidad se presenta una metodología mejorada para el pronóstico de caudales de deshielo por aplicar en los 16 controles fluviométricos que la Dirección General de Aguas (DGA) pronostica actualmente (año 2014) entre Copiapó y Ñuble (**Tabla 2.1**). La metodología de pronóstico desarrollada hace mínimo uso de juicio experto, y como tal es fundamentalmente automatizable y objetiva. No obstante, se realiza una comparación histórica entre los pronósticos entregados por la DGA y el pronóstico presentado (Universidad de Chile) para el periodo histórico concurrente a modo de evaluar la calidad y aplicabilidad de este último.

2.1. Metodología propuesta para el pronóstico de caudales de deshielo.

La metodología propuesta para la temporada de deshielo 2014- 2015 se basa en tres puntos fundamentales:

- Se agrupan las cuencas a pronosticar de manera de entender el comportamiento del volumen total de deshielo (VD) a nivel de zonas hidro-climáticas. Se modela la relación entre predictores y el volumen de deshielo para cada grupo de cuencas.
- Se asocian curvas de desagregación mensual del caudal de deshielo (CDM) para años tipo húmedo, normal y seco. Estas curvas son particulares para cada cuenca a pronosticar.
- El pronóstico presentado es en esencia un resultado determinístico. Sin embargo se desarrolla paralelamente un enfoque estocástico a modo de definir una banda de confianza del pronóstico basado en la varianza del error de construcción del modelo y homologable a la probabilidad de excedencia propia de la curva de duración de cada cuenca.

Es importante tener en cuenta que la variable pronosticada (dependiente) es la primera componente principal del volumen total de deshielo entre Septiembre y Marzo (VD) de cada cluster (grupo) de cuencas. Esta variable es explicada por distintos predictores de carácter hidro-climático representativos de la zona hidro-climática a la que la cuenca a pronosticar pertenece. Luego, el VD pronosticado se desagrega mensualmente y se calcula la probabilidad de excedencia para el volumen total de deshielo. Para la construcción del modelo se considera una ventana reciente entre el año 1990 y 2012 (años históricos) dejando el año 2013 y 2014 como años de rectificación del pronóstico (2013) y nuevo pronóstico (2014). Cabe destacar que la

elección de la ventana temporal para la calibración y validación del modelo (1990 - 2012) asegura un amplio rango de condiciones hidrológicas. A continuación se presenta la metodología para el pronóstico de caudales de deshielo propuesto para la temporada de deshielo 2014 – 2013 en un formato secuencial.

Tabla 2.1- Cuenca a pronosticar en 2014 (cuencas pronosticadas por la DGA).

Cuencas a pronosticar	UTM		ÁREA [Km ²]
	Norte	Este	
Copiapó en Pastillo	6902003	403953	7467
Huasco en Algodones	6820936	352863	7176
Elqui en Algarrobal	6680678	346953	5708
Grande en Las Ramadas	6568032	349067	702
Choapa en Cuncumén	6462149	349333	1116
Putauendo en Resguardo Los Patos	6402855	351466	893
Aconcagua en Chacabuquito	6363193	358765	2112
Mapocho en Los Almendros	6306723	365032	638
Colorado antes de junta Maipo	6282743	373154	1656
Maipo en El Manzano	6282019	372029	4836
Cachapoal en Puente Termas (reg. natural)	6209014	355740	2455
Claro en Hacienda Las Nieves	6181949	343657	251
Tinguiririca bajo Los Briones	6156642	332735	1784
Teno después de junta Claro	6125874	333854	1208
Maule en Armerillo (reg. natural)	6046588	308762	5465
Ñuble en San Fabián	5949759	271396	1659
Longaví en El Castillo	5984768	289785	477
Diguillín en San Lorenzo	5910893	270063	215

***Notar que para simplificar la notación las cuencas serán denominadas por el río principal.**

**** Las últimas dos cuencas son cuencas auxiliares para la robustez de la agrupación propuesta.**

Paso 1: Agrupación de las cuencas a pronosticar por zonas hidro-climáticas según la respuesta hidrológica en términos del VD.

El análisis preliminar de las series históricas de volúmenes de deshielo muestra que grupos de cuencas presentan respuestas hidrológicas estacionales típicamente de manera similar. Con el fin de reflejar este hecho, y de modo de reducir el costo computacional del análisis, las cuencas en estudio se agrupan utilizando la técnica de "clustering" (**Rubio-Alvarez y McPhee, 2010**). Los *clusters* de cuencas definidos serán tratados en esta metodología como grupos independientes. La agrupación se realiza con los VD históricos, definiendo este conjunto de datos para la construcción del pronóstico. Esta agrupación se realiza bajo el algoritmo jerárquico tipo "ward" con una definición euclidiana de la distancia entre los elementos.

La técnica jerárquica tipo "ward" utiliza la suma de los cuadrados incrementales; es decir, el aumento total de la suma de los cuadrados de las distancias euclidianas topológicas de los VD dentro de cada cluster como resultado de la unión de dos clusters distintos. La suma de cuadrados dentro del cluster se define como la suma de los cuadrados de las distancias entre todos los objetos en el cluster y el centroide del cluster. La distancia equivalente es:

$$d_{r,s}^2 = n_r n_s \frac{\|\overline{VD}_r - \overline{VD}_s\|_2^2}{(n_r + n_s)} \quad [2.1]$$

Donde $\|x\|_2$ corresponde a la norma euclidiana y n_r y n_s son el número de elementos de los dos clusters (particiones aleatorias) analizados. La disposición total que minimice las distancias indicará el número de clusters y los elementos (cuencas) dentro de cada uno de estos clusters.

Paso 2: Reducción de la dimensión del problema del pronóstico del VD.

A continuación se simplifica dimensionalmente el problema a modo de generar un *predictando* (es decir, la variable que es pronosticada mediante un modelo basado en predictores conocidos) único para cada cluster. Esto se realiza mediante el análisis de componentes principales (PCA) el cual se describe a continuación. Esta metodología se basa parcialmente en el trabajo de **Mendoza et al. (2014)**; **Moradkhani y Meier (2010)**.

En primer lugar, se define la matriz $VD_{y \times nr}$ como la matriz que contiene los VD para las cuencas (nr columnas) contenidas en cada cluster durante los 23 años observados (y filas). Luego, se estandariza la matriz $VD_{y \times nr}$ restando el promedio (μ_{VD}) y dividiendo por la desviación estándar (σ_{VD}) para cada columna. Se obtiene entonces la matriz estandarizada de datos $\widetilde{VD}_{y \times nr}$ como:

$$\widetilde{VD}_{y \times nr} = (VD_{y \times nr} - \mu_{VD_r}) / \sigma_{VD_r} \quad \forall r \quad [2.2]$$

En segundo lugar, mediante la metodología de "*principal component analysis*" (PCA) se calcula la matriz de vectores propios $VP_{nr \times nr}$ que indica los vectores directores necesarios para rotar algebraicamente el sistema $\widetilde{VD}_{y \times nr}$ a modo de disminuir la varianza conjunta encontrada en el nuevo espacio vectorial rotado. Simultáneamente, se obtiene el vector de valores propios $EV_{r \times 1}$ que mostrará de manera ordenada el grado de explicación de la varianza de cada vector propio encontrado. Valores similares del vector propio de mayor grado de explicación de la varianza – vector principal para las r cuencas del cluster indican que el cluster está bien definido.

En tercer lugar, se reduce dimensionalmente el problema en función del grado de explicación de la varianza de cada vector propio. El vector propio con mayor valor propio asociado será la *componente principal* ($PC1_{VD_{cluster_i}}$) del cluster. Si una componente generada por el análisis PCA tiene un grado de explicación de la varianza mayor al 90% se considera como suficiente para explicar el modo principal de variación del VD (es decir, su componente principal). De esta manera, para la componente principal definida por la primera fila de la matriz de vectores propios ($VP_{1 \times nr}$ - denominada también vector principal) se tiene:

$$VD^{PC1}_{y \times nr} = (PC1_{VD_{cluster_i}} \cdot VP_{nr \times 1}) \sigma_{VD_{nr1 \times nr}} + \mu_{VD_{nr1 \times nr}} \quad [2.3]$$

Donde $VD^{PC1}_{y \times nr}$ corresponde al volumen total de deshielo generado del análisis PCA considerando solo la componente principal $PC1_{VD_{cluster_i}}$. Notar que en realidad lo que se propone en esta metodología es pronosticar las componentes principales encontradas para cada cluster y después des-estandarizar la serie de predictandos sintéticos para obtener los volúmenes de deshielo pronosticados.

Paso 3: Construcción del pronóstico del término $PC1_{VD_r}$ y elección del modelo lineal multivariable óptimo.

El pronóstico de caudales de deshielo a nivel mensual que se propone es de tipo estadístico, es decir, no requiere de una modelación hidrológica físico - conceptual del periodo de acumulación nival (Abril a Agosto). En este caso se utilizará un esquema de regresión lineal multivariable o regresión lineal múltiple que es calibrada para cada cluster considerando (1) el predictando - componente principal del volumen total de deshielo y (2) los predictores hidro-climáticos, primarios y secundarios, definidos a continuación.

Los predictores primarios ($X1_{y \times 4}$) considerados son (1) el índice de precipitación acumulada en el periodo Abril - Agosto (IPP_{48}) calculado como el promedio de la precipitación acumulada para las estaciones asociadas a cada cluster, (2) el caudal medio mensual de Agosto (también denominado *antecedente* - Q_8) calculado como el promedio del caudal medio mensual de Agosto para las estaciones dentro de cada cluster, (3) el equivalente en agua de nieve máximo al 31 de Agosto presentado en el "Pronóstico de Disponibilidad de Agua" (SWE_{PDA}) calculado como el promedio de las rutas de nieve consideradas en cada cluster y (4) el Índice de Oscilación del sur promedio entre Marzo y Agosto transformado (SOI_{38}) el cual corresponde a una transformación algebraica del valor entregado por el Climate Prediction Center de la agencia NOAA* en formato estandarizado. Esta variable se utiliza de manera transformada para incrementar el nivel de predictibilidad de la componente principal (relación empírica):

$$SOI_{38} = 1/\exp(SOI_{38 \text{ data}}^3) \quad [2.4]$$

Los datos originales de este índice ($SOI_{38 \text{ data}}$) pueden ser descargados en el sitio web <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi> con un periodo de latencia de actualización de 10 días finalizado el mes (NASA).

Los predictores secundarios considerados serán los productos de los predictores primarios sin considerar los productos cuadráticos. Esto último garantiza el grado 1 del modelo (lineal) ($X2_{y \times 6}$). Considerando estos 10 predictores y la factibilidad al momento de obtener los datos en tiempo real en la última semana de Agosto (asegurando de esta manera el carácter operacional del pronóstico) se procede a elegir el mejor modelo posible en función de la minimización del error predictivo. Las

estaciones consideradas para la generación de cada predictor se presentan en la **Tabla 2.2**. El modelo propuesto a priori (sin optimizar la selección de predictores) y la recuperación del VD pronosticado se pueden enunciar finalmente como:

$$PC1_{VD_{cluster\ i}}^* = \sum_{i=1}^4 X1_i p1_i + \sum_{i=1}^6 X2_i p2_i + p_0 \quad [2.5]$$

$$VD^{PC1}_{y \times nr}^* = (PC1_{VD_{cluster\ i}}^* \cdot VP_{nr \times 1}) \sigma_{VD_{nr1 \times nr}} + \mu_{VD_{nr1 \times nr}} \quad [2.6]$$

Donde $PC1_{VD_{cluster\ i}}^*$ corresponde a la componente principal pronosticada para cada cluster, $VD^{PC1}_{y \times nr}^*$ corresponde al volumen total de deshielo pronosticado y, $p1$ y $p2$ son los parámetros de la regresión lineal multivariable entregados tras el ajuste.

Tras esto, es necesario encontrar el conjunto optimo de predictores (y, por lo tanto, parámetros) para cada cluster de manera de asegurar (1) mayor correlación lineal, (2) menor error estándar, (3) robustez predictiva (validación cruzada) y (4) eliminar el sobreajuste de los predictores en el modelo lineal. Para asegurar la inexistencia de sobreajuste se procede a eliminar los pares de predictores que presenten un coeficiente de determinación mútuo $R^2 > 0.7$. Luego, para asegurar la parsimonia del modelo y evitar el sobreajuste se calcula el estadístico de Akaike para conjuntos muestrales reducidos ($y \leq 40$) según:

$$AICc = 2 \ln \left(\frac{RSS}{y} \right) + 2p + \frac{2p(p+1)}{y-p-1} \quad [2.7]$$

Donde $RSS = \sum_{i=1}^y e_i^2 = \sum_{i=1}^y (PC1_{VD_{cluster\ i}}^* - PC1_{VD_{cluster\ i}})^2$ corresponde a la suma del cuadrado de los residuales de la componente principal modelada para todos los años, "y" corresponde al número total de años y p corresponde al número total de parámetros del modelo analizado. Valores mínimos del AICc para los datos históricos aseguran parsimonia y reducción del efecto de sobreajuste del modelo. Para asegurar una validación cruzada aceptable, es decir, que el modelo sea robusto a la hora de predecir un año distinto a los años utilizados en la construcción del modelo lineal óptimo, se calcula el estadístico GCV (índice generalizado de validación cruzada - **Mendoza et al., 2014**) el cual indica el nivel de error de la validación cruzada para la calibración del modelo de regresión lineal múltiple. Este se formula como:

$$GCV(k) = \frac{\sum_{i=1}^y (e_i^2 / y)}{(1 - p/y)^2} \quad [2.8]$$

Donde e_i^2 corresponde al residual del modelo en el año i-ésimo del conjunto de datos históricos. Por último se evalúa la capacidad predictiva del modelo lineal con el coeficiente de determinación R^2 entre la componente principal generada y la modelada

para los datos históricos y la desviación del error (σ_e) el cual minimiza el sesgo. σ_e se define como:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^y e_i^2}{n - (p + 1)}} \quad [2.9]$$

Se propone como función objetivo la minimización del GCV, realizando un ranking sobre todos los modelos factibles por cluster (1024 modelos que corresponden a la combinatoria total de los 10 predictores) y eligiendo aquellos que tengan menor GCV pero que además, verifiquen que la combinación de predictores evite el sobreajuste (AICc bajo, R^2 entre predictores menor a 0.7), muestre una alta capacidad predictiva (R^2 entre componente principal histórica y modelada alta) y tengan un error reducido (σ_e bajo) (**Mendoza et al., 2014**). Notar que en la **Tabla 2.2**, las estaciones consideradas presentan el mejor grado de correlación particular respecto a la componente principal y/o un registro de datos completo y amplio entre 1990 y 2012. Cabe destacar que arbitrariamente se consideraron tantas estaciones con datos pluviométricos como cuencas contiene cada cluster (excepto el cluster 4 en el que se consideró una estación más).

Tabla 2.2.- Variables y estaciones consideradas en cada cluster para la generación de los predictores.

	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4
	Fuente de información para la generación de predictando (PC1 y PC2)			
VD	Copiapó - Pastillo Huasco - Algodones Elqui - Algarrobal Grande - Ramadas	Choapa - Cuncumén Putaendo - Patos Aconcagua - Chacab. Mapocho - Almendr. Colorado - Maipo Maipo - Manzano Cachapoal - Termas	Claro - Nieves Tinguiririca. - Briones Teno - Junta Claro Maule - Armerillo	Ñuble - San Fabián Longaví - Castillo Diguillín - San Lorenzo
	Fuente de información para la generación de predictores (PRIMARIOS)			
IPP₄₈	Iglesia Colorada Conay Monte Grande Las Ramadas	La Mostaza Riecillos Vilcuya Cerro Calán Antupirén San José Retén Rancagua (Cachap.)	San Fernando La Rufina Potrero Grande Vílchez Alto	Las Trancas San Fabián
Q₈	Copiapó - Pastillo Huasco - Algodones Elqui - Algarrobal Grande - Ramadas	Choapa - Cuncumén Putaendo - Patos Aconcagua - Chacab. Mapocho - Almendr. Colorado - Maipo Maipo - Manzano Cachapoal - Termas	Claro - Nieves Tinguiririca. - Briones Teno - Junta Claro Maule - Armerillo	Ñuble - San Fabián Longaví - Castillo Diguillín - San Lorenzo
SWE_{PDA}	Quebrada Larga	Portillo Laguna Negra	Lo Aguirre	Volcán Chillán
SOI₃₈	climático	climático	climático	climático

Paso 4: Desagregación mensual del volumen total de deshielo pronosticado.

Paralelamente, se procede a definir una técnica para la desagregación mensual (Septiembre a Marzo) del volumen total de deshielo VD pronosticado (designaremos como VD^{PC1*} al volumen total de deshielo pronosticado). Para esto se clasifican los años hidrológicos en años secos, húmedos y normales (de acuerdo al VD) promediando una curva porcentual de desagregación del VD para los años que se ajusten a cada condición hidrológica. Los valores umbrales para esta clasificación de la condición hidrológica adoptados son: bajo 66% (seco), entre 33% y 66% (normal) y sobre 33% (húmedo). Estos umbrales son calculados en base a la curva de duración del VD propia de cada cuenca, elaborada con datos entre los años 1980 y 2012.

Paso 5: Incorporación del caudal antecedente (Q_8) como variable de actualización para el escalamiento del VD pronosticados de probabilidad de excedencia alta.

Tras pronosticar el VD y desagregarlo mensualmente se procede a realizar una inspección visual de los caudales medios mensuales pronosticados en la ventana histórica. En algunos casos se hace evidente la necesidad de incorporar un factor de escalamiento del volumen pronosticado (corrección) basado en el conocimiento paralelo del caudal en Agosto justo antes de inicializar el pronóstico. Para esto se propone un esquema de actualización del caudal medio mensual de Agosto en base a la ganancia de Kalman univariable. Este esquema explicado a continuación solo se aplica para *cierto tipo de años hidrológicos y ciertas cuencas* (**Tabla 2.3**).

Este paso pretende escalar el VD pronosticado para el periodo Septiembre a Marzo (VD^{PC1*}) dado que se conoce a priori el valor del caudal medio mensual de Agosto en cada cuenca. Este escalamiento se aplica a cada caudal medio mensual por igual. Primero, se requiere predecir el caudal medio mensual de Agosto lo cual se realiza con un ajuste simple utilizando como predictor el VD pronosticado. La función (f_x) que asocia $Q_{agosto\ modelado}$ con VD^{PC1*} se presenta a en la **Tabla 2.3**, ajuste que tendrá una varianza del error asociada (σ_f^2). Paralelamente, cada caudal antecedente tiene una varianza del error de medición supuesta como el 5% del caudal promedio de cada año pronosticado (no observado, debido a que para el pronóstico de 2014 se requiere el volumen total de deshielo). Luego se calcula la ganancia de Kalman como:

$$K = \frac{\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sigma_{obs.}^2} \quad [2.10]$$

Luego, se procede a la etapa de actualización del caudal medio mensual de agosto mediante la siguiente expresión:

$$Q_{agosto\ actualizado} = Q_{agosto\ modelado} + K(Q_{agosto\ obs.} - Q_{agosto\ modelado}) \quad [2.11]$$

Definiendo el error entre el caudal medio mensual de agosto modelado y actualizado como la razón entre estos (factor φ), podremos extender dicha actualización como un escalamiento (corrección) de VD^{PC1*} como:

$$VD^{PC1*}_{escalado} = \varphi VD^{PC1*} \quad \text{donde} \quad \varphi = \frac{Q_{agosto \text{ actualizado}}}{Q_{agosto \text{ modelado}}} \quad [2.12]$$

En el caso que el año hidrológico no corresponda al expuesto en la **Tabla 2.3** se sugiere no utilizar este paso. En términos prácticos esto implica que $\varphi = 1$. Además, se impone como valor máximo y mínimo de la actualización los valores 0.5 y 1.5.

Tabla 2.3.- Condiciones para la utilización del paso 5 y formula que para estimar el caudal medio mensual de Agosto.

Cuenca	Tipo de f_x	a	b	R^2	σ_f	Utilizar φ ?
Copiapó en Pastillo	$y=a*\ln(x)+b$	0.859	-0.982	0.36	0.439	Año Normal
Huasco en Algodones	$y=a(x)+b$	0.017	3.315	0.78	1.527	No
Elqui en Algarrobal	$y=a*\ln(x)+b$	4.360	14.480	0.72	1.745	Año Seco
Grande en Las Ramadas	$y=a(x)+b$	0.021	1.037	0.80	0.736	Año Seco
Choapa en Cuncumén	$y=a(x)+b$	0.015	1.906	0.71	1.427	Año Seco
Putando en Resguardo Los Patos	$y=a(x)+b$	0.020	0.873	0.83	1.226	No
Aconcagua en Chacabuquito	$y=a(x)+b$	0.017	1.519	0.94	1.868	No
Mapocho en Los Almendros	$y=a(x)+b$	0.052	-1.319	0.78	1.921	Año Normal
Colorado antes de junta Maipo	$y=a(x)+b$	0.020	1.190	0.64	2.837	No
Maipo en El Manzano	$y=a(x)+b$	0.017	17.827	0.74	9.779	No
Cachapoal en Puente Termas (reg. natural)	$y=a(x)+b$	0.041	37.010	0.71	18.651	No
Claro en Hacienda Las Nieves	$y=a*\exp(bx)$	1.021	0.012	0.63	7.012	No
Tinguiririca bajo Los Briones	$y=a*\exp(bx)$	4.619	0.002	0.75	12.645	No
Teno después de junta Claro	$y=a*\exp(bx)$	11.467	0.001	0.73	17.457	No
Maule en Armerillo (reg. natural)	$y=a*\exp(bx)$	60.257	0.000	0.69	77.037	No
Ñuble en San Fabián	$y=a*\exp(bx)$	23.584	0.001	0.44	36.878	No

Paso 6: Generación de bandas de incertidumbre asociadas a la predicción del caudal medio mensual.

Es posible generar series aleatorias el VD pronosticado tras generar un conjunto de distribución Normal para $PC1_{VD_{cluster_i}}$ de media cero y desviación estándar igual a la desviación estándar del error σ_e (**Mendoza et al., 2014**). De esta manera, generando un conjunto con " $n \approx 10000$ " miembros se tendrán " n " VD por cuenca y año. Luego, dado que la variable aleatoria generada de distribución Normal cumple con propiedades de linealidad es posible advertir que el conjunto de VD es también Normal con desviación estándar igual a $\sigma_{ensamble\ VD}^2$. Para un nivel de confianza dado ($x\%$) expresado en porcentaje es posible calcular un intervalo de confianza del VD de la forma:

$$VD^{PC1*}_{escalado}(x_{\%}) = VD^{PC1*}_{escalado} + N(x_{\%}, 0, \sigma^2_{ensamble VD}) \quad [2.13]$$

Se decide trabajar con dos intervalos de confianza. El primero al 95% - 5% es el valor comúnmente utilizado en la literatura. Se propone además la utilización de una confianza del 80% - 20% a modo de entregar una banda más cercana al valor esperado entregado por lo métodos de multiregresión lineal explicados anteriormente (enfoque determinístico). Se dirá que el pronóstico para las temporadas 2013 - 2014 y 2014 - 2015 es aceptable si la serie de caudales medios mensuales de deshielo se encuentra contenida por la banda del 80% - 20% y medianamente aceptable si se encuentra contenida por la banda del 95% - 5%. Recordar que por tratarse de bandas derivadas de un conjunto aleatorio el ancho de cada banda (en unidades de caudal) variará en cada cuenca y año. Mensualmente se aplica un ancho de banda proporcional según la curva de desagregación mensual.

2.2. Datos para la construcción del modelo de pronóstico de caudales de deshielo 2014 – 2015.

Se presentan a continuación los datos utilizados para el cálculo de los volúmenes total de deshielo, la agrupación de estos, las componentes principales obtenidas junto con los vectores propios y valores propios y los predictores utilizados para la construcción del modelo predictivo junto con los modelos predictivos óptimos a utilizar para cada cluster, las curvas de desagregación mensual del VD, la generación de bandas de incertidumbre y los resultados de la validación cruzada generada. Además, se presentará de forma ordenada el desarrollo de las partes anteriormente mencionadas.

Cálculo del volumen total de deshielo (VD).

El cálculo del volumen total de deshielo se realiza para las cuencas listadas en la **Tabla 2.1** y para dos cuencas auxiliares (Longaví en El Castillo, Diguillín en San Lorenzo) a modo de tener una representación robusta de la zona hidro-meteorológica al sur del río Maule. Previamente al cálculo de los VD se rellena la información de caudales medios mensuales con correlaciones simples con otras estaciones cercanas. Tras esto se calcula VD como:

$$VD [MMm^3] = \left(\sum_{i=1}^{7 (mar)} Q_{mm i} \right) \times \frac{86400 \times 30.5}{1000000} \quad [2.14]$$

Donde $Q_{mm i}$ corresponde al caudal medio mensual de de cada mes de la temporada de deshielo. Los VD se presentan en la **Tabla A1.1 (Anexos)**. En el caso de las cuencas Cachapoal en Puente Termas y Maule en Armerillo se necesita reconstruir el régimen natural. Esta reconstrucción es proporcionada directamente por la DGA.

Agrupación de las cuencas a pronosticar según el VD calculado.

Para la agrupación se utilizan en primera instancia las 16 cuencas a pronosticar considerando los VD entre los años 1990 y 2012. Los resultados preliminares muestran que el conjunto de cuencas se divide en cuatro clusters quedando solo el río Ñuble en San Fabián en el cuarto cluster. Dado que no tiene sentido un cluster de un elemento en la metodología de PCA, se decide incorporar las cuencas Longaví en El Castillo y Diguillín en San Lorenzo que tras rehacer la agrupación conforman parte del cuarto cluster. En la **Figura 2.1** se presenta el diagrama de agrupación final (**Rubio-Álvarez y McPhee, 2010**) para el VD entre 1990 y 2012 incorporando las 18 cuencas. Se proponen cuatro clusters los cuales definiremos como CLUSTER1 (norte), CLUSTER2 (centro norte), CLUSTER3 (centro sur) y CLUSTER4 (sur). El criterio de agrupación viene dado por la distancia óptima que se puede apreciar como un cambio en la pendiente entre la distancia entre grupos y la cantidad de elementos agrupados (**Figura 2.1**). Si bien esta figura muestra cinco clusters como la agrupación óptima, es claro que el comportamiento anual del VD de Maule en Armerillo se asimila al de las cuencas del cluster 3.

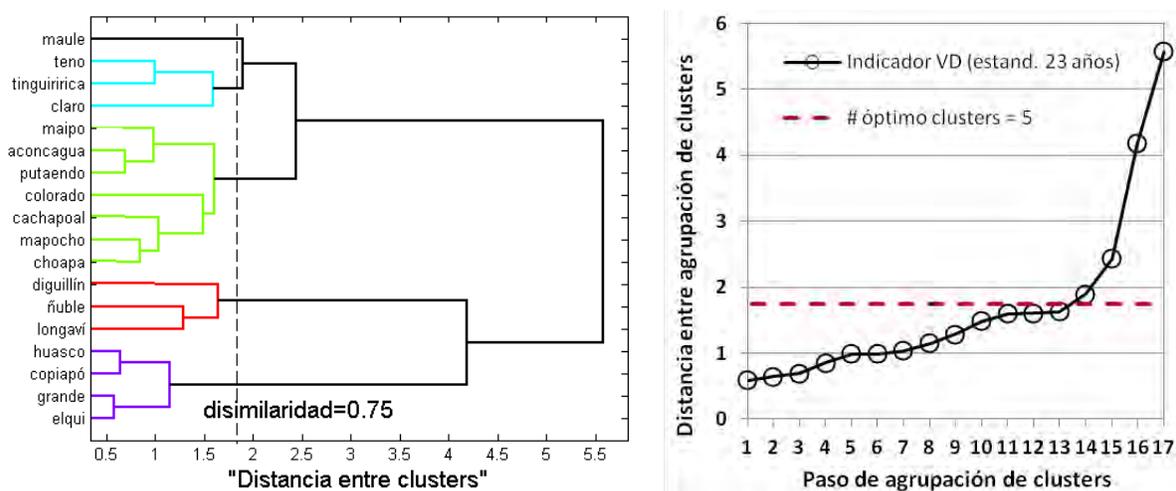


Figura 2.1.- (izquierda) agrupación final de los 16 (+2) cuencas incorporados a la metodología de pronóstico de caudales de deshielo medio mensual, (derecha) criterio de partición del conjunto de cuencas.

Generación del predictando sintético (componente principal), vectores propios asociados y valores propios (grado de explicación de la varianza).

Se presenta en la **Tabla A1.2a (Anexos)** la generación de la componente principal de VD histórica y pronosticada. Los valores de las filas correspondientes a los años 2013 y 2014 son utilizados para generar los pronósticos de los dichos años. En la **Tabla 2.4** se presentan los vectores propios para la componente principal de cada cluster (vectores principales). En la **Figura 2.2** se muestra la evolución de los valores propios sobre el número de componentes del análisis PCA. Para todos los clusters es claro que la primera componente (componente principal) explica sobre el 90% de la varianza del

volumen total de deshielo histórico. Esto implica que basta con considerar la componente principal como predictando. Las demás componentes del análisis PCA son consideradas como ruido de la reducción dimensional del problema. En otras palabras, cada cluster tiene un modo general en que el volumen total de deshielo se comporta año a año con un pequeño ruido asociado a las características propias de cada cuenca del cluster en cuestión. Los predictores primarios utilizados para generar $PC1_{VD_{cluster i}}$ se presentan en la **Tabla A1.2b (Anexos)** Los predictores secundarios (productos entre los primarios) se desprenden de los primeros.

Tabla 2.4.- Vectores propios de la componente principal (vector principal).

Cuencas	Vectores propios (vector principal)
Copiapó en Pastillo	0.498
Huasco en Algodones	0.501
Elqui en Algarrobal	0.509
Grande en Las Ramadas	0.488
Choapa en Cuncumén	0.379
Putando en Resguardo Los Patos	0.375
Aconcagua en Chacabuquito	0.385
Mapocho en Los Almendros	0.377
Colorado antes de junta Maipo	0.372
Maipo en El Manzano	0.383
Cachapoal en Puente Termas (reg. natural)	0.376
Claro en Hacienda Las Nieves	0.492
Tinguiririca bajo Los Briones	0.501
Teno después de junta Claro	0.510
Maule en Armerillo (reg. natural)	0.498
Ñuble en San Fabián	0.574

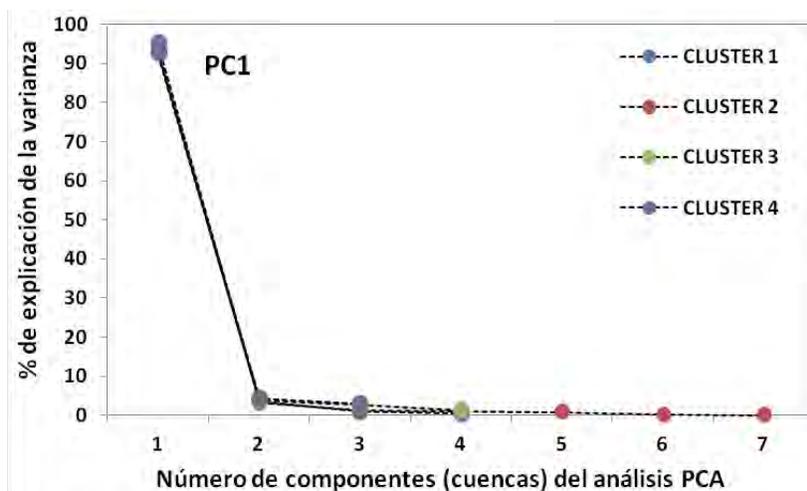


Figura 2.2.- Valores propios para cada cluster.

Elección de un conjunto de modelos predictivos óptimos (regresión lineal multivariada).

Como se explicó anteriormente, se procede a calcular el indicador GCV y realizar el ranking de los valores obtenidos para los 1024 modelos posibles por cluster. Tras esto se procede a realizar un ranking de los valores mínimos. Esto garantizará la inexistencia de sobreajuste, una correlación alta y un sesgo bajo. En la **Figura 2.3** se muestra el ranking de GCV y los otros estadísticos asociados para los cuatro cluster. La abscisa indica el total de modelos posibles en base a la combinatoria de los 10 predictores propuestos.

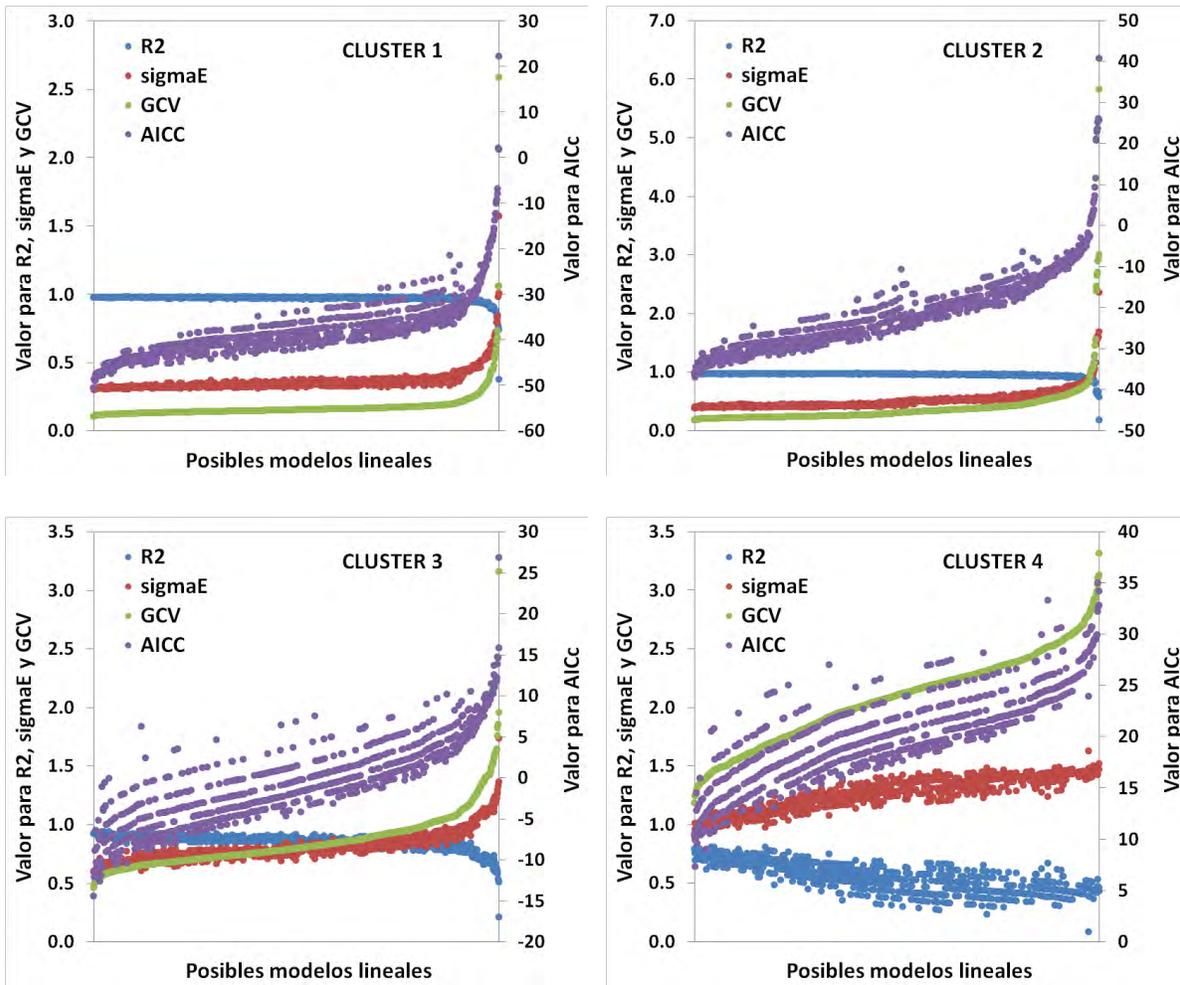


Figura 2.3.- Búsqueda del modelo de regresión lineal para la predicción de la componente principal de VD (óptimo para cada cluster) presentado como el ranking de GCV y los respectivos estadísticos asociados.

Se observa que la minimización del GCV asegura (1) una varianza del error baja respecto al rango posible, (2) una correlación alta respecto a su rango posible y (3) relativa parsimonia en los clusters 1 y 2, efecto no tan evidente en los clusters 3 y 4. De igual manera, la relación entre la minimización del GCV y la maximización de la

correlación y minimización del sesgo son evidentes en los clusters 3 y 4. Se observa además que los clusters 1 y 2 tienen correlaciones más altas que sus pares 3 y 4. Esto se debe a que las cuencas al sur del río Tinguiririca comienzan a mostrar un régimen nivo-pluvial distinto al marcadamente nival de las cuencas ubicadas al norte. La dispersión del estadístico AICc refleja el hecho de que (1) el sobreajuste depende no tanto del número de parámetros sino de la combinación de estos (es por esto que preliminarmente se eliminan los pares de predictores con $R^2 > 0.7$ y (2) que la parsimonia del modelo (es decir, el número de parámetros – predictores involucrados) no influye directamente en la robustez del modelo, es decir, en la validación cruzada.

Tras el análisis anterior se establecen los modelos predictivos de cada cluster para $PC1_{VD_{cluster i}}$. En la **Tabla 2.5a** se presentan los parámetros asociados a cada variable a utilizar en la ecuación lineal. En la **Tabla 2.5b** se muestran los estadísticos para dichos modelos considerados como óptimos bajo el criterio GCV.

Tabla 2.5a.- Parámetros de los modelos de regresión lineal múltiple óptimos sugeridos para el pronóstico de cada componente principal por cluster.

Modelo Multilineal (parámetros) por cluster	offset	SOI_{38}				SOI_{38}					
		IPP_{48} [mm]	Q_8 [m3/s]	SWE_{PDA} [mm]	SOI_{38}	$IPP_{48} \times Q_8$ [mm m3/s]	$IPP_{48} \times SWE_{PDA}$ [mm2]	$IPP_{48} \times SOI_{38}$ [mm]	$Q_8 \times SWE_{PDA}$ [mm m3/s]	$Q_8 \times SOI_{38}$ [m3/s]	$SWE_{PDA} \times SOI_{38}$ [mm]
	p_0	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{24}	p_{25}	p_{26}
		Predictores Primarios				Predictores Secundarios					
CL 1*	-1.774		0.221				1.39×10^{-5}				5.20×10^{-4}
CL 2*	-3.526				0.865		1.31×10^{-5}	-0.001			
CL 3*	-3.622			0.004		4.13×10^{-5}			-3.75×10^{-5}		
CL 4*	-6.899	0.005	0.074			-7.49×10^{-5}			3.57×10^{-5}	0.014	

* CL = cluster.

Tabla 2.5b.- Estadísticos de optimalidad de los modelos lineales propuestos.

	Estadísticos para los modelos de regresión lineal óptimos			
	R^2	σ_e	GCV	AICc
CLUSTER 1	0.98	0.312	0.11	-48.89
CLUSTER 2	0.98	0.412	0.20	-36.14
CLUSTER 3	0.89	0.698	0.56	-11.89
CLUSTER 4	0.71	1.016	1.32	9.65

Paralelamente, se realiza un análisis individual de la capacidad predictiva de cada predictor (primario y secundario) a modo de entender los resultados de la **Tabla 2.5**. En la **Figura 2.4** se observa que el VD de los clusters 1 y 2 es explicado de mejor manera que en el caso de los clusters 3 y 4. En general la calidad predictiva de IPP_{48} es similar a la de SWE_{PDA} (excepto en el cluster 3) y un tanto diferente para el predictor Q_8 . El predictor climático de escala sinóptica SOI_{38} explica de manera deficiente el VD. Los predictores secundarios en tanto revelan que la multiplicación de los predictores

primarios puede, en algunos casos, aumentar el valor de R^2 (especialmente en los cluster 1 y 2) y en otros no aportar mayormente por sobre los predictores primarios (el caso del cluster 4). Se puede suponer que la predicción lineal quedará suficientemente explicada si se considera alguna combinación de variables que considere directa o indirectamente ya sea el caudal antecedente (Q_8) o el agua precipitada (IPP_{48} , SWE_{PDA}). La inclusión del fenómeno ENSO (SOI_{38}) solo aporta de manera marginal a la calidad de los modelos propuestos. No obstante lo anterior, se incluye dada la facilidad de obtener dicha información y porque no afecta significativamente la parsimonia de los modelos.

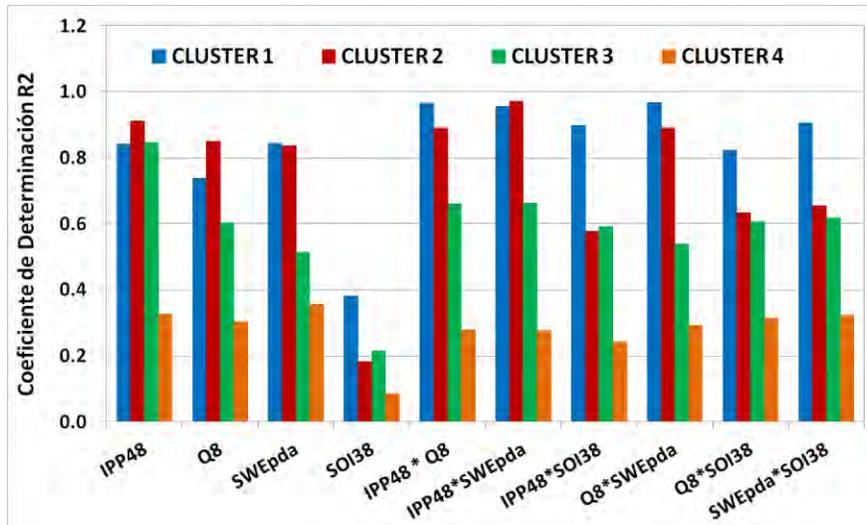


Figura 2.4.- Coeficiente de determinación para las correlaciones lineales individuales de cada predictor respecto al predictando $PC1_{VD_{cluster i}}$.

Robustez de las ecuaciones de predicción propuestas – validación cruzada.

Para verificar la validez del modelo se propone una validación cruzada en donde se recalculan los parámetros para el conjunto de predictores óptimos (en la ecuación de predicción de $PC1_{VD_{cluster i}}$) eliminando cada uno de los años históricos a la vez. Si las predicción de la componente principal no se ve significativamente alterada por la eliminación de cualquiera de los años históricos entonces el modelo debiese responder positivamente al momento de pronosticar nuevos años fuera del conjunto de años históricos (es decir, para efectos del estudio, los años 2013 y 2014). Notar que en la validación cruzada se aplica la metodología sin considerar el escalamiento propuesto en el paso 5 explicado anteriormente, con el propósito de evaluar solo el modelo predictivo y su robustez, y no toda la metodología de pronóstico. En la **Figura 2.5** se presenta la serie de tiempo para el VD observado, VD calculado con el modelo a utilizar para pronosticar y el VD producto de la validación cruzada. Es posible advertir en casi todas las cuencas que (1) la serie de validación cruzada suele ser similar a la modelada por lo que el modelo propuesto para cada cluster es robusto a la hora de pronosticar un año fuera de la ventana 1990 - 2012, (2) En todas las cuencas existen años que no son correctamente pronosticados (en términos de VD).

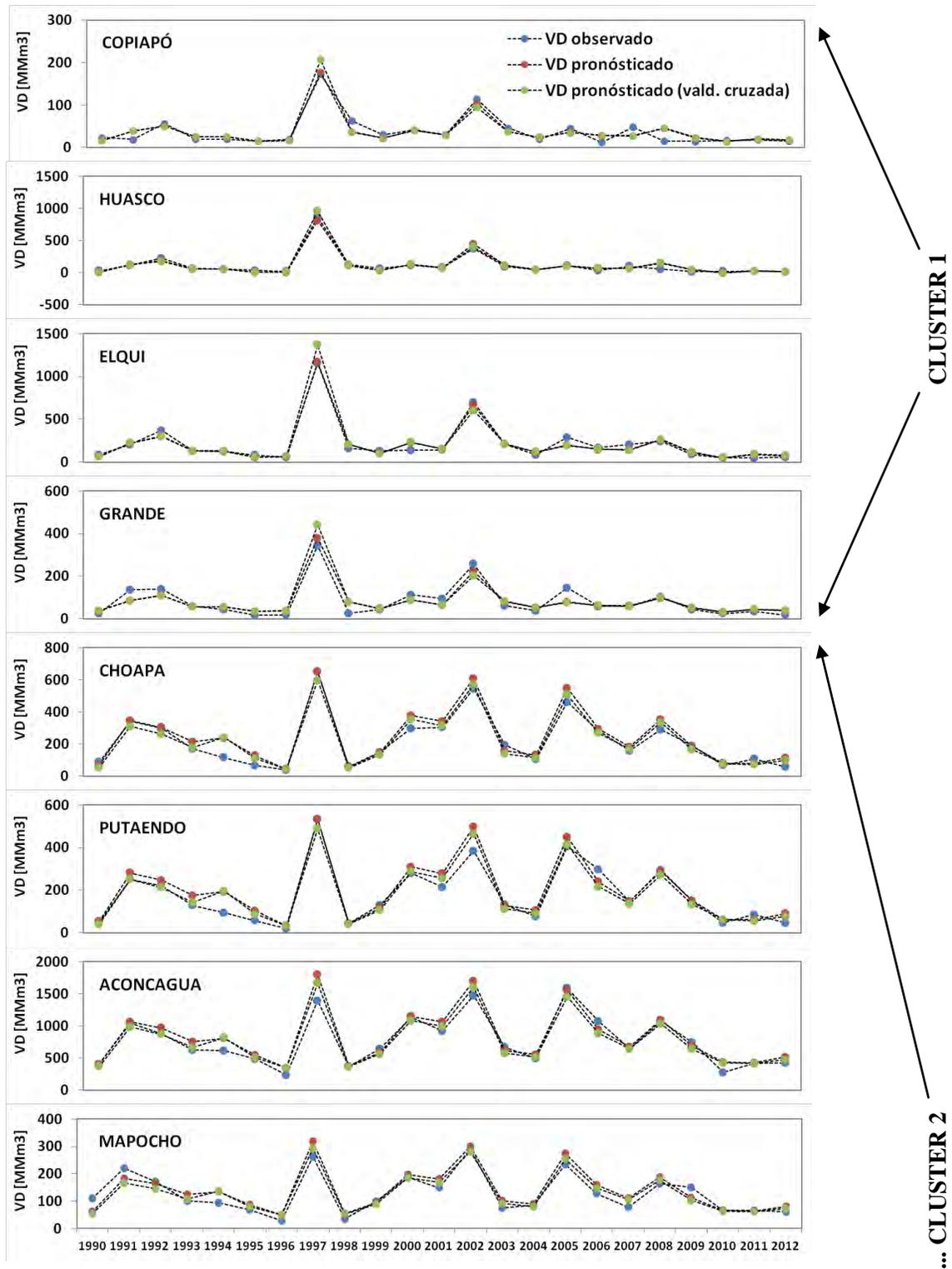


Figura 2.5a.- Verificación del modelo predictivo y su validación cruzada respecto a la serie de volúmenes total de deshielo histórico por cuenca (Copiapó a Mapocho).

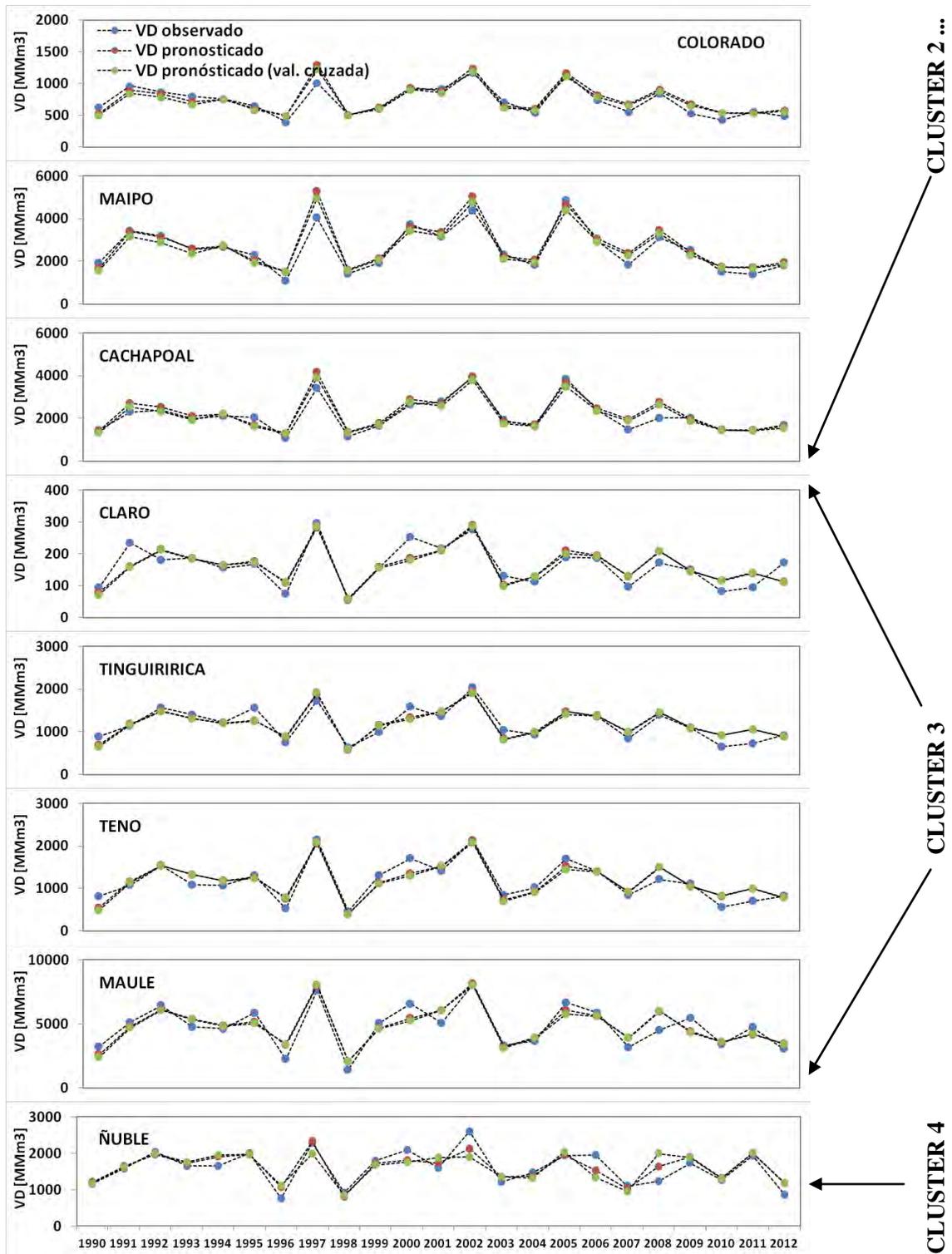


Figura 2.5b.- Verificación del modelo predictivo y su validación cruzada respecto a la serie de volúmenes total de deshielo histórico por cuenca (Colorado a Ñuble).

Para el cluster 1 se aprecian errores en los años normales y húmedos (en menor medida para Huasco en Algodones). Se observa que en el caso de Grande en Las Ramadas el paso 6 es necesario para corregir estos errores que son más frecuentes que en las otras cuatro cuencas. Los principales errores para el cluster 1 ocurren en las ventanas 1998 - 2000 y 2005 - 2007. Para el cluster 2 se observa errores consistentes en el año 1994 y 2006 - 2007. Se observa que el pronóstico mejora a medida que se avanza en latitud sur hasta Cachapoal en Puente Termas, indicando que existe cierto sesgo climático en los predictores respecto a dicha zona del cluster 2. En el caso del cluster 3 se observan problemas de ajuste el año 2000 y en la ventana 2007 - 2012. Este último error es bastante aleatorio tendiendo a la sobreestimación de los VD secos. El caso del cluster 4 (Ñuble en San Fabián) se observa errores en el año 2002 y en la ventana 2006 - 2009 (año hidrológico normal). Sin embargo, a modo general, el ajuste de la serie de tiempo observada y pronosticada es alto, observando errores aislados en la mayoría de las cuencas. No obstante, se observa una concordancia a nivel de VD en los cluster propuestos lo que permite tener un pronóstico de caudales de deshielo mensual robusto al acoplar no solo el ajuste estadístico del VD sino que el sentido de cercanía y espacialidad hidro-climática de los puntos de control estudiados.

Determinación del tipo de año hidrológico y generación de curvas de desagregación mensual del volumen total de deshielo (CDM).

Tras tener el volumen total de deshielo pronosticado se procede a desagregarlo mensualmente según el comportamiento típico mensual para años secos, normales y húmedos. Se construye la curva de duración (probabilidad tipo Weibull) para el VD histórico normalizada por el promedio del VD histórico (**Figura 2.6a**).

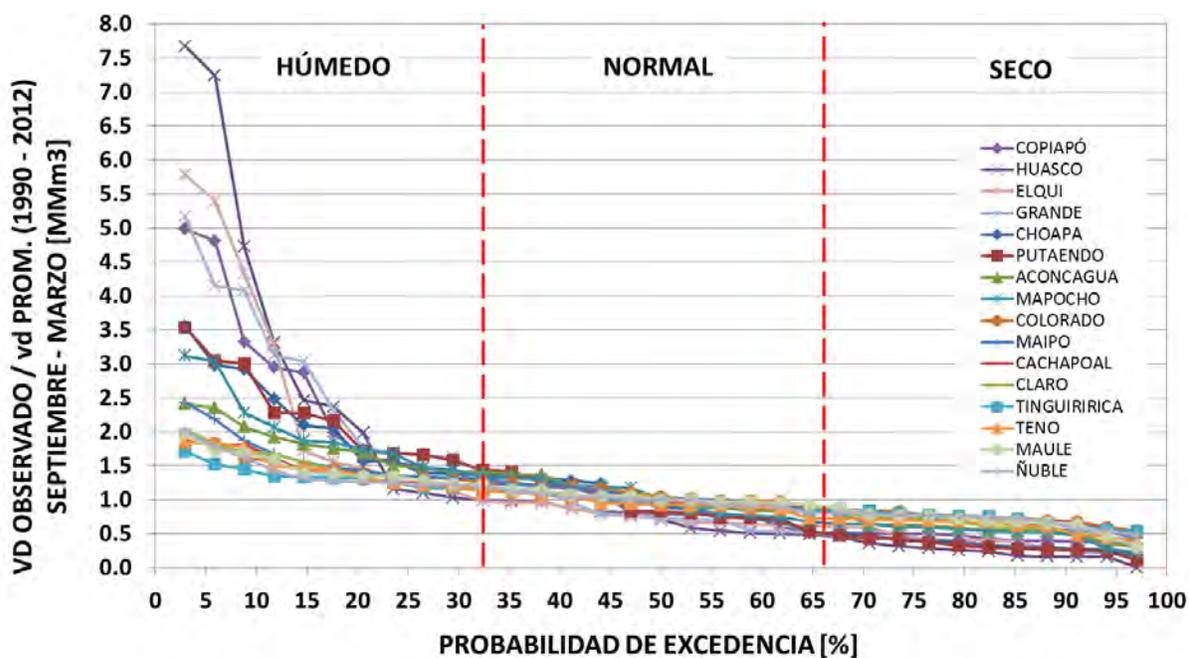


Figura 2.6a.- Curvas de concentración (VD vs. probabilidad de excedencia) para las 16 cuencas a pronosticar. Se señala el rango para los tres tipos de años hidrológicos sugeridos.

Tabla 2.6.- CDM para el VD por cuenca (para cada tipo de año hidrológico).

Curva de desagregación mensual del VD (CDM) para tipo de año hidrológico (% del VD)							
Cuenca	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
AÑO HÚMEDO							
Copiapó	9	9	11	17	19	20	14
Huasco	10	11	16	18	18	15	12
Elqui	9	11	17	20	18	14	10
Grande	11	20	28	20	10	6	5
Choapa	8	17	28	24	13	6	4
Putaendo	9	15	26	27	14	6	4
Aconcagua	6	10	19	26	21	11	6
Mapocho	15	20	22	19	13	7	4
Colorado	7	9	14	21	22	16	11
Maipo	7	9	15	21	23	16	10
Cachapoal	8	10	15	23	22	15	8
Claro	16	14	16	21	16	10	6
Tinguiririca	9	10	16	22	21	13	8
Teno	13	14	21	22	15	9	6
Maule	13	15	23	24	13	7	5
Ñuble	22	23	23	16	8	5	3
AÑO NORMAL							
Copiapó	12	10	9	12	18	21	17
Huasco	14	14	13	15	15	15	14
Elqui	12	14	14	16	16	14	13
Grande	16	24	23	13	9	8	7
Choapa	10	23	31	16	9	6	6
Putaendo	11	17	26	22	12	7	5
Aconcagua	7	12	20	23	18	11	8
Mapocho	18	19	21	17	12	8	6
Colorado	6	10	15	21	22	16	11
Maipo	8	11	17	23	18	13	10
Cachapoal	8	10	18	22	19	13	10
Claro	16	17	24	20	11	8	5
Tinguiririca	9	11	16	20	22	13	9
Teno	16	16	22	18	12	9	7
Maule	15	19	23	18	10	7	6
Ñuble	24	22	21	15	8	5	5
AÑO SECO							
Copiapó	19	13	9	11	17	15	15
Huasco	22	16	10	10	11	15	17
Elqui	13	15	15	15	14	14	14
Grande	20	22	18	13	10	8	9
Choapa	15	21	24	14	10	8	8
Putaendo	15	17	25	17	10	8	7
Aconcagua	8	11	22	22	15	12	10
Mapocho	15	18	20	17	13	10	8
Colorado	8	9	14	20	19	17	12
Maipo	9	12	19	20	16	14	10
Cachapoal	9	11	19	22	16	13	9
Claro	15	14	17	17	15	12	9
Tinguiririca	9	12	19	22	17	13	8
Teno	16	21	21	16	10	9	6
Maule	18	22	22	15	9	8	6
Ñuble	26	26	21	14	6	4	3

En la **Tabla 2.6** se presentan los porcentajes del VD para la desagregación mensual para cada cuenca. Se realiza este ejercicio para cada cuenca en particular dado que la respuesta mensual dependerá de factores intrínsecos a cada cuenca como pueden ser su fisiografía y condiciones meteorológicas locales.

Para efectos del pronóstico no se conocerá el VD observado por lo que el tipo de año hidrológico se determinara suponiendo como valor real el volumen total de deshielo

pronosticado (VD^{PC1*}). Esta determinación es consecuente con la metodología desde un punto de vista operacional. El hecho de predecir la curva de duración de VD (simple o normalizada) con otras curvas de duración (por ejemplo, para IPP_{48}) es válido pero compromete un segundo modelo predictivo y una nueva fuente de incertidumbre. A modo de visualización se presenta la desagregación mensual entre los años 1990 – 2012 para las distintas cuencas por cluster. Notar que la crva utilizada para años secos, húmedos o normales es básicamente una distorsión de estas distribuciones generales (**Figura 2.6b**).

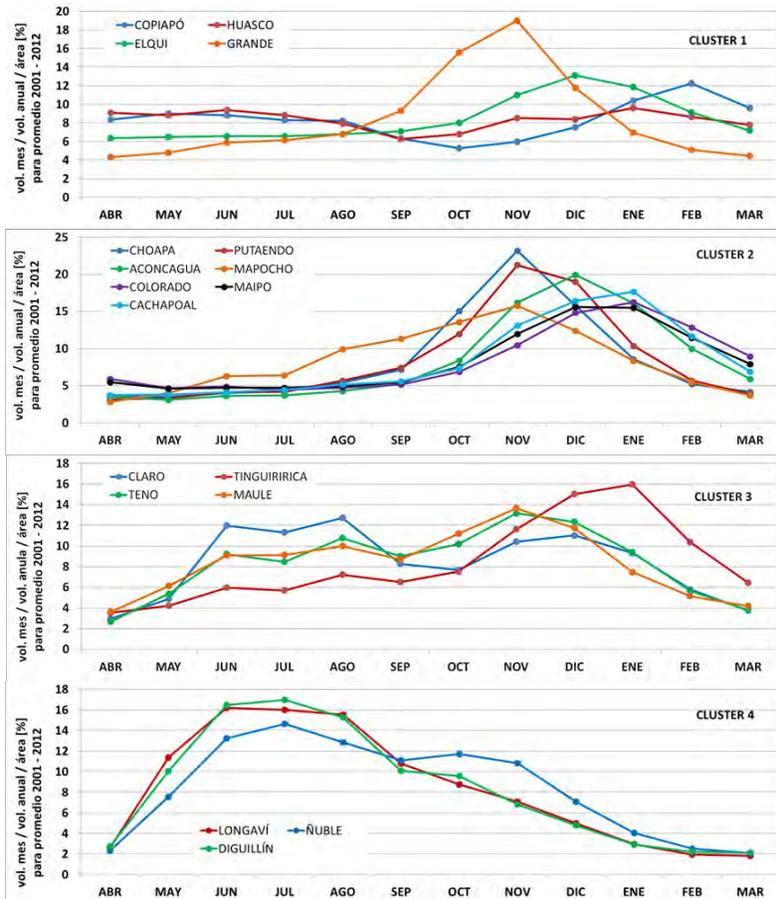


Figura 2.6b.- Distribución general de caudales medios mensuales (promedio años 1990 al 2012).

2.3. Evaluación del pronóstico de caudales de deshielo.

Como se explicó anteriormente, existen dos errores asociados a (1) la utilización de la componente principal como predictando y no todas las componentes entregadas por el análisis PCA (el cual denominaremos ε_{pca}) y (2) el error de la regresión lineal multivariable para la predicción de la componente principal (el cual denominaremos ε_{lin}). Se evalúa el error observado a nivel histórico según cada fuente, realizando una comparación de la distribución del residual representada como el error relativo porcentual respecto al caudal medio observado y volumen total de deshielo observado, tanto para el pronóstico presentado por la Universidad de Chile como para el

entregado históricamente por la DGA. La evaluación de ε_{pca} es particular para cada cuenca y está dada por la no inclusión de las demás componentes del análisis PCA. A diferencia de ε_{pca} , ε_{lin} se asocia a cada cluster. En la **Figura 2.7** se presenta un gráfico que explica la calidad de la modelación del VD (en el caso de ε_{pca}) y del pronóstico de la componente principal (en el caso de ε_{lin}). Las barras celestes y anaranjadas indican la diferencia en términos de R^2 . En el caso de las barras celestes (cluster 1 y 2) se observa que el modelo lineal de pronóstico de la componente principal es mejor o igual a la representación del VD utilizando solo la componente principal histórica.

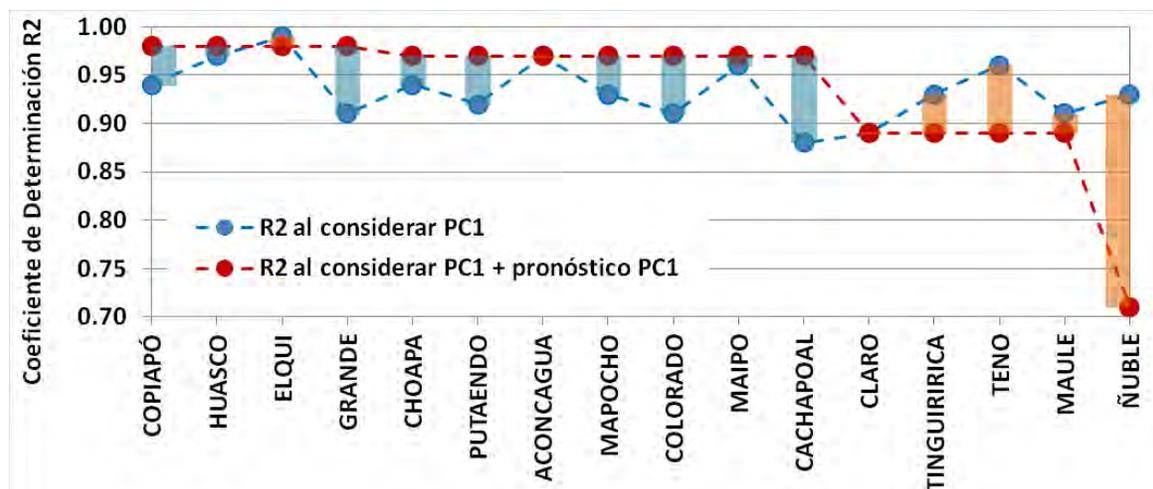


Figura 2.7.- Comparación del efecto en el error introducido por la representación del VD vía componente principal y por el pronóstico de este predictando sintético.

Esto quiere decir que el hecho de pronosticar este predictando sintético automáticamente mejora la calidad de la metodología. En el caso de las barras anaranjadas (clusters 3 y 4) se observa el efecto inverso, es decir, el pronóstico de la componente principal introduce incertidumbre en la representación del VD. De manera general se puede decir que, a excepción del pronóstico en el cluster 4, la calidad de la representación del VD por la componente principal y el pronóstico de esta mediante el modelo lineal multivariable es aceptable en todos los casos (valores de R^2 sobre 0.85). En la **Figura 2.8a** se grafica explícitamente la calidad del pronóstico de la componente principal (calidad que es idéntica a la obtenida en términos del VD dado que la transformación del componente principal pronosticado al VD pronosticado es analítica).

A continuación se realiza una verificación visual del error relativo respecto al VD observado del pronóstico histórico generado mediante la metodología presentada en este informe (UCHILE) y el pronóstico entregado por la DGA (solo en el caso en donde se tenga este pronóstico). Esta verificación se realiza mediante histogramas del error porcentual. El cuadrante centrado en error = 0% corresponde al cuadrante de $\pm 20\%$ de error relativo calificado como "aceptable". Algunos histogramas (como es el caso de Copiapó en Pastillo y Grande en Las Ramadas) solo se construyen en base a los años con pronósticos comunes por ambas fuentes. En el caso de Putaendo en Resguardo los Patos y Colorado en Maipo no se cuentan con pronósticos de la DGA previos al año 2013 por lo que solo se presenta el error de la metodología UCHILE.

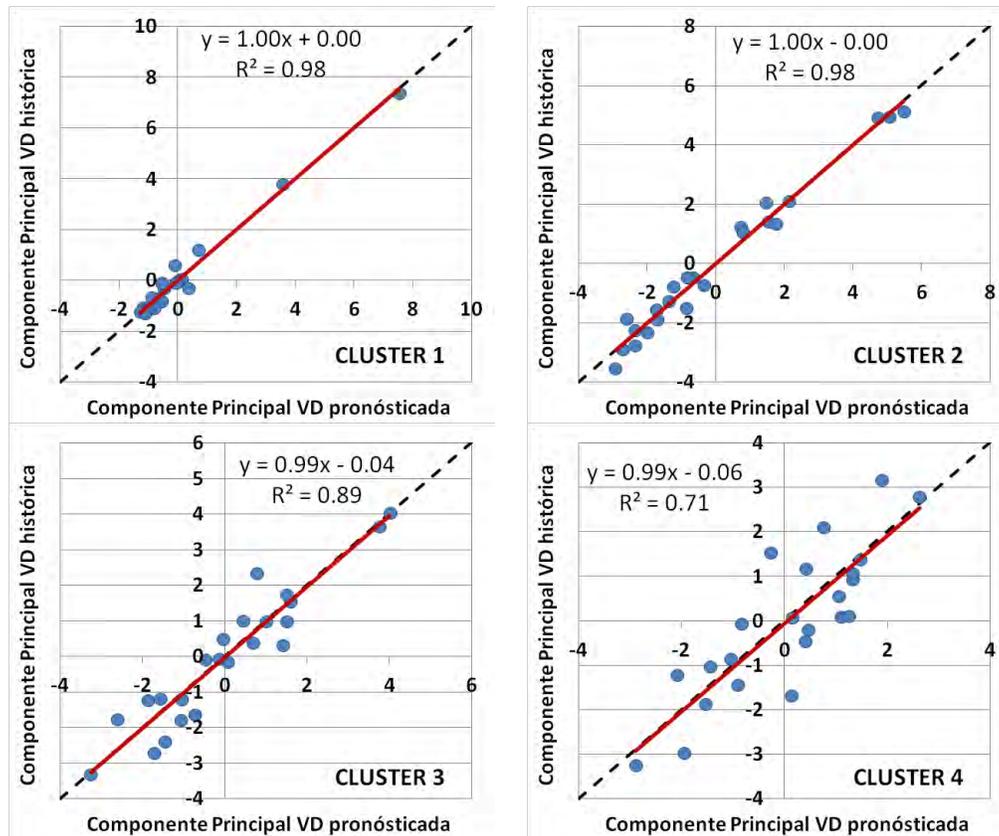


Figura 2.8a.- Calidad de la predicción de la componente principal versus la componente principal histórica en términos de R^2 .

En la **Figura 2.8b** se observa que la calidad predictiva histórica de ambos pronósticos es similar, con desempeños distintos según las cuencas controladas. En el caso del cluster 1, la calidad del pronóstico en Copiapó en Pastillo no es buena, observando un cierto grado de uniformidad en la distribución de los errores. En las otras tres cuencas de este cluster se observa que el pronóstico UCHILE es igual o levemente mejor que el DGA en cuanto a centralización y asimetría. En el cluster 2 los resultados son similares, siendo de una calidad inferior en Choapa en Cuncumén y Putaendo en Resguardo Los Patos. El pronóstico UCHILE parece ser nuevamente igual o de mejor calidad que el DGA a excepción de Cachapoal en Puente Termas y Maipo en El Manzano. En el cluster 3 existen diferencias en las asimetrías de los histogramas de error, siendo el pronóstico DGA mejor que el UCHILE en Maule en Armerillo. En el caso del cluster 4 (Ñuble en San Fabián) la calidad es similar en ambos pronósticos. En la **Figura 2.8c** se presenta un el mismo tipo de análisis para las 16 cuencas acopladas en donde se aprecia que el pronóstico UCHILE es levemente superior al DGA teniendo en cuenta algunas diferencias en la asimetría de la distribución de los errores relativos.

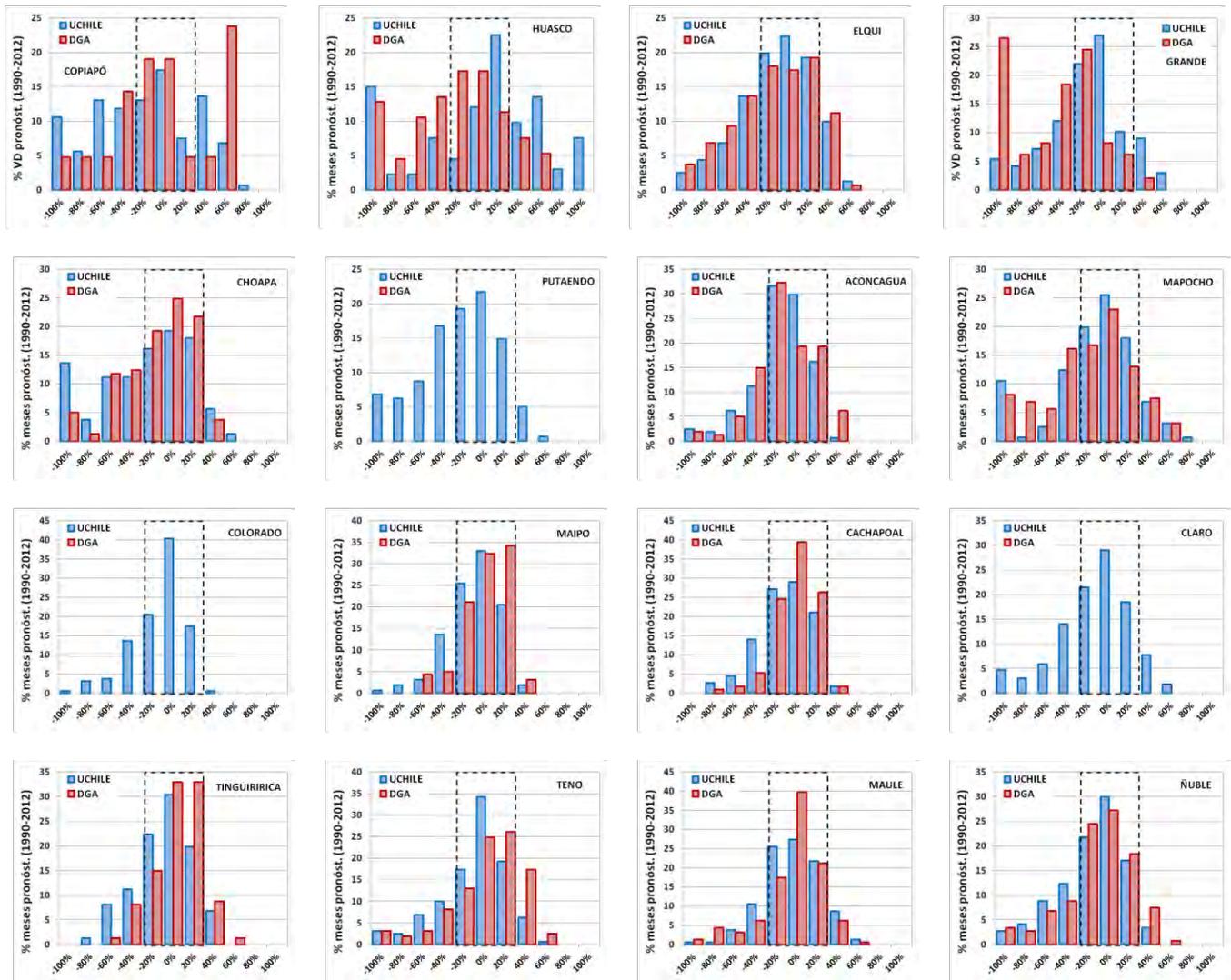


Figura 2.8b.- Histogramas de error relativo respecto al observado del caudal medio mensual pronosticado por la DGA y la Universidad de Chile en el periodo completo 190 - 2012.

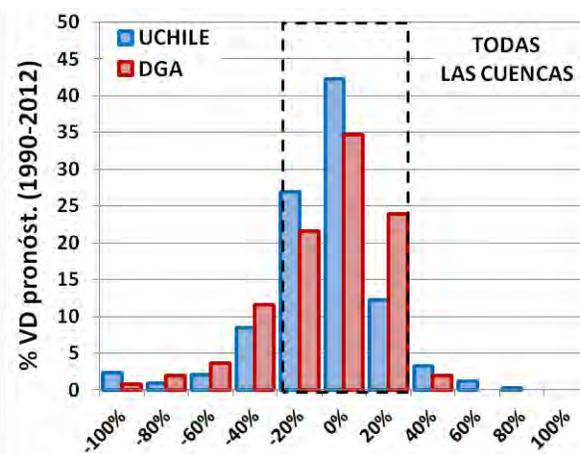


Figura 2.8c.- Histograma de error relativo respecto al observado del VD pronosticado por la DGA y la Universidad de Chile en el periodo completo 1990 - 2012, todas las cuencas.

A modo de evaluación de la metodología presentada en este estudio para el año en 2014 se presenta el pronóstico histórico para el año 2013 de las cuencas Grande en Las Ramadas, Aconcagua en Chacabucuito, Mapocho en Los Almendros, Maipo en El Manzano y Cachapoal en Puente Termas (**Figura A1.1 (Anexos)**). En esta figura se observa el pronóstico entregado por UCHILE en 2013, el pronóstico DGA, la serie observada y el pronóstico reelaborado mediante la presente metodología.

Teniendo en cuenta que el pronóstico presentado en este estudio no se apoya en juicio experto, siendo más bien de carácter objetivo, se puede decir que la metodología presenta al menos (1) una calidad no inferior al pronóstico histórico de la DGA a modo general (análisis histórico – reflejado para 2013) y (2) un potencial a la hora de ser automatizado computacionalmente. Sin embargo, es importante entender que como toda metodología basada en un enfoque estadístico, la presente metodología no resolverá el problema para valores extremos (razón de la inclusión de la banda de pronóstico) por lo que está pensada como una *herramienta de apoyo* al juicio experto y, en ningún caso, como una metodología de reemplazo de este paso importante a la hora de construir y ejecutar modelos y pronósticos hidrológicos.

2.4. Resultados del pronóstico de caudales de deshielo propuesto para la temporada 2014 – 2015. Metodología de actualización al día 30 de Noviembre.

A continuación se presenta el pronóstico de caudales de deshielo propuesto para la temporada 2014 – 2015 (**Tabla 2.7a**). En la **Tabla 2.7b** se presentan las bandas de incertidumbre (porcentaje por sobre o bajo el pronóstico determinístico). Los predictores para 2014 se encuentran en la **Tabla A1.3 (Anexos)** (de manera explícita según las ecuaciones óptimas encontradas). Los valores del componente principal del VD para cada cluster (año 2014) se presentarán de igual manera en la **Tabla A1.2a**. En la **Tabla A1.4 (Anexos)** se presenta el listado de variables hidro - climáticas utilizadas para generar los predictores utilizados en las ecuaciones predictivas.

La **Tabla 2.7b** se interpreta de la siguiente manera: cada porcentaje corresponde al porcentaje por sobre o bajo el valor central (**Tabla 2.7a**) entendido como una banda de incertidumbre generada del conjunto estadístico de distribución Normal al 80% - 20% y 95% - 5% nivel de confianza. Este porcentaje (resultado de la confianza estadística) se aplica tanto al volumen de deshielo pronosticado como al caudal medio mensual pronosticado dado que se asume que la curva de desagregación mensual del volumen de deshielo aplica tanto al pronóstico determinístico como a las bandas de incertidumbre. Para efectos prácticos, cada banda muestra el rango de caudales medios mensuales pronosticados tal que existe un 80% (o 95%) de probabilidad de que el caudal medio mensual observado a futuro esté dentro de dicha banda, suponiendo claro está, que el modelo de pronóstico es no-sesgado.

Tabla 2.7a.- Pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo temporada 2014 – 2015.

Cuencas	Caudal medio [m ³ /s] Sep.	Caudal medio [m ³ /s] Oct.	Caudal medio [m ³ /s] Nov.	Caudal medio [m ³ /s] Dic.	Caudal medio [m ³ /s] Ene.	Caudal medio [m ³ /s] Feb.	Caudal medio [m ³ /s] Mar.	Volumen Total de Deshielo [MMm ³]	Proba. Exced. %
UCHILE (2014 - 2015) VALOR ESPERADO									
Copiapó	0.8	0.5	0.4	0.4	0.7	0.6	0.6	10.9	98%
Huasco	-1.1	-0.8	-0.5	-0.5	-0.5	-0.7	-0.8	-13.0	***
Huasco*	1.5	1.1	0.7	0.7	0.7	1.0	1.1	18.0	96%
Elqui	2.7	3.1	3.0	3.2	3.0	2.8	2.8	54.2	93%
Grande	1.2	1.3	1.1	0.8	0.6	0.5	0.5	15.6	98%
Choapa	3.3	4.6	5.2	3.0	2.1	1.7	1.6	56.5	95%
Putaendo	2.9	3.4	5.0	3.4	2.0	1.6	1.4	51.9	82%
Aconcagua	12.6	16.8	32.8	33.9	23.0	18.7	14.5	401.2	88%
Mapocho	3.3	4.0	4.4	3.9	2.9	2.4	1.7	59.8	91%
Colorado	16.6	18.6	28.7	40.1	37.6	33.3	24.4	525.3	85%
Maipo	57.6	77.3	118.6	129.0	101.0	85.8	65.7	1673.4	87%
Cachapoal	46.4	61.3	102.6	117.9	86.6	68.9	49.6	1405.0	92%
Claro	6.7	6.3	7.6	7.6	6.4	5.2	3.8	114.5	79%
Tinguiririca	32.1	41.6	65.3	74.7	58.1	45.1	27.6	907.8	77%
Teno	50.2	64.1	65.5	49.0	31.5	28.1	19.0	809.7	76%
Maule	236.4	298.8	288.7	205.5	119.5	102.4	86.7	3525.8	78%
Ñuble	204.4	219.9	215.0	150.3	79.4	45.9	31.1	2492.4	10%

***El pronóstico para Huasco en Algodones resulta en caudales negativos (y un volumen total de deshielo (VD) negativo). Esto se debe a las características mismas de un pronóstico estadístico que, en el caso del cluster 1, presenta exceso de varianza para años secos. La serie Huasco* entrega un pronóstico en base al promedio de las probabilidades de excedencia del VD pronosticado para Copiapó en Pastillo y Elqui en Algarrobal (ambas cuencas ubicadas al norte y sur de Huasco en Algodones). De esta estimación de la probabilidad de excedencia se deriva el VD y caudales medios mensuales pronosticados. La generación de series negativas solo se verificó para esta cuenca solo en 2014 y 2010.**

Tabla 2.7b.- Banda de incertidumbre estadística en términos de porcentaje del caudal medio mensual para el pronóstico 2014 - 2015.

Cuencas	% c/r Volumen total de deshielo	
	Banda 80% - 20% Normal inferior	Banda 95% - 5% Normal inferior
Copiapó	±88%	±45%
Huasco	±350%	±180%
Elqui	±170%	±88%
Grande	±70%	±35%
Choapa	±60%	±30%
Putaendo	±65%	±33%
Aconcagua	±24%	±12%
Mapocho	±30%	±15%
Colorado	±10%	±05%
Maipo	±15%	±08%
Cachapoal	±14%	±07%
Claro	±31%	±16%
Tinguiririca	±22%	±11%
Teno	±32%	±16%
Maule	±26%	±13%
Ñuble	±18%	±09%

A modo de comentario del pronóstico de caudales de deshielo medio mensual (**Figura 2.9a - b**) obtenido se puede decir que la situación esperada para los meses de Septiembre a Diciembre de 2014 y Enero a Marzo de 2015 cumplen con la condición de año hidrológico tipo seco en todas las cuencas con excepción de Ñuble en San Fabián que muestra un volumen de deshielo propio de un año húmedo promedio. La condición

hidrológica en la mayor parte del dominio pronosticado es extremadamente seca (probabilidad de excedencia mayor al 90%) en la zona norte (Copiapó en Pastillo a Choapa en Cuncumén) tendiendo a una condición seca promedio desde Putaendo en Resguardo Los Patos hasta Cachapoal en Puente Termas. Desde Claro en Hacienda Las Nieves hasta Maule en Armerillo se observa un volumen total tipo seco con probabilidad de excedencia en torno al 75%. El caso de Ñuble en San Fabián (probabilidad de excedencia en torno al 15%) puede estar inducido por estar considerado como un cluster aparte de las demás cuencas por lo que es de esperar que la probabilidad de excedencia real a observar sea un tanto mayor. Cabe destacar que para la zona centro-norte (cuencas del río Copiapó al río Choapa) la condición hidrológica en cuanto a escasez hídrica pudiera ser la peor observada en los últimos 25 años.

Respecto a las bandas de incertidumbre generadas se advierte (**Figura 2.9a - b**) que la incertidumbre del pronóstico es en exceso alta para las tres primeras cuencas (Copiapó en Pastillo, Huasco en Algodones, Elqui en Algarrobal), disminuyendo progresivamente a medida que se avanza hacia el centro del país (Grande en Las Ramadas, Choapa en Cuncumén, Putaendo en Resguardo Los Patos), estabilizándose en torno al 25% desde Aconcagua en Chacabuquito al sur. La excesiva incertidumbre en el cluster 1 se debe básicamente al predominio de volúmenes de deshielo bajos por sobre los de cuantía media y alta (asimetría de la distribución).

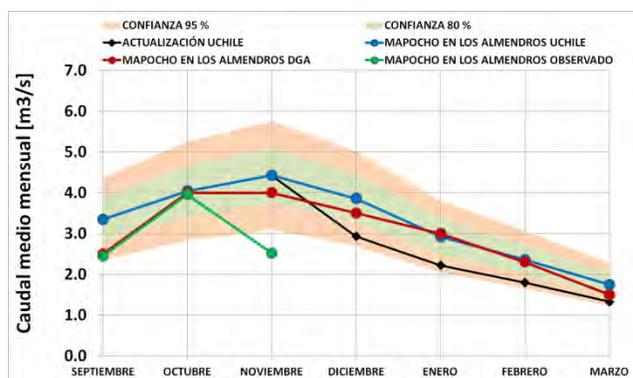
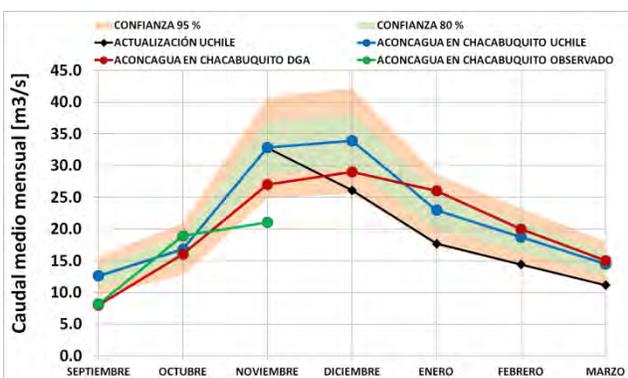
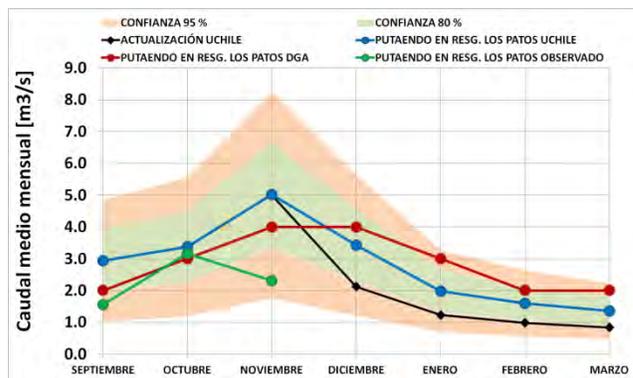
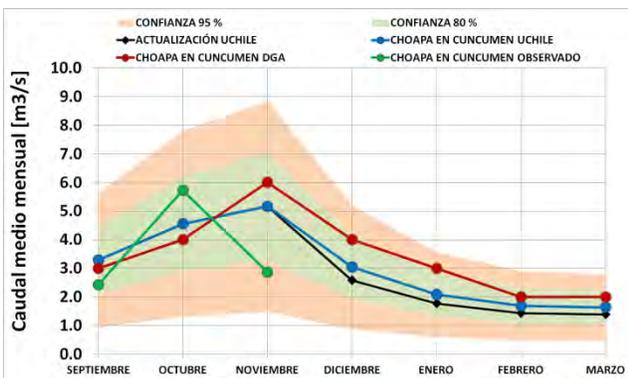
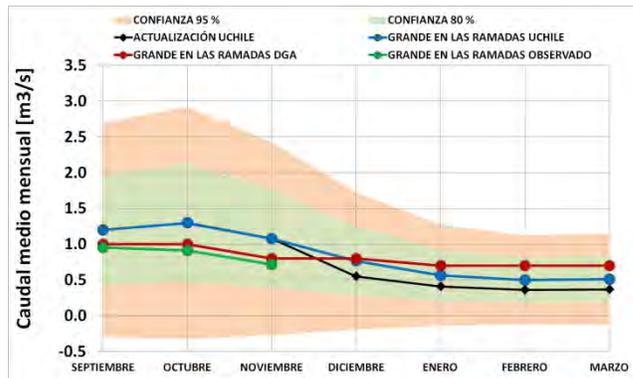
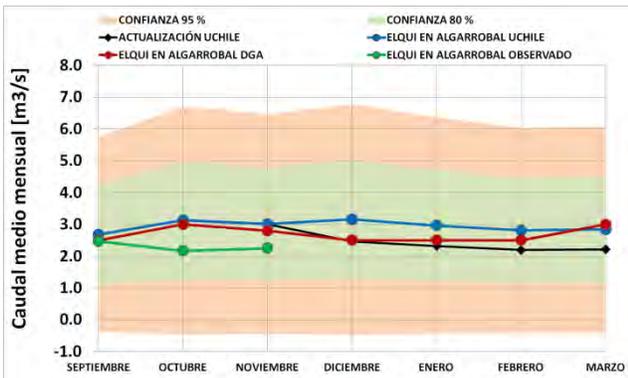
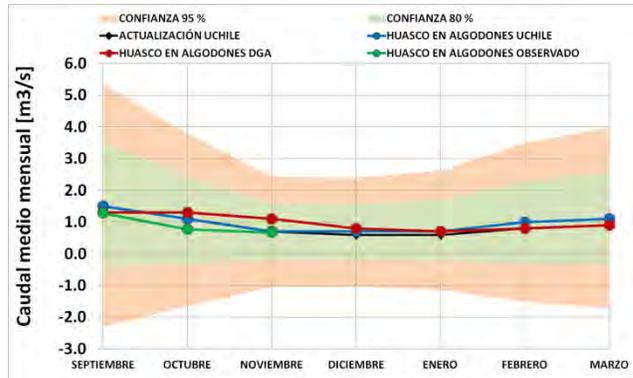
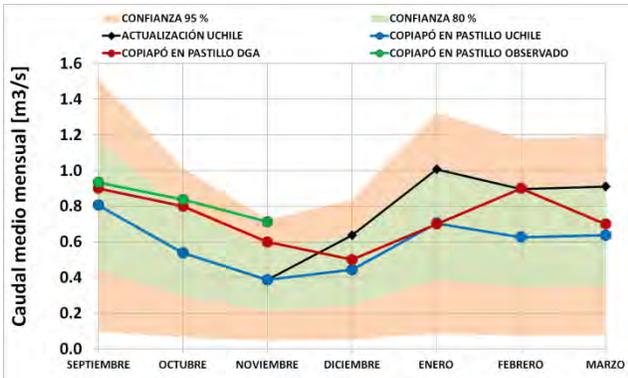


Figura 2.9a.- Pronóstico de caudales de deshielo medios mensuales 2014 - 2015.

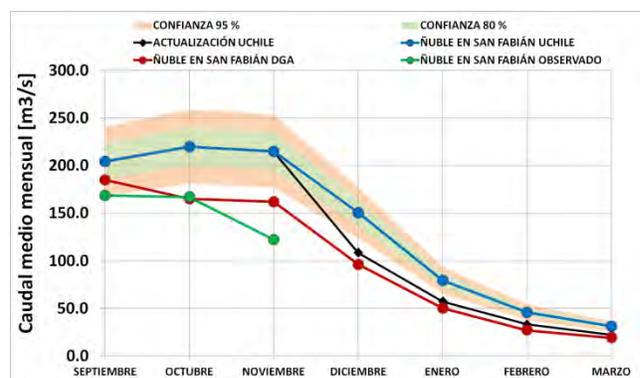
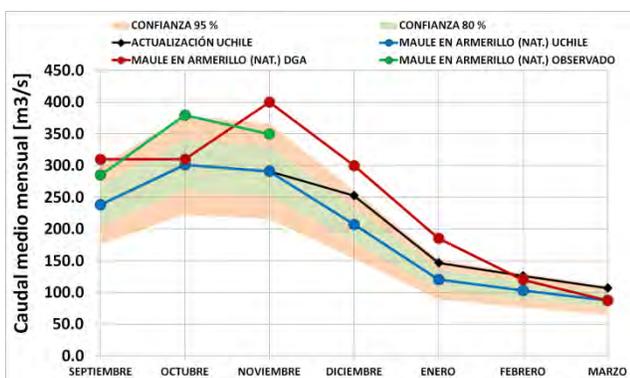
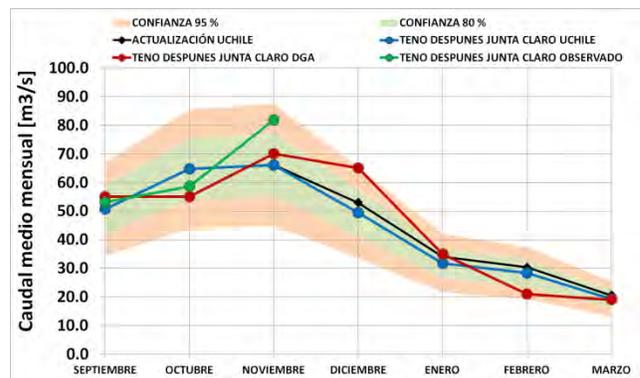
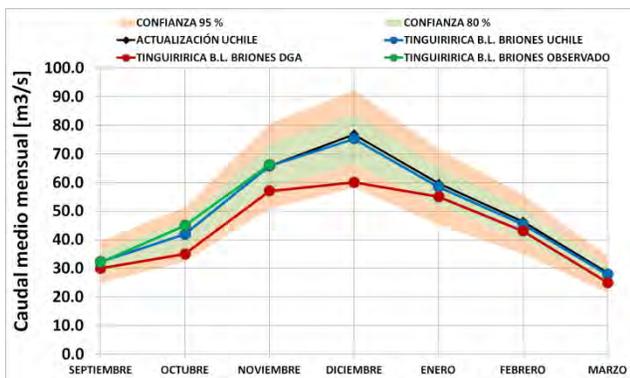
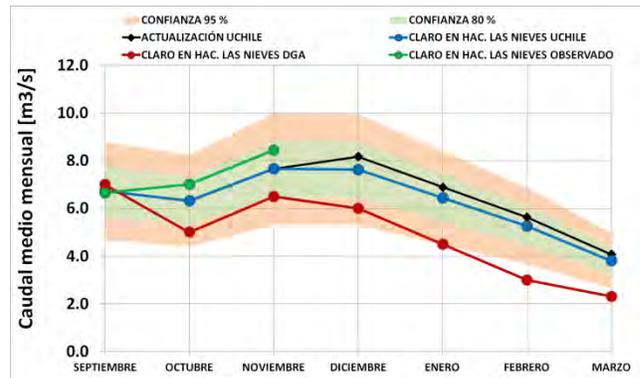
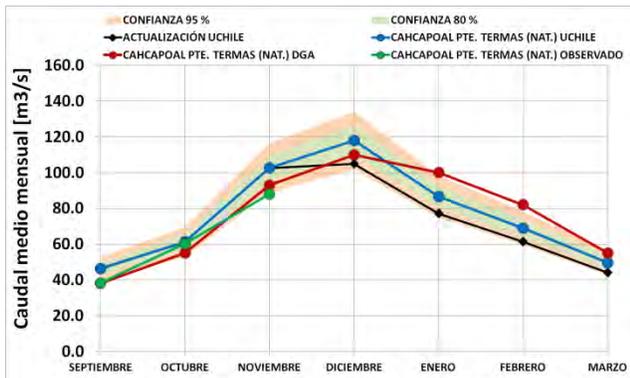
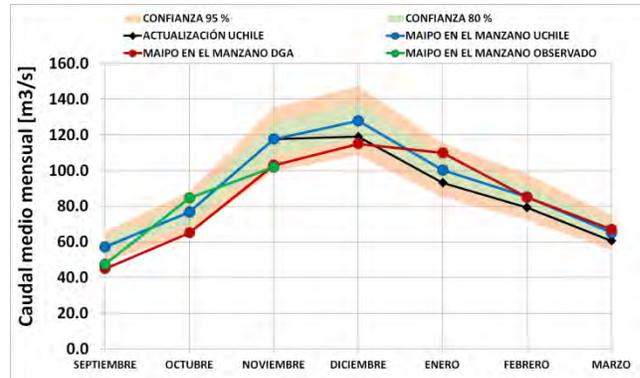
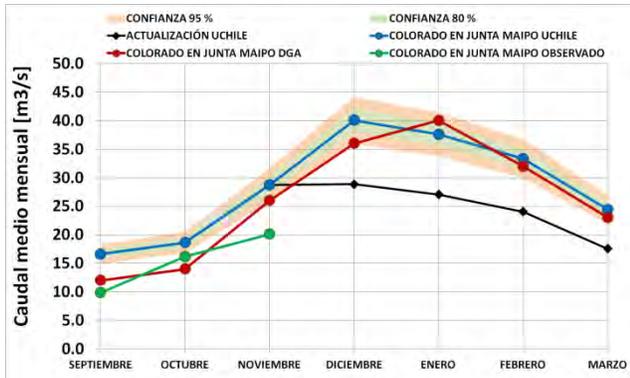


Figura 2.9b.- Pronóstico de caudales de deshielo medios mensuales 2014 - 2015. Continuación.

En **Figura A1.2 (Anexos)** se presenta un diagrama tipo resumen con el compendio metodológico de las ecuaciones predictivas, transformaciones al espacio vectorial de volúmenes de deshielo, la metodología de actualización (ver **Tabla 2.3**) y la metodología para la generación de bandas de incertidumbre al 95% - 5% y 80% - 20%.

Metodología de actualización al día 30 de Noviembre.

Como complemento a los resultados del pronóstico de caudales de deshielo medios mensuales se acopla una breve metodología de actualización de este con los datos de caudales medios mensuales observados de Septiembre, Octubre y Noviembre. Esta metodología corresponde en realidad a dos esquemas simples explicados a continuación:

- Esquema 1: se calcula la razón entre el volumen Septiembre – Noviembre pronosticado y observado. Luego, se multiplica este factor al volumen total de deshielo pronosticado (VD) y se desagrega esta nueva estimación a modelo de re-pronosticar los caudales medio mensuales de Diciembre – Marzo.
- Esquema 2: se aplica la metodología basada en la actualización vía ganancia de Kalman en donde se actualiza el volumen Septiembre – Noviembre por medio de la siguiente ecuación:

$$V_{actualizado} = V_{pronosticado} + K(V_{observado} - V_{pronosticado}) \quad [2.15]$$

En esta ecuación, K se calcula por medio de la ecuación [2.10] considerando los mismos supuestos presentados anteriormente. Luego se calcula la razón entre el volumen actualizado y pronosticado para Septiembre – Noviembre, multiplicando este factor por el volumen total de deshielo pronosticado (VD) y, desagregando esta nueva estimación a modelo de re-pronosticar los caudales medio mensuales de Diciembre – Marzo.

Los resultados de la actualización desarrollada se presentan en la **Tabla A1.5 (Anexos)** y gráficamente en la **Figura 2.9**. En la **Figura 2.9** se presenta, además del resultado del pronóstico generado, serie mensual de caudales medios mensuales observados al 30 de Noviembre (necesarios para la actualización), el pronóstico presentado por la Dirección General de Aguas y la actualización sugerida. Cabe destacar que de las dos metodologías de actualización presentadas se eligió el esquema 1 por su simplicidad operacional.

3. MUESTREO DEL EQUIVALENTE EN AGUA DE NIEVE EN TERRENO.

El muestreo nival realizado durante los años 2012, 2013 y 2014 (enmarcados en el presente proyecto) ha sido enfocado principalmente a la comprensión de los patrones de acumulación de nieve observados con el fin de evaluar la calidad de la representatividad espacial del modelo del equivalente en agua de nieve confeccionado. Esto es esencial dado que este modelo será la base del análisis de la red nival necesaria en términos de la localización de nuevas estaciones nivométricas. El muestreo en terreno también se utiliza para evaluar la representatividad local de los tres *snow pillows* visitados durante estos tres años respecto a su entorno local (muestreo de grillas).

3.1. Metodología para la caracterización en terreno del manto nival.

Se presenta a continuación la metodología referente a los trabajos realizados en terreno para la estimación del equivalente en agua de nieve (determinación de la altura nival, densidad y temperatura del manto nival. Parte de estos datos serán utilizados para validar el modelo distribuido del equivalente en agua de nieve, generar áreas representativas para la ampliación de la red nivométrica en función de la capacidad predictiva respecto al volumen total de deshielo y, posteriormente, para el análisis de la representatividad de los distintos snow pillows estudiados respecto a su entorno inmediato.

Caracterización en terreno del manto nival.

La caracterización del manto nival propuesta en este estudio se basa principalmente en la observación en cada cuenca piloto de (1) el espesor del manto nival, (2) la densidad del manto nival y (3) la temperatura del manto nival (**DGA - RHMA, 2012; DGA - RHMA, 2011; DGA - RHMA, 2008**). Cada una de estas variables es registrada mediante distintas metodologías las cuales serán brevemente revisadas a continuación.

La organización de las campañas de terreno consiste básicamente en (1) transectas en esquí y al menos dos calicatas en el muestreo a nivel de cuenca (transporte en helicóptero), en caso de ser necesario se realizan también transectas a pie, (2) mediciones a pie en torno a cada snow pillow estudiado, replanteadas originalmente en una grilla cuadrada de 500 metros espaciada uniformemente cada 50 metros (análoga a la resolución de las imágenes MODIS de cobertura nival fraccional / albedo nival (MODI10A1)). Se realiza una calicata adjunta a cada snow pillow para calcular el equivalente en agua de nieve asociado a cada estación nivométrica y a la grilla respectiva.

El espesor del manto nival es medido en terreno mediante sondajes puntuales distribuidos en la cuenca tratando de capturar el comportamiento general considerando diversos aspectos tales como (**DGA - RHMA, 2008; Molotch y Bales, 2005**):

- Seguridad en terreno, respecto a riesgos de caídas y ocurrencia de avalanchas. Esto se ve reflejado en la selección de las cuencas - laderas a medir, en la elección de las condiciones climáticas favorables, en la determinación en terreno de la jornada diaria de trabajo factible y en una calendarización adecuada de cada actividad en terreno respecto al inicio de la temporada de deshielo y a los factores climáticos.
- Accesibilidad de las zonas de muestreo, ya sea vía helicóptero o a pie. Esto es corroborado por medio de visitas a terreno previas al inicio de las actividades e inspección de recursos satelitales.
- Aspectos tales como la representatividad y heterogeneidad de las mediciones. Esto se logra con un conocimiento de la fisiografía de la cuenca mediante la revisión de productos satelitales (MODIS o LANDSAT), la experiencia misma en terreno de años anteriores y mediante el planteamiento de un diseño experimental en terreno, clasificando el área total de la cuenca en zonas con similitudes en elevación, orientación, pendiente y existencia de cobertura vegetal.
- El propósito de las mediciones a realizar, teniendo en consideración dos esquemas prediseñados para (1) la estimación del patrón de acumulación del manto nival a nivel de cuenca y (2) el estudio de la representatividad de las mediciones de estaciones nivométricas actualmente operativas respecto a su entorno inmediato.

La caracterización de los parámetros del manto nival se realiza mediante la medición de perfiles de densidad y temperatura de la nieve. Para llevar a cabo esto se realizan calicatas puntuales en la cuenca, considerando diversos aspectos tales como (**DGA - RHMA, 2008**):

- Excavación de una calicata procurando enfrentar la posición del sol. La calicata debe llegar hasta el suelo, debe ser recta y la pared en sombra debe ser previamente limpiada y aplanada antes de realizar las mediciones. La pared a muestrear no debe haber sido expuestas a carga para no alterar las medidas de densidad nival.
- La ubicación de cada calicata debe ser en un terreno plano, representativo de su entorno inmediato. Se pretende realizar al menos dos calicatas por zona dependiendo de los criterios de seguridad explicados anteriormente. Las calicatas deberán realizarse para zonas con distinta elevación.

Estimación en terreno del equivalente en agua de nieve.

El espesor del manto nival se mide a través de sondajes. Un sondaje consiste en la medición de la altura del manto nival (perpendicular a la superficie del manto nival)

mediante una sonda desplegable. Cada medición puntual consiste en tres mediciones (un sondaje central y dos sondajes periféricos ubicados entre 1.0 y 2.5 metros de distancia respecto al punto central). Estas mediciones se promedian entregando un valor representativo de la condición local entorno al punto central de medición (**DGA - RHMA, 2008**).

Este procedimiento se repite a medida que se recorren las transectas en esquí y a pie, eligiendo puntos centrales según (1) la seguridad y factibilidad observada sobre la marcha, (2) la representatividad del punto elegido según los puntos explicados anteriormente y (3) una distancia entre puntos centrales aproximada de 50 a 150 metros para el caso de las transectas en esquí. En el caso de las transectas a pie se realizan cortes con mediciones separadas cada 50 metros aproximadamente. En el caso de las grillas (250000 m², puntos equi-espaciados cada 50 metros) la metodología de sondaje es en cruz (punto central y cuatro puntos periféricos).

El equivalente en agua de nieve (SWE por sus siglas en inglés) consiste en el volumen de agua equivalente que contiene un volumen de nieve si es que este se derritiera completamente. El equivalente en agua de nieve se mide en términos de altura de agua y queda determinado por la siguiente expresión:

$$SWE = H \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad [3.1]$$

Donde H corresponde a la altura del espesor del manto nival, ρ_s corresponde a la densidad del manto nival y ρ_w corresponde a la densidad del agua (1000 Kg/m³). En el caso de los estratos de hielo natural (interfaz hielo - aire), se considera una densidad de 500 Kg/m³. Debido a que la densidad del manto nival varía en cada estrato se propone un valor promedio ponderado por estrato calculado como:

$$\rho_s = \frac{\sum_0^H h_i \rho_{s,i}}{H} \quad [3.2]$$

Donde $\rho_{s,i}$ y h_i corresponden a la densidad y altura de cada estrato respectivamente. Para efectos prácticos a nivel de cuenca es posible estimar el equivalente en agua de nieve en los puntos de medición del espesor del manto nival distribuidos en la cuenca si suponemos representativa para dichos puntos (1) la densidad del manto nival observada en la calicata más cercana o (2) el promedio de las densidades del manto nival observadas en la cuenca en estudio (cada opción depende de la distribución espacial de las mediciones realizadas en terreno).

Para el análisis de la representatividad de cada snow pillow respecto a su entorno se utilizará el concepto de error relativo respecto, en este caso, a nuestro conjunto muestral "verdadero" considerado como la grilla. Este error se calcula como:

$$ER\%_{grilla} = \frac{(SWE_x - SWE_{prom.grilla})}{SWE_{prom.grilla}} \quad [3.3]$$

Donde SWE_x corresponde al equivalente en agua de nieve analizado (que puede ser el valor registrado por el snow pillow mediante teledetección o, el valor observado en terreno directamente en el snow pillow).

Validación del modelo distribuido del derretimiento del equivalente en agua de nieve y análisis fisiográfico.

Como se explicó anteriormente, los datos en terreno de espesor nival y densidad del manto nival se conjugan para estimar de manera puntual o agregada el equivalente en agua de nieve en ocho cuencas piloto para el periodo de máxima acumulación nival. A modo de profundizar el análisis de esta validación se procede a caracterizar fisiográficamente las cuencas piloto según la elevación, orientación, pendiente, radiación solar potencial al 1 de Septiembre y el MUS (*máximo upwind slope average*), características fisiográficas que serán explicadas a continuación.

El grado de exposición/escondimiento al transporte eólico de nieve puede ser modelado mediante la característica fisiográfica – climatológica local MUS (*máximo upslope direction*) desarrollado por **Winstral y Marks (2002)**. Este parámetro explica zonas de exposición y resguardo al viento preferencial en una cuenca respecto a una posición dada. El viento preferencial se caracteriza por una dirección promedio y un radio de acción. El parámetro MUS queda definido por un ángulo en sentido contrario (definido en este estudio como 45°) que envuelve a la dirección preferencial y al radio de acción anteriormente mencionado (definido como 100 [m]). El parámetro MUS se define como:

$$S(x, y, A_i, d_{m\acute{a}x}) = m\acute{a}x \left[atan \left(\frac{z_{v,w} - z_{x,y}}{\sqrt{(x - v)^2 + (y - w)^2}} \right) \right] \quad [3.4]$$

$$MUS = \frac{1}{n} \sum_{A_1}^{A_n} S(x, y, A_i, d_{m\acute{a}x}) \quad [3.5]$$

Donde $S(x, y, A_i, d_{m\acute{a}x})$ corresponde al máximo valor del ángulo de exposición – resguardo dado un radio de acción fijo ($d_{m\acute{a}x}$) y una ventana angular de 10° de ángulo medio A_i comprendido entre $A_1 < A_i < A_1$. El índice fisiográfico – climatológico MUS considera el promedio de $S(x, y, A_i, d_{m\acute{a}x})$ entre A_1 y A_2 . Las direcciones del viento seleccionadas fueron en la dirección ascendente del valle en cada cuenca.

La radiación solar incidente potencial (RSI) se deriva del módulo *r.sun* de GRASS GIS calculado para cada cuenca piloto a cielo claro para el día 1 de Septiembre (**Hofierka y Suri, 2002**). Estos mapas son calculados en función de la astronomía de posición,

elevación, orientación y pendiente del terreno. La orientación y pendiente son derivadas mediante el módulo *r.slope.aspect* de GRASS GIS. La elevación se obtiene de un modelo digital de elevación ASTER DGEM de resolución espacial 30 metros. Cabe destacar que las cinco características fisiográficas utilizadas se basan en la elevación por lo que están generadas en la misma resolución espacial de esta.

3.2. Diseño de las campañas de terreno (2012 – 2014).

La zona seleccionada para efectos de este estudio comprende cinco cuencas piloto de alta montaña ubicadas en los Andes de Chile central entre la latitud -30° sur y -36° sur. Las cuencas piloto muestreadas para efectos del presente estudio corresponden a (1) Cerro Vaga Negra (CVN), Ojos de Agua (ODA), Mardones (MAR), el sistema Morales (MOR) - Lo Valdez (LVD), el sistema Olla Blanca (OBL) - Río Blanco (RBL) y Valle Hermoso (VHM). Además, se informa sobre los datos recopilados en las estaciones nivométricas Cerro Vega Negra, Portillo (POR) y Laguna Negra (LAG).

Cabe señalar que las campañas de terrenos consideradas comprenden aquellas realizadas en ambas etapas del proyecto, es decir, los años 2012, 2013 y 2014. Las principales características de las cuencas piloto se presentan a continuación en la **Tabla 3.1a - f**. Las **Figuras 3.1b - g** muestran la disposición fisiográfica de cada cuenca piloto indicando el norte en el sentido de la flecha blanca dibujada en cada figura y los puntos de salida o estaciones de interés. Las cuencas piloto incluidas en este proyecto no están afectas al control por vegetación (follaje) exceptuando Valle Hermoso y, responden a las necesidades de expandir el área muestreada el año 2010 - 2011 hacia latitudes al sur y norte respecto a la Región Metropolitana. De esta manera, será posible observar un comportamiento bastante completo de la condición nival para una parte de la cordillera de los Andes de Chile central (**Cornwell y McPhee, 2014a**). En la **Figura 3.1a** se presenta un mapa general con las cuencas piloto para efectos del presente estudio.

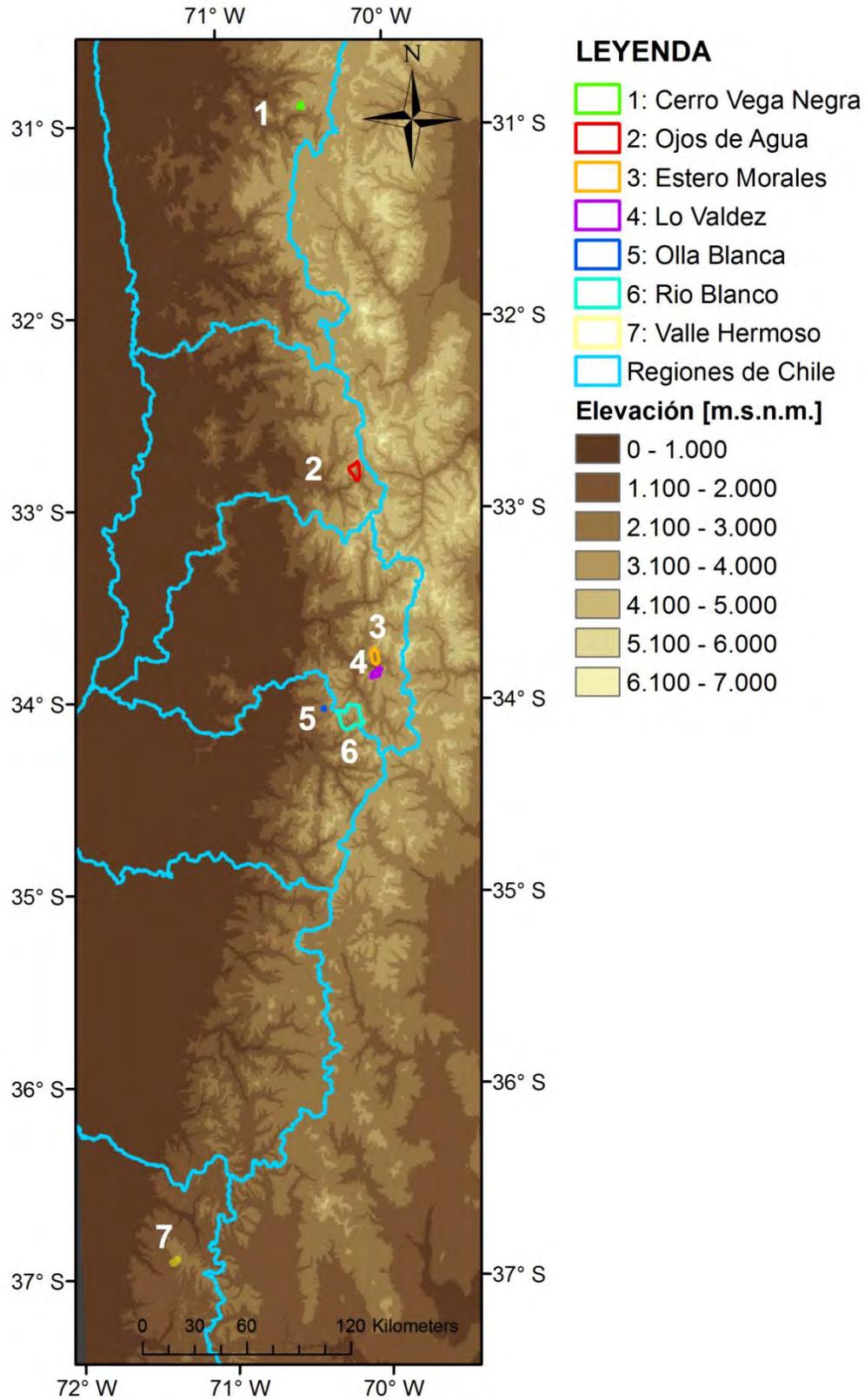


Figura 3.1a.- Mapa general de las cuencas estudiadas el año 2013 – 2014.

Tabla 3.1a.- Caracterización cuenca piloto Cerro Vega Negra.

CERRO VEGA NEGRA (CVN)	
Ubicación	Se ubica en la Región de Coquimbo en el Norte Chico. Pertenece a la cuenca del río Grande en Las Ramadas, sistema afluente al río Limarí
Coord. punto de salida	357489 Oeste, 6578567 Sur
Macro zona climática	Desértico y estepárico de altura
Rango de elevación	3250 - 3900 m.s.n.m.
Orientación media	Sur
Área total	7 Km ²
Fluviométrica cercana	Río Grande en Las Ramadas
Nivométrica cercana	Cerro Vega Negra DCP (3550 m.s.n.m.) – DGA
Características	Esta cuenca se caracteriza por una zona plana rodeada de cumbres bajas que permiten una acumulación homogénea del manto nival. Presenta forma en abanico con amplio rango de orientación. No presenta pendientes elevadas en la zona de muestreo ni zonas de peligro de avalancha. La cuenca no presenta mayor cobertura vegetal. Se encuentra sobre la mina Los Pingos (Figura 2.1b).

Tabla 3.1b.- Caracterización cuenca piloto Ojos de Agua.

OJOS DE AGUA (ODA)	
Ubicación	Se ubica en la Región de Valparaíso en Chile Central. Pertenece a la cuenca del río Aconcagua alto, sistema afluente al río Aconcagua. Se encuentra próximo al paso fronterizo Los Libertadores
Coord. punto de salida	390282 Oeste, 6363932 Sur
Macro zona climática	Mediterráneo seco
Rango de elevación	2200 - 4800 m.s.n.m.
Orientación media	Sur
Área total	39 Km ²
Fluviométrica cercana	Río Aconcagua
Nivométrica cercana	Portillo DCP (3000 m.s.n.m.) – DGA
Características	Esta cuenca se caracteriza por una zona baja encajonada de pendiente fuerte que se abre tras un farellón central a un valle más amplio con zonas preferentes para la acumulación nival y con una zona de acarreo proclive a avalanchas. En la cima se encuentra el glaciar Parva del Inca con un área de aproximadamente un 3% del área total de la cuenca. (Figura 2.1c)

Tabla 3.1c.- Caracterización cuenca piloto Mardones.

MARDONES (MAR)	
Ubicación	Se ubica en la Región de Valparaíso en Chile Central. Pertenece a la cuenca del río Juncal, sistema afluente al río Aconcagua alto. Se encuentra próximo al paso fronterizo Los Libertadores
Coord. punto de salida	398315 Oeste, 6357766 Sur
Macro zona climática	Mediterráneo seco
Rango de elevación	2730 - 4600 m.s.n.m.
Orientación media	Suroeste
Área total	11 Km ²
Fluviométrica cercana	Río Aconcagua
Nivométrica cercana	Portillo DCP (3000 m.s.n.m.) – DGA
Características	Esta cuenca presenta características similares a Ojos de Agua, variando su rango de elevación y tamaño. Presenta una zona de pendiente abrupta a la entrada y un valle más bien plano en su parte alta. (Figura 2.1d)

Tabla 3.1d- Caracterización cuenca piloto Morales - Lo Valdez.

MORALES (MOR) - LO VALDEZ (LVD)	
Ubicación	Se ubican en la Región Metropolitana en Chile Central. Pertenecen a la cuenca del río Volcán, sistema afluente al río Maipo. Se encuentran en el pueblo de Lo Valdez - Estero Morales, en el Monumento Nacional El Morado (MOR) y en el sector de Placa Roja (LVD)
Coord. punto de salida	401515 Oeste, 6257735 Sur (MOR) 402470 Oeste, 6255612 Sur (LVD)
Macro zona climática	Mediterráneo seco
Rango de elevación	1880 - 4400 m.s.n.m. (MOR) 2200 - 4000 m.s.n.m. (LVD)
Orientación media	Sur
Área total	Noroeste 27 Km ² (MOR) 18 Km ² (LVD)
Fluviométrica cercana	Río Volcán en Queltehues
Nivométrica cercana	Laguna Negra DCP (2780 m.s.n.m.) – DGA
Características	Morales de caracteriza por una zona baja y media de pendiente suave y encajonada por zonas de riesgo de avalancha. En dicha parte se encuentra la estación meteorológica ubicada en Aguas Panimávida (parte media de la cuenca). En la parte superior se encuentra el glaciar San Francisco (2 terrazas) - (Figura 3.1d). Lo Valdez corresponde a características similares con una zona alta levemente más plana, un valle más estrecho a la entrada de la cuenca (Figura 3.1d)

Tabla 3.1e.- Caracterización cuenca piloto río Blanco y Olla Blanca.

RÍO BLANCO (BLN) - OLLA BLANCA (OBL)	
Ubicación	Se ubica en la Región del Libertador Bernardo O´Higgins, en Chile Central. Pertenecce al sistema del río Pangal y Coya respectivamente, ambos, dentro del sistema del río Cachapoal. Se encuentra en las dependencias de División El Teniente de CODELCO
Coord. punto de salida	387523 Oeste, 6224277 Sur (BLN) 370686 Oeste, 56231022 Sur (OBL)
Macro zona climática	Mediterráneo seco
Rango de elevación	2470- 4400 m.s.n.m. (BLN) 2770 - 3180 m.s.n.m. (OBL)
Orientación media	Suroeste
Área total	Sur 70 Km ² (BLN) 2.3 Km ² (OBL)
Fluviométrica cercana	Río Cachapoal 5 Km. b. j. Cortaderal - Río Pangal en Pangal
Nivométrica cercana	Ruta de Nieve Olla Blanca (2950 m.s.n.m.) – DET
Características	La cuenca piloto del río Blanco (Figura 3.1e) corresponde a una sección dominada por glaciares y depositación nival sobre terreno abrupto, con una zona preferencial de acumulación baja a la salida de la cuenca. Olla Blanca corresponde a una cuenca con mínima variabilidad en elevación y pendiente, proclive a la acumulación nival (Figura 3.1e)

Tabla 3.1f.- Caracterización cuenca piloto Valle Hermoso.

VALLE HERMOSO (VHM)	
Ubicación	Se ubica en la Región del Bio Bio, en el Centro Sur. Pertenecce a las cuencas cercanas a los Nevados de Chillán, río Renegado, sistema afluente al río Diguillín.
Coord. punto de salida	283910 Oeste, 5911365 Sur
Macro zona climática	Mediterráneo seco y húmedo
Rango de elevación	1550 - 2550 m.s.n.m.
Orientación media	Noroeste
Área total	4.5 Km ²
Fluviométrica cercana	Río Nuble en San Fabián
Nivométrica cercana	Ruta de Nieve en Valle Hermoso (2050 m.s.n.m.) - DGA
Características	Esta cuenca se caracteriza por una zona baja con cobertura vegetal uniforme y una zona alta (noroeste) sin cobertura vegetal. Ambas partes presentan acumulación nival (Figura 3.1f)



Figura 3.1b.- Cuenca piloto Cerro Vega Negra.



Figura 3.1c.- Cuenca piloto Ojos de Agua.



Figura 3.1d.- Cuenca piloto Mardones.



Figura 3.1e.- Sistema cuencas piloto Morales y Lo Valdez.



Figura 3.1f.- Sistema cuencas piloto Olla Blanca DET y Río Blanco DET.



Figura 3.1g.- Cuenca piloto Valle Hermoso.

La fisiografía de las cuencas seleccionadas se caracteriza según la elevación, orientación, pendiente, MUS y RSI (**Tabla 3.2**) además de la presencia de cobertura vegetal.

Tabla 3.2.- Caracterización fisiográfica y presencia de cobertura vegetal (todas las cuencas piloto visitadas en terreno).

CERRO VEGA NEGRA (CVN)	
Elevación media	3566 m.s.n.m.
Orientación media	200° (Sur)
Pendiente media	40°
MUS medio / 100	0.02
RSI medio	225 [W/m ² /día]
Presencia de cobertura vegetal	No se observa
OJOS DE AGUA (ODA)	
Elevación media	3458 m.s.n.m.
Orientación media	179 ° (Sur)
Pendiente media	65°
MUS medio / 100	0.06
RSI medio	215 [W/m ² /día]
Presencia de cobertura vegetal	Cobertura vegetal parcial (pastizal)
MARDONES (MAR)	
Elevación media	3458 m.s.n.m.
Orientación media	179 ° (Sur)
Pendiente media	65°
MUS medio / 100	-0.08
RSI medio	215 [W/m ² /día]
Presencia de cobertura vegetal	Cobertura vegetal parcial (pastizal)
MORALES (MOR) y LO VALDEZ (LVD)	
Elevación media	2930 m.s.n.m., 3232 m.s.n.m. respectivamente
Orientación media	177 ° (Sur), 79° (Noroeste) respectivamente
Pendiente media	65°, 30° respectivamente
MUS medio / 100	0.08 ,0.01
RSI medio	190, [W/m ² /día] respectivamente
Presencia de cobertura vegetal	Cobertura vegetal parcial (pastizal), No se observa
RÍO BLANCO (RBL) Y OLLA BLANCA (OBL)	
Elevación media	3530 m.s.n.m., 2979 m.s.n.m. respectivamente
Orientación media	205° (Sur), 227° (Sur - Oeste) respectivamente
Pendiente media	55°, 35° respectivamente
MUS medio / 100	0.01, 0.04 respectivamente
RSI medio	237, 220 [W/m ² /día] respectivamente
Presencia de cobertura vegetal	No se observa
VALLE HERMOSO (VHM)	
Elevación media	1956 m.s.n.m.
Orientación media	262° (Sur - Oeste)
Pendiente media	40°
MUS medio / 100	0.01
RSI medio	225 [W/m ² /día]
Presencia de cobertura vegetal	Bosque bajo en zona baja de la cuenca

3.3. Cronograma de las campañas de terreno (2012 - 2014).

El cronograma de las campañas a terreno realizadas en el marco del proyecto es presentado en la **Tabla 3.3**. Para efectos de la validación del modelo distribuido del derretimiento del equivalente en agua de nieve se utilizan como referencia aquellas campañas de terrenos realizadas en ambas etapas del proyecto, es decir, los años 2012, 2013 y 2014. Cabe destacar que las campañas de terreno han sido desarrolladas

durante los tres años explicitados en los meses de Agosto y Septiembre, con énfasis en las tres últimas semanas de Agosto conforme el periodo de máxima acumulación nival esperado para años tipo seco.

Tabla 3.3.- Cronogramas de campañas de terreno (años 2012, 2013 y 2014) – días del mes por semana (Agosto y Septiembre)

MES		AGOSTO				SEPTIEMBRE			
SEMANA		1	2	3	4	1	2	3	4
2012	CVN				27,28,29				
	MAR				31				
	POR						15		
	MOR						12		
	OBL - RBL					3			
2013	CVN			21,21,22					
	ODA			22,23					
	POR			23					
	LAG				29,30				
	OBL - RBL		13,14						
	VHM				26,27,28				
2014	CVN	4,5,6							
	POR			18,19					
	MOR		11,12						
	LVD		13						
	LAG		14						
	OBL			21			12		
	RBL			21		6			
	VHM								26, 27

3.4. Observación de la densidad y temperatura del manto nival.

A continuación se muestran los perfiles de densidad y temperatura del manto nival observados para 2012, 2013 y 2014. Algunos estratos de hielo no pueden ser medidos por lo que se asume una densidad de 500 [Kg/m³] para hielo con aire incorporado en la matriz nival. La estadística presentada a continuación está referida al promedio de ambos perfiles de temperatura (**Figura A2.1a - g (Anexos)**) y los resultados y estadísticos asociados en la **Tabla 3.4a- c**.

Tabla 3.4a.- Estadística de las calicatas realizadas (*) = calicata junto a snow pillow (año 2012).

Calicatas	Espesor manto [cm]	Temperatura promedio [°C]	Densidad promedio [Kg/m ³]	Número de estratos	SWE promedio [cm]	Elevación [m.s.n.m.]
CAMPAÑAS DE TERENO AÑO 2012						
C1 - CVN(*)	108	-2.2	315	7	34	3530
C2 - CVN	56	-2.5	288	6	16	3590
C3 - CVN	88	-1.9	301	5	26	3510
Prom. CVN	84	-2.2	301	6	26	3543
C1 - MAR	171	-4.0	347	5	59	3480
C2 - MAR	114	-2.2	361	8	41	3160
C3 - MAR	86	-0.5	412	5	35	3030
Prom. MAR	124	-2.2	373	6	45	3223
C1 - POR(*)	35	***	410	1	14	3000
C1 - MOR	132	-1.3	447	6	59	2610
C2 - MOR	62	-1.2	376	4	23	2388
Prom. MOR	97	-1.3	412	5	41	2499
C1 - RBL	128	-3.6	403	5	2	3580
C1 - RBL	228	-2.9	490	11	112	3115
Prom. RBL	178	-3.3	447	8	82	3348
C1 - OBL	260	-3.3	443	14	115	3015
C1 - OBL	110	-2.2	399	5	44	2778
C1 - OBL	120	-2.5	390	4	47	2950
Prom. OBL	163	-2.7	411	8	69	2914

Tabla 3.4b.- Estadística de las calicatas realizadas (*) = calicata junto a snow pillow (años 2013).

Calicatas	Espesor manto [cm]	Temperatura promedio [°C]	Densidad promedio [Kg/m ³]	Número de estratos	SWE promedio [cm]	Elevación [m.s.n.m.]
CAMPAÑAS DE TERENO AÑO 2013						
C1 - CVN(*)	135	-3.7	352	13	48	3530
C2 - CVN	159	-3.5	391	12	62	3595
C3 - CVN	105	-4.0	337	6	35	3425
Prom. CVN	133	-3.7	360	10	48	3517
C1 - ODA	153	-2.6	357	7	55	3168
C2 - ODA	196	-2.2	369	12	72	3140
C3 - ODA	127	-2.5	339	6	43	3230
Prom. ODA	159	-2.4	355	8	57	3179
C1 - POR(*)	88	-0.9	392	13	34	3030
C1 - LAG(*)	105	-0.4	455	13	48	2786
C1 - VHM	273	-0.6	416	9	114	1980
C1 - RBL	162	-3.1	334	11	54	2830
C1 - OBL	124	-4.3	335	8	42	2943

Tabla 3.4c.- Estadística de las calicatas realizadas (*) = calicata junto a snow pillow (años 2014).

Calicatas	Espesor manto [cm]	Temperatura promedio [°C]	Densidad promedio [Kg/m ³]	Número de estratos	SWE promedio [cm]	Elevación [m.s.n.m.]
CAMPAÑAS DE TERENO AÑO 2014						
C1 - CVN(*)	61	-1.9	325	3	20	3544
C2 - CVN	34	-2.4	306	4	10	3610
Prom. CVN	48	-2.0	316	4	15	
C1 - POR	41	-0.3	411	4	17	3008
C2 - POR(*)	38	-0.4	436	4	17	3025
Prom. POR	40	-0.4	424	4	17	
C1- MOR	95	-1.5	386	9	37	2450
C2 - MOR	103	-1.6	398	11	41	2460
C3 -MOR	170	-2.1	419	9	71	2480
Prom. MOR	123	-2.0	401	10	50	
C1 - LVD	222	-2.9	376	>5	83	3082
C2 - LVD	252	-5.0	354	11	89	3285
Prom. LVD	237	-4.0	365	***	86	
C1 - LAG(*)	82	-1.8	365	10	30	2782
C1 - RBL	70	-0.3	396	3	28	2823
C2 - RBL*	128	-5.0	354	7	45	2812
C1 - OBL	107	-0.5	348	5	37	2947
C2 - OBL*	175	-2.1	363	13	64	2945
C1 - VHM	185	-0.6	504	9	93	1640

* Calicatas realizadas en distintas fechas.

3.5. Estimación del equivalente en agua de nieve en terreno.

En las campañas de terreno efectuadas en 2012, 2013 y 2014 se obtienen: (1) calicatas (explicadas en el apartado anterior), (2) transectas en esquí y/o a pie, (3) grillas medidas a pie en las estaciones Cerro Vega Negra, Portillo y Laguna Negra y Nevados de Chillán (esta actividad no fue realizada para los tres años). En este estudio se presentan las tres primeras actividades dejando de lado los datos de rutas de nieve que son de interés de la Dirección General de Aguas y de los cuales solo interesa para efectos de este informe (1) el valor del equivalente en agua de nieve máximo publicado en el "Pronóstico de Disponibilidad de Agua" (PDA) y (2) el registro a la fecha del equivalente en agua de nieve de cada snow pillow. A continuación se presenta (**Figura 3.2a - k**) mapas (en orden según latitud de la zona) no escalados de la ubicación del muestreo realizado (transectas es esquí - pie y grillas) para las cuencas pilotos monitoreadas y las 3 zonas con estaciones nivométricas (snow pillows) analizadas. En la **Tabla 3.5** se presenta el resumen del muestreo por año. Cabe destacar que en las figuras mostradas a continuación se explicitan las laderas muestreadas y la dirección de descenso con una flecha blanca, además del año de cada conjunto muestral. En el caso de las grillas se han desplazado levemente los puntos de cada año a modo de privilegiar la visualización de los puntos en cada año muestreado. En la **Tabla 3.6** se muestra un resumen del rango fisiográfico que fue cubierto por el muestreo del espesor del manto nival en cada campaña de terreno (sólo por concepto de transectas). En el caso de la orientación, se presentan las variables transformadas $\cos(A_N)$ que da cuenca del rango de orientación este (positivo) - oeste (negativo), y $\sin(A_N)$ que da cuenca del rango de orientación norte (positivo) - sur (negativo). Esta transformación surge de la necesidad de representar la tendencia

media del conjunto muestral respecto a esta característica fisiográfica cíclica dado que el rango no refleja la naturaleza muestral observada en terreno.

Tabla 3.5.- Resumen del muestreo de la altura nival - calicatas y respectiva estimación del equivalente en agua de nieve (valor promedio, desviación estándar y rango observado en terreno).

	Espesor del manto nival promedio [cm]	Densidad del manto nival considerada [Kg/m ³]	Promedio del SWE estimado [cm]	Desviación Estándar del SWE estimado [cm]	Rango del SWE estimado [cm]
CAMPAÑAS DE TERENO - TRANSECTAS - AÑO 2012					
CVN	85	301	26	12	70 - 4
MAR	141	373	53	23	112 - 4
MOR	142	412	59	36	124 - 15
OBL	144	411	59	26	123 - 0
CVN (grilla)	64	315	20	11	64 - 4
POR (grilla)	41	410	17	18	123 - 0
CAMPAÑAS DE TERENO - TRANSECTAS - AÑO 2013					
CVN	96	360	35	18	104 - 5
ODA	153	355	54	22	131 - 10
VHM	235 / 144*	416	98 / 60*	24 / 24*	127 - 3 / 123* - 7*
CVN (grilla)	90	352	32	15	82 - 1
POR (grilla)	91	392	36	21	112 - 0
LAG (grilla)	120	455	55	25	177 - 34
CAMPAÑAS DE TERENO - TRANSECTAS - AÑO 2014					
CVN	46	316	15	10	62 - 0
MOR	127	401	51	25	119 - 0
LVD	195	365	71	29	126 - 0
OBL	117	363	42	24	121 - 0
RBL	176	354	62	29	121 - 0
VHM	164 / 192*	504	83 / 98*	40 / 24*	38 - 151 / 53 - 150
CVN (grilla)	46	325	15	7	44 - 0
POR (grilla)	36	424	15	14	85 - 0
LAG (grilla)	65	365	24	11	54 - 0

Tabla 3.6.- Resumen del muestreo (transectas) en términos de equivalente en agua de nieve respecto a la fisiografía muestreada y el número de puntos muestreados.

	Número de muestras	Rango de elevación [m.s.n.m.]	Promedio orientación Este - Oeste [-1,1]	Promedio orientación Norte - Sur [-1,1]	Rango de pendiente [°]	Rango de MUS [°]	Rango de SIR [W/m ² /h]
CAMPAÑAS DE TERENO - TRANSECTAS - AÑO 2012							
CVN	88	3525 , 3868	0.21	-0.59	2 , 41	-17 , 36	67 , 320
MAR	163	2930 , 4090	-0.14	-0.23	2 - 43	-41 , 50	125 , 313
MOR	152	2366 , 3358	0.11	-0.40	2 , 46	-29 , 39	90 - 296
OBL	309	3160 , 2755	-0.45	-0.52	0 , 35	-13 , 27	84 , 296
CAMPAÑAS DE TERENO - TRANSECTAS - AÑO 2013							
CVN	162	3488 , 3850	0.20	-0.56	1 , 42	-19 , 37	79 , 315
ODA	300	2902 , 3957	-0.25	-0.49	2 , 46	-33 , 40	95 , 322
VHM	104 / 216*	1969 , 2504 / 1610* , 1958*	-0.65 / -0.26	-0.58 / -0.19	9 , 42 / 4* , 33*	-2 , 40 / ***	50 , 236 / 78* , 332
CAMPAÑAS DE TERENO - TRANSECTAS - AÑO 2014							
CVN	234	3509 , 3863	0.00	-0.48	0.7 , 40	-17 , 45	66 - 320
MOR	332	2370 , 3585	0.16	-0.08	3 , 49	-36 , 52	151 - 239
LVD	181	3056 , 3746	0.30	0.42	3 , 43	-27 , 14	86 , 367
OBL	334	2767 , 3154	-0.38	-0.52	1 , 40	-14 , 23	104 , 309
RBL	99	2797 , 3924	0.00	-0.48	3 , 43	-7 , 10	107 , 340
VHM	14 / 81*	1962 , 2499 / 1624* , 1804*	-0.56 / -0.24	-0.69 / -0.93	6 , 35 / 8* , 32*	2 , 26 / ***	81 , 225 / 74* , 208*

* Hace referencia a la zona boscosa con follaje (asterisco) y sin follaje (sin asterisco) respectivamente.

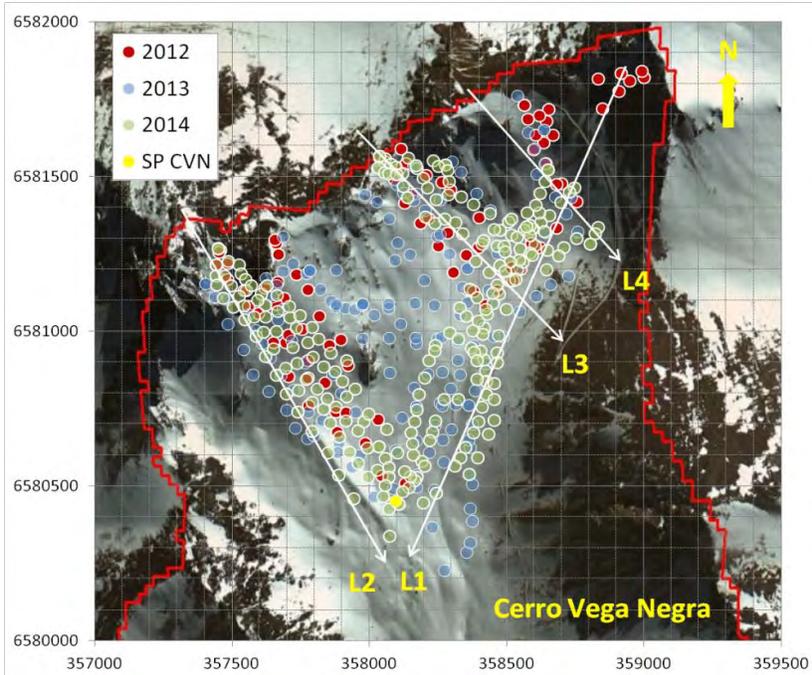


Figura 3.2a.- Campañas de terreno - Cerro Vega Negra - transectas.

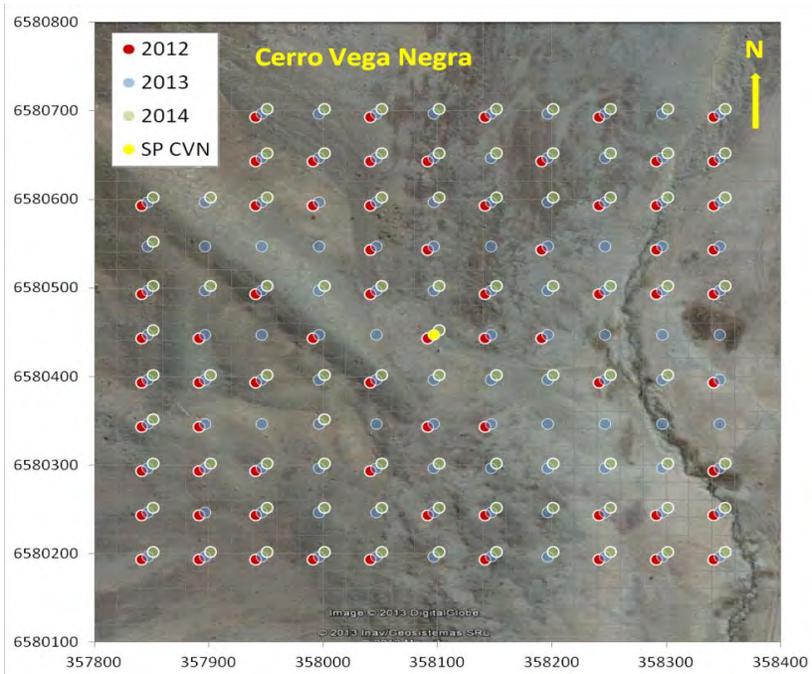


Figura 3.2b.- Campañas de terreno - Cerro Vega Negra - grilla entorno al SP.



Figura 3.2c.- Campañas de terreno - Ojos de Agua - transectas.

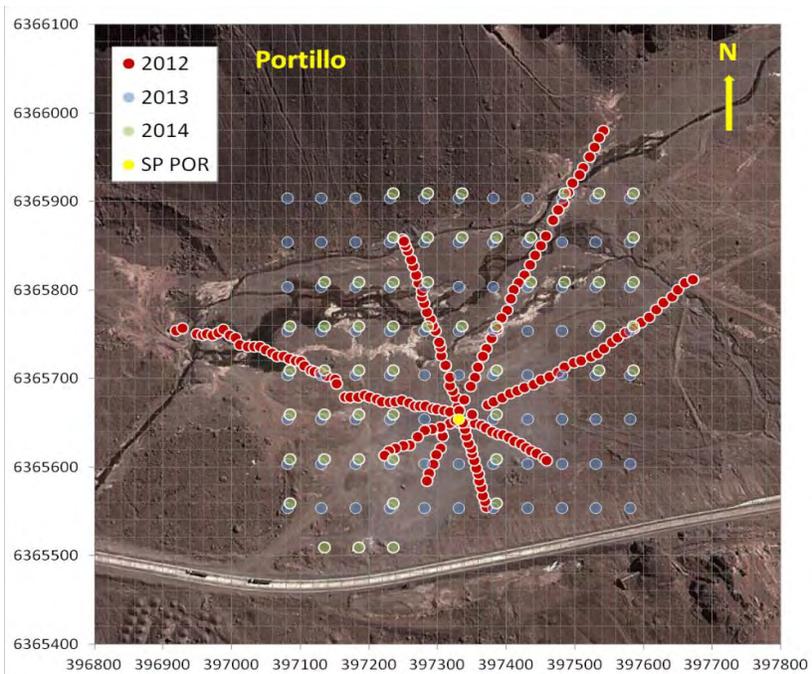


Figura 3.2d.- Campañas de terreno - Portillo - grilla entorno al SP.

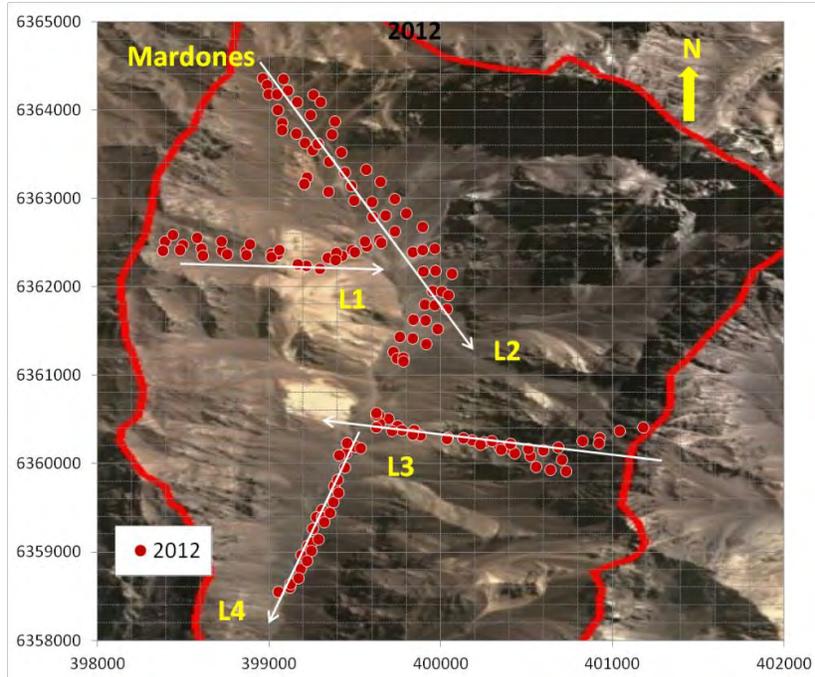


Figura 3.2e.- Campañas de terreno - Mardones- transectas.

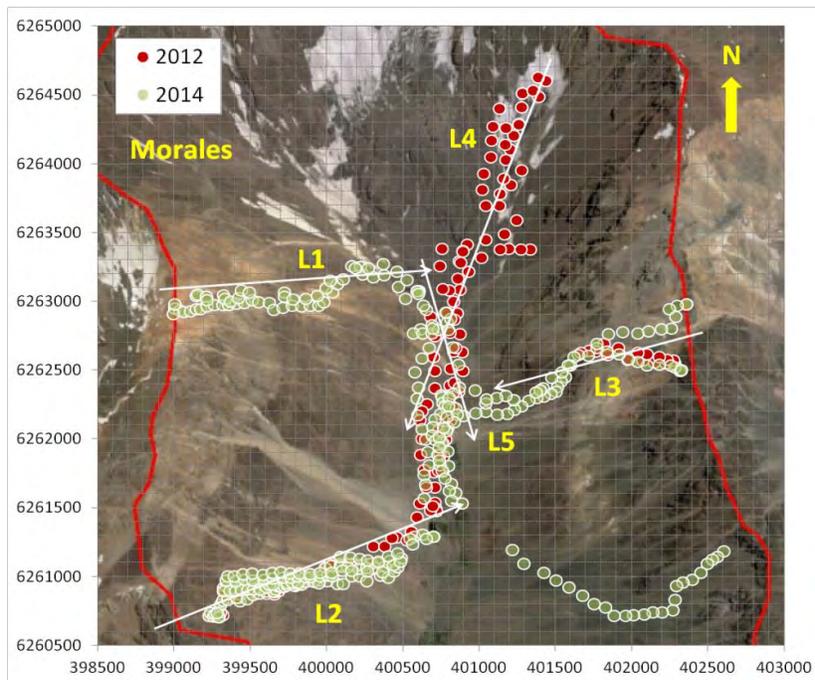


Figura 3.2f.- Campañas de terreno - Morales- transectas.

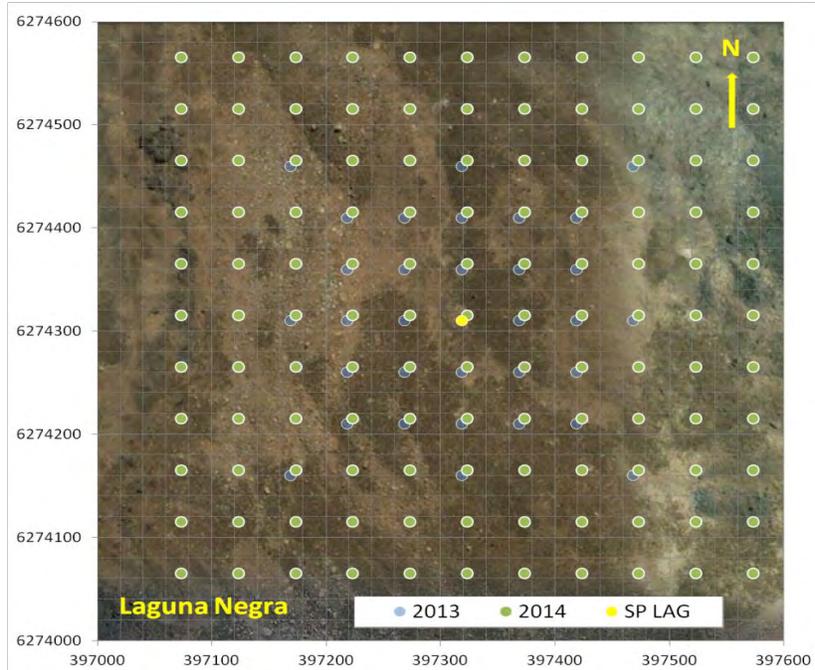


Figura 3.2g.- Campañas de terreno - Laguna Negra - grilla entorno al SP.

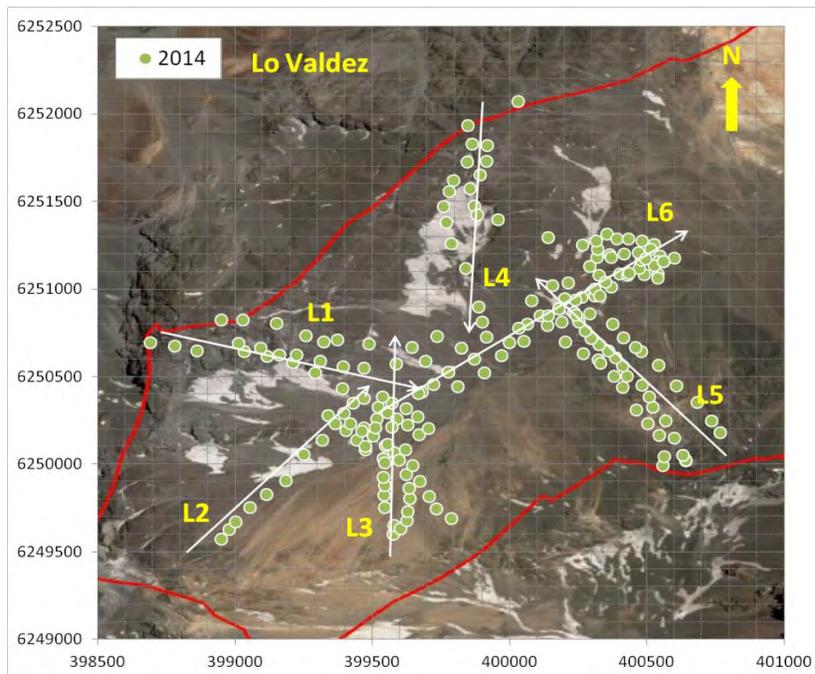


Figura 3.2h.- Campañas de terreno - Lo Valdez - transectas.

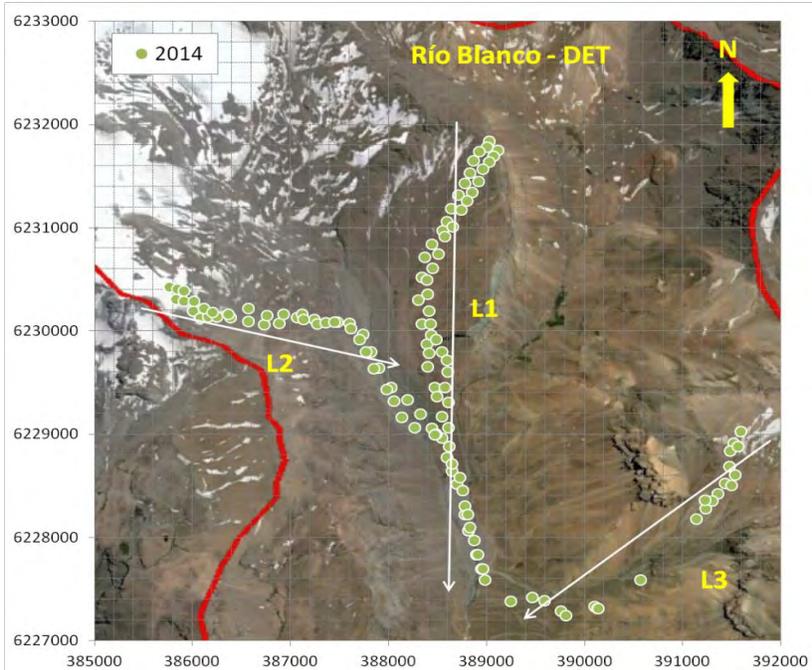


Figura 3.2i.- Campañas de terreno - Río Blanco (DET) - transectas.

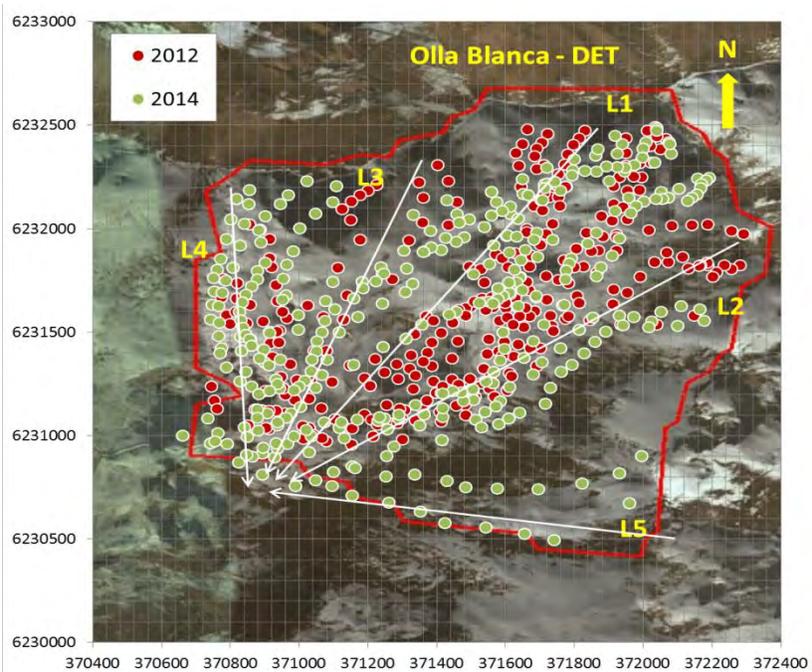


Figura 3.2j.- Campañas de terreno - Olla Blanca - DET - transectas.

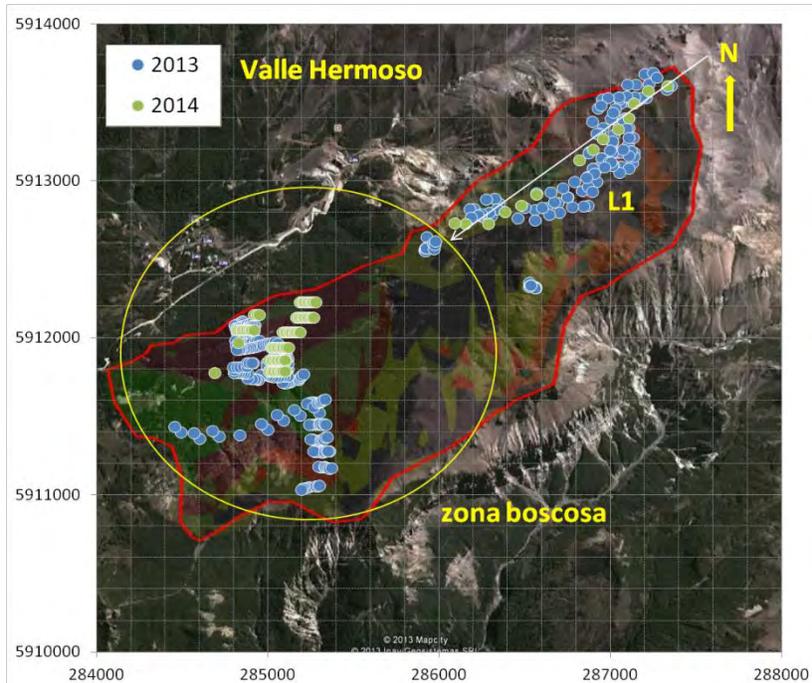


Figura 3.2k.- Campañas de terreno – Valle Hermoso – transectas.

En el capítulo de **Anexos** se presenta una breve muestra de fotografías tomadas en los terrenos de los años 2012, 2013 y 2014 en los principales puntos de muestreo. Esta muestra incluye fotografías de las tres estaciones nivométricas visitadas, de las transectas en esquí, a pie y grillas replanteadas así como del muestreo del manto nival.

4. MODELACIÓN DISTRIBUIDA DEL EQUIVALENTE EN AGUA DE NIEVE PARA EL PERIODO DE DESHIELO.

La modelación distribuida del equivalente en agua de nieve presentada a continuación comprende la generación de forzantes y parámetros asociados con la correcta representación del dominio de modelación espacio - temporal. Además se presenta un breve análisis de los resultados desde el punto de vista fisiográfico y la validación del modelo respecto a datos puntuales y a los patrones de acumulación nival observados en terreno.

4.1. Metodología para la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve para el periodo de deshielo.

A continuación se explica de manera detallada la metodología para la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve para el periodo de deshielo considerando la incorporación de información satelital distribuida y puntual en terreno (derivada de **Cornwell y McPhee, 2014b**). El equivalente en agua de nieve SWE presente en el manto nival corresponde al agua contenida en forma líquida y sólida. Se calcula según [4.1] considerando la altura del manto nival (H) y la razón entre la densidad de la nieve y el agua (ρ_s/ρ_w). Tanto la altura como la densidad del manto nival son observadas y estimadas en terreno mediante distintas técnicas de campo explicadas anteriormente.

$$SWE = H \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad [4.1]$$

El derretimiento potencial (máximo que podría ocurrir siempre y cuando su valor neto sea positivo) es calculado mediante el planteamiento semi empírico grado día extendido (**Brubaker, 1996; Ohmura (2000)** - según [4.2]) basado en la consideración del aporte energético de la radiación neta (onda corta - Q_{nsw} y larga - Q_{nlw}) y el aporte de los flujos energéticos turbulentos de calor sensible y latente aproximados como función lineal de la temperatura - índice grado día (T_d). En el caso de los flujos energéticos radiativos, estos son transformados a masa derretida de agua por el factor $f_{rnet} = 0.26$ [mm/W/m²/día], valor derivado de la expresión (3) en donde L_f corresponde al calor de fusión latente del agua y $B = 0.97$ la calidad térmica de la nieve estándar para el periodo de derretimiento.

$$M_p = \max\{(Q_{nsw} + Q_{nlw} + (T_d) \bar{a}_r / f_{rnet}) f_{rnet}, 0\} \quad [4.2]$$

$$f_{rnet} = (\rho_w L_f B)^{-1} \quad [4.3]$$

El parámetro a_r da cuenta de la relación lineal entre los flujos turbulentos y la temperatura - índice grado día. Este parámetro puede ser calculado a nivel diario y promediado para el periodo de deshielo o calculado en base a valores promedios

(**Brubaker, 1996**). Además se puede calibrar si se conoce la temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento y derretimiento en un punto determinado, es decir, en una estación climatológica con snow pillow / scale. La ecuación [4.2] corresponde al balance de energía (potencial) sobre el manto nival. El derretimiento potencial (M_p) asume la existencia de nieve sobre el dominio espacial de cálculo (en el caso de un modelo grillado, el pixel). Para dar cuenta del agotamiento de la cobertura nival, se considera el derretimiento real (M) como el escalamiento del derretimiento potencial por el valor porcentual de la cobertura nival fraccional ($FSCA$) (**Molotch y Bales, 2005; Hall et al., 2000**) según [4.4].

$$M = (M_p)FSCA \quad [4.4]$$

El equivalente en agua de nieve puede ser calculado, según la dirección temporal de modelación, de dos formas. La primera, modelo "hacia adelante o *forward*" calcula el equivalente en agua de nieve considerando el proceso de acumulación - derretimiento que ocurre en el periodo de acumulación nival (Mayo - Agosto). Para esto se requiere del conocimiento acabado de la distribución espacial de la precipitación, de su relación con la orografía - elevación, latitud, oscilaciones del océano pacífico y circulación del viento a nivel regional. Dado que este problema es complejo se opta por la segunda opción "hacia atrás o *backward*" que calcula el equivalente en agua de nieve asumiendo conocido el máximo y descontando los pulsos de derretimiento diario, sublimación y precipitación. En el periodo de derretimiento (Septiembre - Diciembre) se asume que la presencia de nevadas es despreciable y que el efecto de pérdida de masa por sublimación es mucho menor al derretimiento del manto nival. La condición de borde (SWE_0 - ecuación [4.5]) se obtiene de sumar todo el derretimiento calculado imponiendo dicha suma sobre un dominio temporal lo suficientemente largo que asegure que la cobertura nival (o equivalente en agua de nieve) al finalizar dicho periodo sea nula o mínima (**Cline et al., 1998; Marks et al., 1992**) ([4.6]).

$$SWE_t = SWE_0 - \sum_1^t M_t = M_t + SWE_{t+1} \quad [4.5]$$

$$SWE_0 = \sum_1^N M_t \quad t q. \quad SWE_N \approx 0 \quad [4.6]$$

En la ecuación [4.6] se advierte que el hecho de que la condición de borde SWE_0 se calcule de la suma de los derretimientos futuros es equivalente a una expresión recursiva "hacia atrás" para SWE_t en función de SWE_{t+1} y M_t considerando la nueva condición de borde $SWE_N \approx 0$. La ecuación [4.5] es corresponde al balance de masa sobre el manto nival.

Los términos de la ecuación [4.2] se explican a continuación. En el caso de Q_{nsw} , este término corresponde al balance del flujo de energía de onda corta a cielo claro neto

expresado en función del albedo nival (α_s) (**Molotch y Bales, 2006**) en el cual se incluye el efecto atenuador de la nubosidad mediante el ponderador de **Linacre (1992)** en función de las horas sol diarias (H_s) registradas en alguna estación base. En el caso de existir cubierta de bosques, se observa un efecto atenuador ejercida por esta sobre la transmisión de la onda corta incidente expresada en función del parámetro κ (tipo de especie vegetal) y el índice de superficie foliar ("leaf area index"). El flujo de energía de onda corta Q_{nsw} se expresa según **[4.7]**. El valor representativo de las especies de bosque en los distintos clusters será supuesto como el promedio de distintas especies presentadas en la **Tabla 4.1**, es decir, $\kappa = 0.52$. El índice de superficie foliada se relacionará indirectamente para efectos de esta metodología con el índice normalizado de diferencia de vegetación ($NDVI$) según **[4.8]** (**Pontailier et al., 2003**).

$$Q_{nsw} = (1 - \alpha_s) \left(K_{\downarrow} \left(0.25 + 0.5 \frac{H_s}{12.5} \right) \right) e^{(-\kappa LAI)} \quad [4.7]$$

$$LAI = -1.323 \ln \left(\frac{0.88 - NDVI}{0.72} \right) \quad [4.8]$$

La radiación solar incidente a cielo claro potencial (K_{\downarrow}) considera la variación astronómica de esta variable para un pixel en el espacio sujeto a efectos de sombras dados por la topografía de las vecindades. Además, considera el efecto atenuador de la atmósfera por los procesos de absorción, dispersión y difusión resumidos en el parámetro de turbiedad atmosférica de Linke supuesto para zonas de montaña como $TLK = 2.0$ (**Hofierka y Suri, 2000**). El cálculo de la radiación solar incidente considerando estas atenuantes se deriva del cálculo de la radiación global incidente ($G_{c(TLK=2.0)}$) en el programa GRASS GIS de forma automática para cada día juliano mediante el modulo *r.sun*, según **[4.9]**, como la suma de la componente directa (función de la radiación al tope de la atmosfera (G_0), la turbiedad de Linke, parámetros ópticos) y la componente difusa (función de la trasmisión $T_n(TLK)$ y la función de altitud solar F_d).

$$K_{\downarrow} \approx G_{c(TLK=2.0)} = B_c(G_0, TLK, m\delta(m_r)) + D_c(T_n(TLK), F_d(h_0)) \quad [4.9]$$

En el caso de Q_{nlw} , este término (**[4.10]**) corresponde al flujo de energía de onda larga que considera la fracción de cobertura boscosa (F_{sf}) supuesta igual al valor del $NDVI$, la emisividad de la nieve, supuesta como $\varepsilon_s = 0.97$ y la del follaje como $\varepsilon_f = 0.98$, la temperatura media del aire (T_a) y de la superficie del manto nival (T_s). La constante σ corresponde a la constante de Stefan - Boltzmann. La radiación de onda larga incidente (L_{\downarrow}) se expresa según **[4.11]** (**DeWalle y Rango, 2008**) en función de la presión de vapor relacionada con la temperatura del aire a una humedad relativa del aire estándar encontrada en los snow pillows promedio igual al 25% según la expresión empírica presentada en **[4.11]**.

$$Q_{nlw} = L_{\downarrow}(1 - F_{sf})\varepsilon_s + \sigma T_a^4 F_{sf} \varepsilon_{sf} - \sigma T_s^4 \varepsilon_s \quad [4.10]$$

$$L_{\downarrow} = 0.575 e_a^{1/7} \sigma T_a^4 ; e_{a(HR=25\%)} = 1.53 e^{(0.076 T_a)} \quad [4.11]$$

Como se advierte, el modelo de balance de energía (y por consecuencia, el de masa) están basados en la radiación solar incidente a cielo claro potencial y la atenuación nubosa añadida, el albedo nival, la temperatura - índice grado día, temperatura del aire y superficie nival. Respecto a la fisiografía, los términos radiativos de onda corta estarán influenciados mayormente por la orientación del pixel dado que estarán estrechamente vinculados a la radiación (efecto sombra y la astronomía de posición del sol). Los términos radiativos de onda larga y la derivación semi empírica de los flujos turbulentos estarán influenciados mayormente por la elevación del pixel dados que estarán estrechamente vinculados distintos tipos de temperaturas.

La temperatura - índice grado día se define en esta metodología según [4.12], considerando temperaturas del aire media diarias. La temperatura media diaria del aire se define según [4.12] considerando el promedio simple de los datos extremos dado que no existen datos medios reales en todas las estaciones necesarias para la modelación. La temperatura de la superficie del manto nival se estima según [4.12] considerando un umbral mínimo de 2.5 °C bajo la temperatura de la capa de aire cercana al manto nival (2 a 5 metros) (Brubaker, 1996).

$$T_d = \max(T_a, 0) ; T_s = \min(T_a - 2.5, 0) ; T_a = (T_{a \max} + T_{a \min})/2 \quad [4.12]$$

La extrapolación en el espacio de la temperatura del aire es comúnmente realizada con gradientes lineales calculados en base a dos o más estaciones que abarquen un rango de elevación significativo para el dominio espacial de modelación. Sin embargo, la escala del problema presentado hace evidente el desconocimiento de los gradientes térmicos reales en altura (sobre los 2500 m.s.n.m.) dado que existe solo una estación meteorológica en el mejor de los casos en cada cluster. Para eliminar esta incertidumbre (importante en este tipo de modelos fuertemente dependientes de la temperatura en zonas altas) se decide incorporar la información semanal de la temperatura superficial mapeada (*LST*) (Neteler et al., 2010) a modo de crear un patrón espacial de temperatura. Para esto se correlacionan pixel a pixel los valores semanales de temperatura *LST* y el promedio semanal de la temperatura media diaria del aire registrada en distintas estaciones a modo de caracterizar por zona la relación entre ambas variables. Tras obtener una relación promedio entre ambas variables por cluster ([4.13]) (promediando la pendiente y offset de las correlaciones zonales) se plantea la ecuación de extrapolación ([4.14]) para la temperatura media diaria del aire mapeada ($T_{a \text{ día } [i,j]}$). Esta expresión rescata la variabilidad diaria de la temperatura según una estación base ($T_{a \text{ día } (i^*,j^*)}$) y el patrón espacial (semanal) dado la razón entre la temperatura *LST* en un pixel cualquiera y la temperatura *LST* en la estación base.

$$T_{a \text{ LST sem.}} = \bar{m} LST_{sem.} + \bar{n} \quad (\forall i, j) \quad [4.13]$$

$$T_{a \text{ día } [i,j]} = T_{a \text{ día } (i*,j*)} \left(\frac{T_{a \text{ LST sem. } [i,j]}}{T_{a \text{ LST sem. } (i*,j*)}} \right) \quad [4.14]$$

Es importante enunciar algunos alcances. Primero, el carácter distribuido (espacial) de la modelación hacen que la cobertura nival fraccional, el albedo nival, la cobertura boscosa derivada del *NDVI*, la radiación solar y la temperatura sean distribuidas en el espacio. Las primeras tres son rescatadas directamente de productos satelitales MODIS previamente post - procesados. El caso de la radiación solar incidente es directo del cálculo en base a la fecha, elevación, orientación y pendiente del terreno (fisiografía entregada por un SIG). En el caso de la temperatura del aire, se extrapola mediante el patrón espacial entregado por el producto satelital (previamente post - procesado) *LST* derivado de MODIS. Es importante tener en claro que paralelamente a los productos satelitales espaciales, el modelo requiere de datos diarios en estaciones base de temperatura media (o extremas) del aire (sensor de temperatura) y horas sol (heliógrafo). Segundo, el modelo de reconstrucción del equivalente en agua de nieve retrospectivo asume mínima o nula existencia de nevadas (esto se discutirá más adelante) para asegurar que el agotamiento del manto nival observado mediante MODIS es efecto directo y único del derretimiento acumulado hasta la fecha de máxima acumulación nival. Tercero, el modelo planteado no considera redistribución eólica ni mecánica (avalanchas) de la nieve de manera explícita, Sin embargo, ambos procesos están incluidos de manera indirecta en el producto MOD10A1 para una escala de resolución de 500 metros., procesos que inciden en la distribución espacial del manto nival y, por ende, en la duración de la cobertura nival observada por el satélite.

Retomando la ecuación [4.1], es importante recordar que el balance de masa - energía semi empírico para el manto nival aquí presentado modela el equivalente en agua de nieve, es decir, la columna de agua asociada al manto nival. Para validar esta modelación (o, en efecto, calibrar los parámetros necesarios según datos en terreno) es necesario hacerlo respecto al equivalente en agua de nieve observado en terreno, es decir, se deberá tener una estimación promedio de la densidad del manto nival.

Tabla 4.1.- Parámetro κ para diferentes tipos de especies vegetales (bosques).

Especie arbórea	Parámetro κ (bosque medianamente denso)
Bosque de coníferas	0.48
Bosque de robles	0.42
Bosque de nogales	0.58
Bosque de álamos	0.60
Promedio	0.52

4.2. Metodología para la estimación de información satelital MODIS por efecto de cobertura nubosa.

Comúnmente, las variables distribuidas provenientes de información satelital están afectas a errores de adquisición tales como, intercepción de la señal de reflectancia

terrestre por nubosidad, saturación del sensor, errores de visualización nocturna, etc. La metodología de post - procesamiento para cada producto satelital se resume brevemente a continuación. Las series temporales de datos sin corrección (sin cobertura nubosa) y la serie estimada a partir de estos últimos se presentan en la **Figura A3.1 (Anexos)**.

Fracción de cobertura nival y albedo nival (producto satelital MOD10A1).

La estimación de los pixeles sin información (nulos) se realiza mediante un algoritmo de tres pasos basado en el trabajo de **Gafurov y Bárdossy (2008)** y **López – Burgos et al. (2013)**. El primer paso consiste en la estimación de los pixeles nulos mediante los promedios temporales considerando los pixeles validos de los días antecesores y sucesores con hasta 3 días de propagación. Definiendo x_0 como el pixel original se tiene que, el pixel post - procesado en el paso 1 (x_1) que estimará el pixel nulo original queda definido en función del día t como:

$$x_{1,t} = \begin{cases} \frac{x_{0,t-1} + x_{0,t+1}}{2} & \text{si } x_{0,t-1} \wedge x_{0,t+1} \neq \text{nulo} ; \text{ si no} \\ x_{0,t-1} & \text{si } x_{0,t-1} \neq \text{nulo} ; \text{ si no} \\ x_{0,t+1} & \text{si } x_{0,t+1} \neq \text{nulo} ; \text{ si no} \end{cases} \quad [4.15a]$$

$$x_{1,t} = \begin{cases} \frac{x_{0,t-2} + x_{0,t+2}}{2} & \text{si } x_{0,t-2} \wedge x_{0,t+2} \neq \text{nulo} ; \text{ si no} \\ x_{0,t-2} & \text{si } x_{0,t-2} \neq \text{nulo} ; \text{ si no} \\ x_{0,t+2} & \text{si } x_{0,t+2} \neq \text{nulo} ; \text{ si no} \end{cases} \quad [4.15b]$$

$$x_{1,t} = \frac{x_{0,t-3} + x_{0,t+3}}{2} \quad \text{si } x_{0,t-3} \wedge x_{0,t+3} \neq \text{nulo} \quad [4.15c]$$

El segundo paso considera el promedio espacial de los ocho pixeles circundantes al pixel nulo (si es que no logró ser estimado por el paso anterior). Bajo el supuesto de que en la vecindad próxima (500 metros - resolución espacial MOD10A1), si un pixel con elevación (z) menor o igual al pixel objetivo esté cubierto total o parcialmente por nieve, es probable que el pixel objetivo también lo esté. Por ende, se estima el pixel nulo ($x_{1,i=j,t}$) mediante $x_{2,t}$ promediando la fracción de cobertura del manto nival asociada a todos los pixeles circundantes de menor elevación, es decir:

$$x_{2,t} = \sum_{i=1}^{i+1} \left(\sum_{j=1}^{j+1} x_{1,t} \cdot \delta \right) / \delta \quad \forall x_{1,t} (i \neq j) \quad [4.16]$$

$$\text{donde } \delta = \begin{cases} 1 & \text{si } x_{1,t} \neq \text{nulo} \wedge z(x_{1,t}) \leq z(x_{1,i=j,t}) \\ 0 & \text{si } x_{1,t} = \text{nulo} \vee z(x_{1,t}) > z(x_{1,i=j,t}) \end{cases}$$

El tercer paso propuesto (utilizados si es que el paso anterior no resuelve el problema de estimación de píxeles en su totalidad) involucra el comportamiento histórico para el periodo 2001 - 2012 del píxel para el día t suponiendo, como último recurso, que probablemente el píxel debiera adquirir el valor de dicho promedio histórico calculado (x_3) mediante:

$$x_{3,t} = \left(\sum_{y=1}^{12} x_{0,t} \cdot \delta \right) / \delta \quad \text{donde } \delta = \begin{cases} 1 & \text{si } x_{0,t} \neq \text{nulo} \\ 0 & \text{si } x_{0,t} = \text{nulo} \end{cases} \quad [4.17]$$

Cabe destacar que tanto la fracción de cobertura nival como el albedo nival comparten el algoritmo de tres pasos de post - procesamiento dado que comparten directa relación física en cuanto a la dinámica de recarga y decaimiento con las siguientes salvedades (1) dependiendo de la intensidad y disposición espacial de una nevada, el manto nival puede recuperar distintos valores para la variables *FSCA*, variabilidad que generalmente no sucede en el albedo nival dado que la nieve fresca suele presentar valores entorno a 0.8 - 0.9, (2) los rango mínimos para ambas variables son distintos, siendo 0.25 (**O'Neil y Gray, 1997**) un albedo nival mínimo admisible (nieve muy sucia y madura). Otro aspecto importante del algoritmo es el hecho de que cada paso solo estima píxeles a partir de los píxeles validos originales, disposición acoplada a un esquema de estimación progresivo (es decir, utilizando los píxeles originales y estimados previamente).

Temperatura superficial (producto satelital MOD11A2).

En el caso de la temperatura superficial, la estimación de los píxeles sin información (nulos) se realiza mediante un algoritmo de dos pasos basados en el trabajo de **Páez y Vargas (2012)**. El primer paso considera una estimación temporal de los píxeles nulos similar a la utilizada en el paso 1 del producto MODIS10A1. El segundo paso considera la relación existente a nivel espacial entre la elevación y la temperatura del aire (supuesta dicha relación como existente también en el caso de la temperatura superficial). Mediante una regresión lineal respecto a la elevación caracterizada por el producto ASTER GDEM (z) se obtiene $x_{2,t}$ el cual estima al píxel nulo correspondiente mediante el factor de proporcionalidad a y el offset b obtenidos de la correlación lineal píxel a píxel para el día t dado durante los 12 años estudiados como:

$$x_{2,t} = a \cdot z + b \quad [4.18]$$

Cabe destacar que las correlaciones encontradas son en general aceptables (**Tabla 4.3**) pudiendo advertir que si bien, existe una relación entre el producto *LST* y la elevación, esta relación no es explícita a cabalidad la disposición espacial de la temperatura superficial. Entendiendo que existe una relación entre la temperatura del aire y la temperatura superficial es evidente que la utilización de gradientes térmicos de la temperatura del aire para la extrapolación espacial (sea estos constantes o

variables en el tiempo) no resuelve el problema de extrapolación térmica en la interfaz aire - manto nival por lo que la utilización y escalamiento de productos mapeados similares a la temperatura del aire debería ser considerada como una metodología paralela a la construcción de gradientes lineales que., por lo demás, son difíciles de obtener dada la escases de estaciones climatológicas dispuestas en un rango de elevaciones importantes (en el contexto de alta montaña) para una cuenca o región en particular.

Índice normalizado de diferencia de vegetación (producto satelital MOD13Q1).

Se estima a partir del análisis de imágenes MODIS de *NDVI* de 250 metros de resolución espacial considerando días (1) de verano y (2) con escasa o nula nubosidad. Con esto se obtendrá la mejor imagen satelital posible. Aquellas zonas cubiertas por glaciares o nieves eternas no muestran un valor para el *NDVI*. Estas zonas son manualmente asignadas como $NDVI = 0.05$ (valor umbral mínimo asignado a todo el dominio de modelación).

4.3. Dominio de la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve.

La escala temporal adoptada para efectos de este estudio corresponde a una escala diaria y comprende la modelación desde el 15 de Agosto al 15 de Enero para los años 2001 (inicio de la misión TERRA) al 2012. El rango diario comprende a un rango de seguridad para alcanzar la máxima acumulación nival y la condición de borde de cobertura nival nula (despreciando el aporte hídrico de los glaciares (ecuación **[4.6]**). La escala espacial comúnmente utilizada para la modelación del agotamiento nival comprende desde la escala de decenas (ej. plataforma LANDSAT) a la escala de 500 metros (ej. plataforma MODIS), estando directamente relacionada con el producto satelital de cobertura nival utilizado. Dada la gratuidad del producto MOD10A1 Terra de MODIS, su facilidad de descarga, almacenamiento, pre y post procesamiento así como su alta resolución temporal (diaria) se ha decidido utilizar este producto como producto base (resolución espacial) para la modelación distribuida. Otro aspecto importante es la extensión base del dominio espacial de modelación. Se decidió para efectos científicos modelar entre las latitudes 27° sur a 38° sur y para cuencas seleccionadas entre las precordilleras chilena y argentina (72° oeste a 69° oeste) con una resolución espacial de 500 metros lo que implica el trabajo sobre un mosaico compuesto por 3 imágenes satelitales "crudas" (**Figura 4.1**).

Otro aspecto importante es que, a diferencia de otras fuentes de información satelital, MODIS ofrece productos satelitales con la calibración radiométrica, correcciones atmosféricas y geográficas y georeferenciación previamente procesadas, entregando directamente variables físicas o índices asociados a estas y no valores de reflectancia o temperatura de brillo asociados a rangos netamente radiométricos.

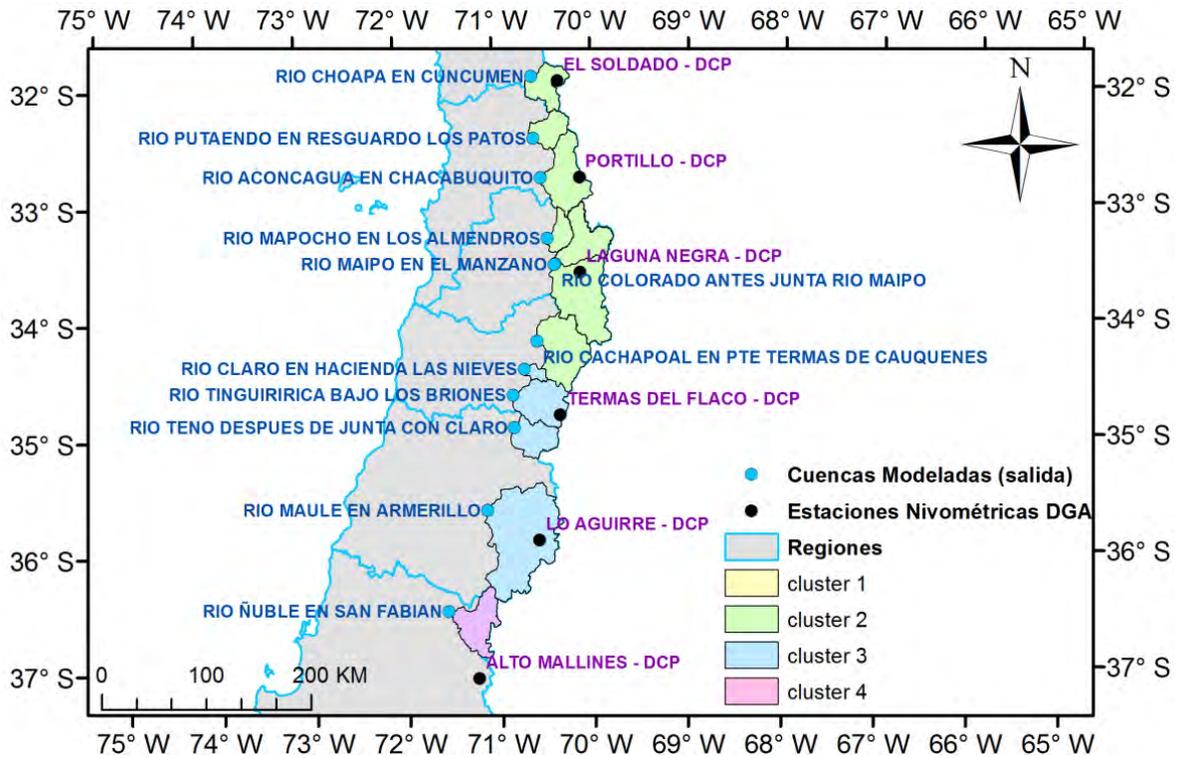
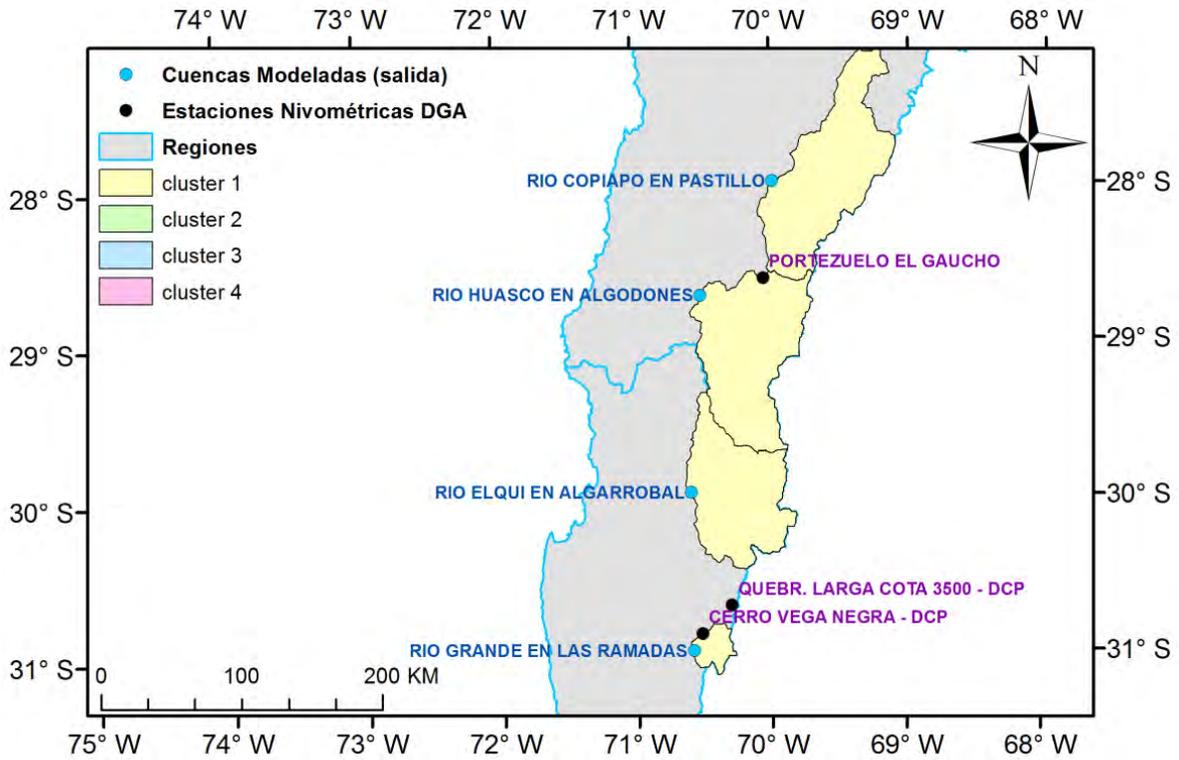


Figura 4.1.- Mapa general de las cuencas modeladas / pronosticadas (2013 – 2014).

4.4. Generación de forzantes meteorológicas distribuidas y cálculo de parámetros agregados.

La modelación del equivalente en agua de nieve distribuido requiere de la generación de forzantes meteorológicas distribuidas, series de tiempo de temperatura del aire y horas sol registradas en estaciones base y la calibración del parámetro \bar{a}_r , entendido como el valor promedio del parámetro calculado mediante distintas metodologías.

Forzantes distribuidas y estaciones meteorológicas base.

Como se explica en la metodología, las forzantes meteorológicas distribuidas requeridas para la modelación corresponden a la temperatura superficial (producto satelital *LST* de MODIS) el cual se utiliza para generar un patrón espacial semanal de la temperatura del aire forzado a su vez por la temperatura del aire registrada de una estación base por cluster. De manera similar, el modelo de radiación solar incidente a cielo claro generado con el módulo *r.sun* de GRASS GIS es forzado, incorporando el efecto atenuador de la nubosidad, con mediciones de horas sol de una estación por cluster. La existencia de nieve (es decir, la cobertura nival fraccional) es derivada del producto MODIS al igual que el albedo nival y el *NDVI*. En la **Tabla 4.2a - b** se resume las estaciones bases utilizadas para forzar los productos satelitales mencionados anteriormente.

Tabla 4.2a.- Resumen de variables y parámetros puntuales utilizados por cluster.

Cluster	Estación base (T_a)	\bar{m} (LST)	\bar{n} (LST)	R^2 (LST)	Estación base (H_s)	\bar{a}_r
		correlación (LST, T_a)				
CLUSTER 1	El Transito	0.50	4.57	0.67	Lautaro Embalse	-0.07
CLUSTER 2	Vilcuya	0.48	3.67	0.68	El Yeso Embalse	0.49
CLUSTER 3	Ancoa Embalse	0.64	3.28	0.76	El Yeso Embalse	0.40
CLUSTER 4	Diguillín	0.58	3.82	0.63	Digua Embalse	1.45

Tabla 4.2b.- Resumen de variables distribuidas utilizadas por cluster.

Todos los Clusters	Producto Satelital
Temperatura superficial	<i>LST</i> MODIS (MOD10A2)
Cobertura nival fraccional	<i>Snow Cover Area (FSCA)</i> MODIS (MOD10A1)
Albedo nival	<i>Snow Albedo (ALBS)</i> MODIS (MOD10A1)
NDVI	<i>Vegetation Index NDVI</i> (MOD13Q1)

En la **Figura 4.2** se presenta el registro de temperatura del aire y horas sol en las cuatro estaciones bases utilizadas en la modelación. En la **Figura 4.3** se muestra un esquema conceptual de la modelación por capas – pixel realizada. En esta figura se aprecian los distintos forzantes distribuidos y el producto final (equivalente en agua de nieve – SWE) para el dominio de modelación particular para este estudio que sólo considera las 16 cuencas pronosticadas por la Dirección General de Aguas en el reporte "Pronóstico de Disponibilidad de Agua (año 2013)".

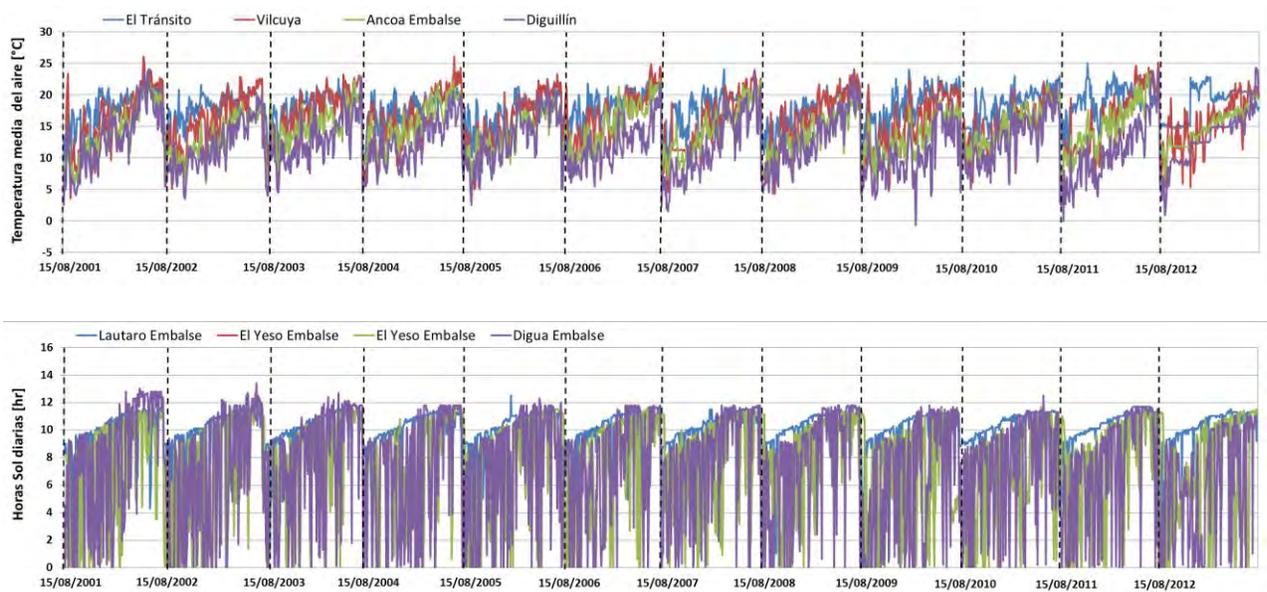


Figura 4.2.- Series de tiempo de temperatura del aire y horas sol (diarias, del 15 de Agosto al 15 de Septiembre) para las estaciones base consideradas en cada cluster.

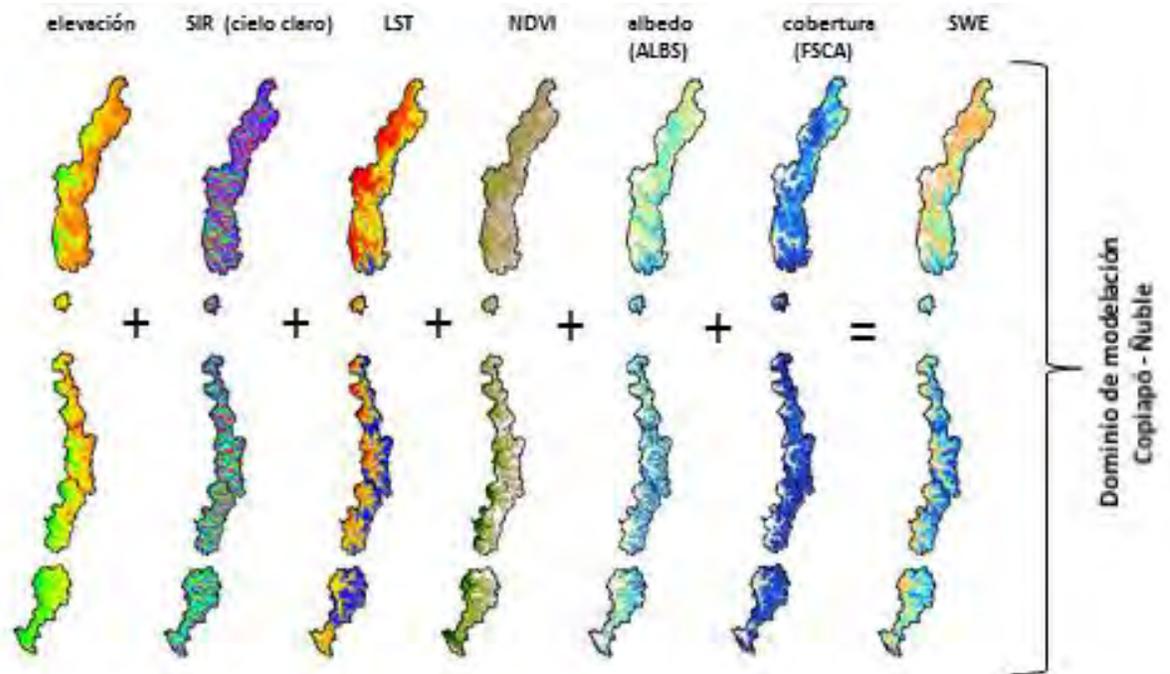


Figura 4.3.- Acoplamiento de variables distribuidas en la modelación del SWE.

El método de extrapolación de la temperatura del aire desde la estación base a todo el dominio espacial de cada cluster supone un modelo lineal entre la temperatura superficial y la temperatura del aire construido para múltiples estaciones meteorológicas. En la **Tabla 4.3** se presenta el resultado de los ajustes lineales así como el valor promedio para la pendiente y offset de los ajustes lineales presentados por cluster (ecuaciones [4.12], [4.13], [4.14]).

**Tabla 4.3.- Ajuste lineal por estación y cuenca para $T_a = m \cdot LST + n$.
Los snow pillows son destacados en color.**

Clusters	Cuencas	Estación (T_a)	m	n	R ²
CLUSTER 1	Copiapó	Iglesia Colorado	0.68	1.57	0.62
		Lautaro Embalse	0.46	6.77	0.59
		Los Loros	0.58	3.27	0.66
		Promedio	0.57	3.87	0.62
	Huasco	El Transito	0.49	6.04	0.63
		Conay	0.44	8.17	0.71
		San Félix	0.47	7.77	0.61
		Santa Juana	0.59	4.01	0.8
		Portezuelo El Gaucho	0.48	-3.03	0.57
	Promedio	0.49	4.59	0.66	
	Elqui	La Ortiga	0.53	4.78	0.74
		Hurtado	0.45	7.28	0.77
		Promedio	0.49	6.03	0.76
	Grande	Las Ramadas	0.48	7.57	0.74
		Carén	0.53	5.71	0.62
Cerro Vega Negra		0.37	-1.86	0.58	
Promedio		0.46	3.81	0.65	
CLUSTER 2	Choapa	La Tranquila	0.5	7.29	0.71
		Alicachue	0.46	5.65	0.47
		El Soldado	0.35	-0.7	0.73
		Promedio	0.44	4.08	0.64
	Putando - Aconcagua	Vilcuya	0.55	4.6	0.71
		Portillo	0.35	1.8	0.65
		Promedio	0.45	3.2	0.68
	Mapocho - Colorado - Maipo - Cachapoal	Embalse El Yeso	0.41	6.24	0.77
		Cerro Calan	0.64	4.06	0.78
		Pirque	0.55	5.24	0.66
Laguna Negra		0.36	2.36	0.6	
Rengo		0.78	0.7	0.77	
Promedio	0.55	3.72	0.72		
CLUSTER 3	Claro - Tinguiririca -Teno	Potrero Grande	0.71	2.43	0.88
		Talca UC	0.64	3.26	0.91
		Colorado Patos	0.75	2.91	0.8
		Promedio	0.7	2.87	0.86
	Maule	Ancoa Embalse	0.68	4.17	0.84
		Digua Embalse	0.81	1.63	0.84
		Parral	0.74	3.14	0.83
		Lo Aguirre	0.35	3.75	0.69
Promedio	0.65	3.17	0.8		
CLUSTER 4	Ñuble	Diguillín	0.79	1.74	0.77
		Caracol	0.57	5.71	0.6
		Alto Mallines	0.37	4.01	0.51
		Promedio	0.58	3.82	0.63

Parámetros puntuales del modelo distribuido.

La obtención del parámetro a_r (linealización respecto a la temperatura del aire grado día del flujo de energía turbulenta de calor sensible y latente) es vital para un refinamiento del modelo. Existen diversos valores enunciados en la literatura. En el trabajo de **Brubaker (1996)** se presentan valores entre 0.10 y 0.25. Se adoptarán

distintas metodologías a fin de caracterizar de mejor manera este parámetro para una condición de alta montaña a lo largo de la latitud del dominio espacial. Las variables nivométricas y meteorológicas utilizadas para estimar el parámetro a_r son extraídas directamente de los snow pillows existentes en el dominio de modelación con datos de calidad aceptable entre el año 2001 y 2012 a escala temporal diaria. Las metodologías son las siguientes:

- **Método 1:** el parámetro a_r se calcula mediante **Brubaker (1996)** (ecuación [3.2]) considerando que la humedad relativa del aire se deriva de que la temperatura de punto de rocío igual a la temperatura mínima diaria. Este cálculo entrega por lo general valores de a_r altos (**Figura 3.4 - $a_r(1)$**).
- **Método 2:** el parámetro a_r se calcula de manera similar al caso anterior con la salvedad de utilizar el valor de la humedad relativa medida en terreno. Este cálculo entrega valores menores que el método anterior, es decir, los flujos turbulentos tienen menos peso en el balance de energía sobre el manto nival (**Figura 4.4 - $a_r(2)$**).
- **Método 3:** el parámetro a_r se calibra mediante el balance de energía sin cobertura vegetal sobre la posición de la estación nivométrica, utilizando el registro de equivalente en agua de nieve del snow pillow. Los valores de a_r calibrados pueden ser bajos e incluso negativos ((**Figura 4.4 - $a_r(3)$**)).

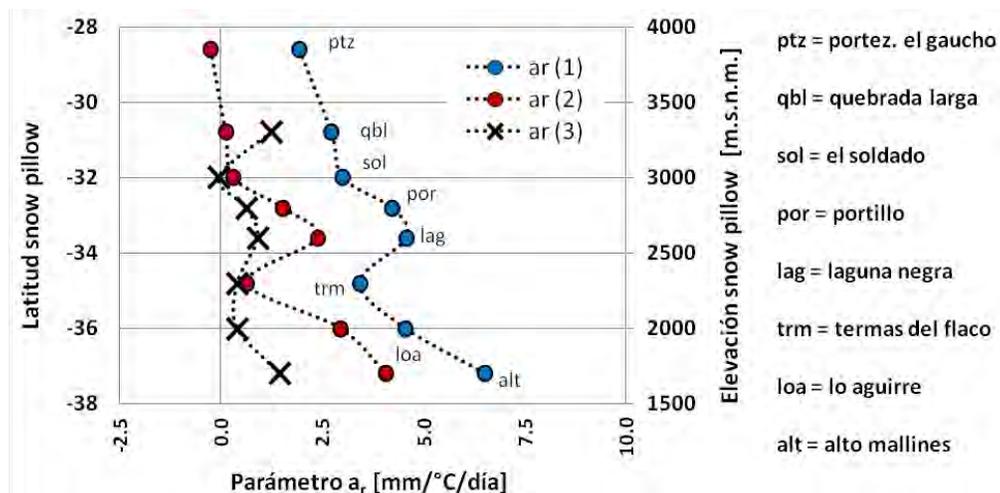


Figura 4.4.- Estimación del parámetro de flujo de energía turbulenta a_r .

Finalmente, los valores de a_r utilizados corresponderán al valor mínimo encontrado entre las metodologías 2 y 3. Esto permite reducir el sesgo a la hora de validar los resultados de la modelación con los distintos snow pillows considerados. Cada mínimo para a_r es finalmente promediado por cluster a modo de tener un conjunto parámetro - temperatura base - horas sol base único para cada cluster definido previamente en función del volumen total de deshielo (**Tabla 4.4, Tabla 4.2a**). En todos los métodos anteriormente mencionados así como en la validación temporal del modelo distribuido

se utilizan registros de los snow pillows pertenecientes a la red nivométrica actual de la Dirección General de Aguas. Las coordenadas de cada una de estas estaciones se presentan en la **Tabla A3.1 (Anexos)**.

Tabla 4.4.- Calibración del parámetro a_r según los registros de equivalente en agua de nieve máximos observados directamente en los snow-pillows (l 15 de Agosto y el 15 de Septiembre).

Snow Pillow	a_r (1)	a_r (2)	a_r (3)	R^2 a_r(3)	mín. {a_r (2), a_r (3)}
Portezuelo El Gaucho	1.93	-0.25	***	***	-0.25
Quebrada Larga	2.72	0.11	1.25	0.61	0.11
Promedio	2.33	-0.07	1.25	0.61	-0.07
El Soldado	3.00	0.31	-0.05	0.54	-0.05
Portillo	4.21	1.52	0.62	0.79	0.62
Laguna Negra	4.57	2.38	0.90	0.59	0.90
Promedio	3.92	1.40	0.49	0.64	0.49
Termas del Flaco	3.42	0.64	0.40	0.16	0.40
Lo Aguirre	4.54	2.94	0.39	0.63	0.39
Promedio	3.98	1.79	0.40	0.40	0.40
Alto Mallines	6.51	4.07	1.45	0.01	1.45
Promedio	6.51	4.07	1.45	0.01	1.45

4.5. Post - procesamiento de las imágenes satelitales MODIS de albedo - cobertura fraccional nival y temperatura superficial.

La utilización de productos satelitales en el rango espectral VIS - NIR - IR para caracterizar las forzantes superficiales requiere, en el caso de MODIS, la estimación de la información faltante por efecto de la cobertura nubosa. La estimación de la información faltante a escala diaria en el caso de los productos MOD10A1 y a escala semanal en el caso del producto MOD11A1 se realiza mediante la metodología anteriormente presentada.

El estado de la información antes y después del post - procesamiento (**Figura 4.5**) muestra que existe una relación entre la cantidad de información por estimar y (1) el área de la cuenca y (2) la latitud (climatología) y/o relación de elevación media. En el caso de las cuencas Colorado en junta con el río Maipo y Maipo en el Manzano por ejemplo, se evidencia la necesidad de realizar esta estimación dado que la mayor parte del tiempo existe presencia de cobertura nubosa, independiente de la fracción de la cuenca cubierta por ella. En la **Figura A3.1 (Anexos)** se presentan la series de tiempo de datos diarios (cobertura nival fraccional y albedo nival) y semanales (temperatura superficial) de datos crudos con porcentaje de nubosidad nulo y la series de tiempo post - procesada (con todos los pixeles con información válida). Se aprecia en estas figuras que la estimación realizada es consecuente con la dinámica de los datos crudos totalmente válidos obtenidos directamente de los productos satelitales anteriormente citados. Tras efectuar la modelación del equivalente en agua de nieve se procede a realizar una verificación simple respecto al proceso físico del derretimiento observado en terreno. El análisis apunta a tres aspectos considerados de interés al

momento de replicar el proceso de acumulación y derretimiento. Estos son (1) la replicación de la condición húmeda, normal y seca del volumen de deshielo observado por medio de los mapas de SWE producidos, (2) la determinación de un agotamiento propio y característico del equivalente en agua de nieve dado por la cobertura nival y (3) la verificación de correlación entre el SWE en el periodo de máxima acumulación y la fisiografía.

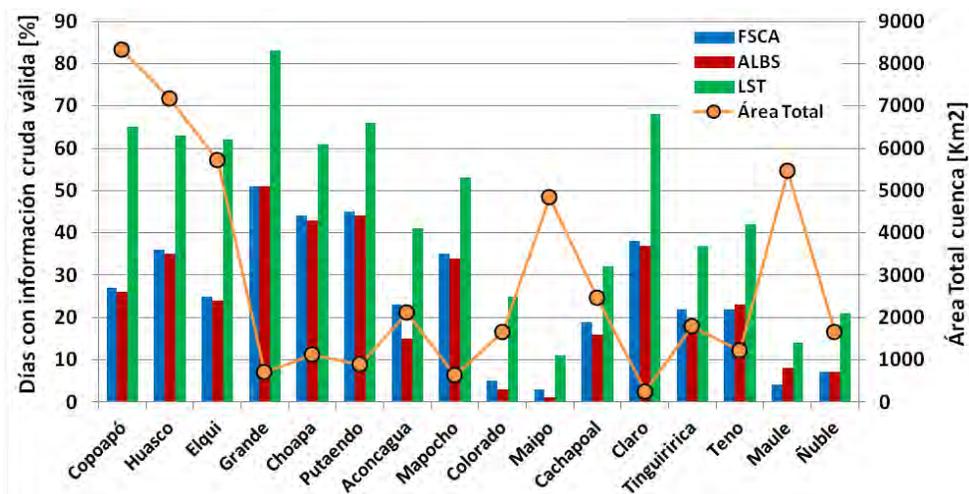


Figura 4.5.- Calidad de la información satelital (días con información completa) en términos de porcentaje sobre el dominio temporal.

4.6. Resultados de la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve.

En primer lugar, tras el análisis de las correlaciones del SWE en máxima acumulación (definido como el promedio por cuenca o cluster entre la última semana de Agosto y la primera semana de Septiembre) (**Figura 4.6c**) se observa una correspondencia entre la modelación distribuida y el tipo de año hidrológico, mostrando a modo general años húmedos en 2001, 2002, 2005; años normales en 2006, 2008 y 2009 y años secos en 2003, 2004, 2007, 2010, 2011 y 2012. La correlación lineal entre cada valor del SWE promedio espacial en máxima acumulación y el volumen de deshielo promedio por cluster es de 0.79, 0.87, 0.82 y 0.79 para los clusters 1, 2, 3 y 4 respectivamente. En la **Figura 4.6a - b** se presenta el mapa general del dominio de modelación en el periodo de máxima acumulación. En esta figura se observa claramente control de la elevación - latitud en la distribución espacial del SWE. Este resultado muestra que la modelación logra capturar el tipo de año hidrológico de manera satisfactoria. En segundo lugar, se presentan las series de tiempo intra-anales (periodo de deshielo) del SWE promedio por cluster (**Figura 4.6d**). Se observa un agotamiento paulatino, acentuado desde el mes de Septiembre, con un máximo entorno a Agosto y con la presencia de nieve hasta Diciembre y Enero de manera significativa en los años húmedos, entendiendo que la condición de borde de cobertura nival nula al final de la temporada fuerza el valor nulo, lo cual puede distar levemente de la realidad a escala regional debido a existencia y aporte hídrico de nieves eterna o glaciares que la imagen satelital MODIS no logra detectar, resultado enunciado en **Peña y Nazarala (1987)** sin el uso de esta tecnología.

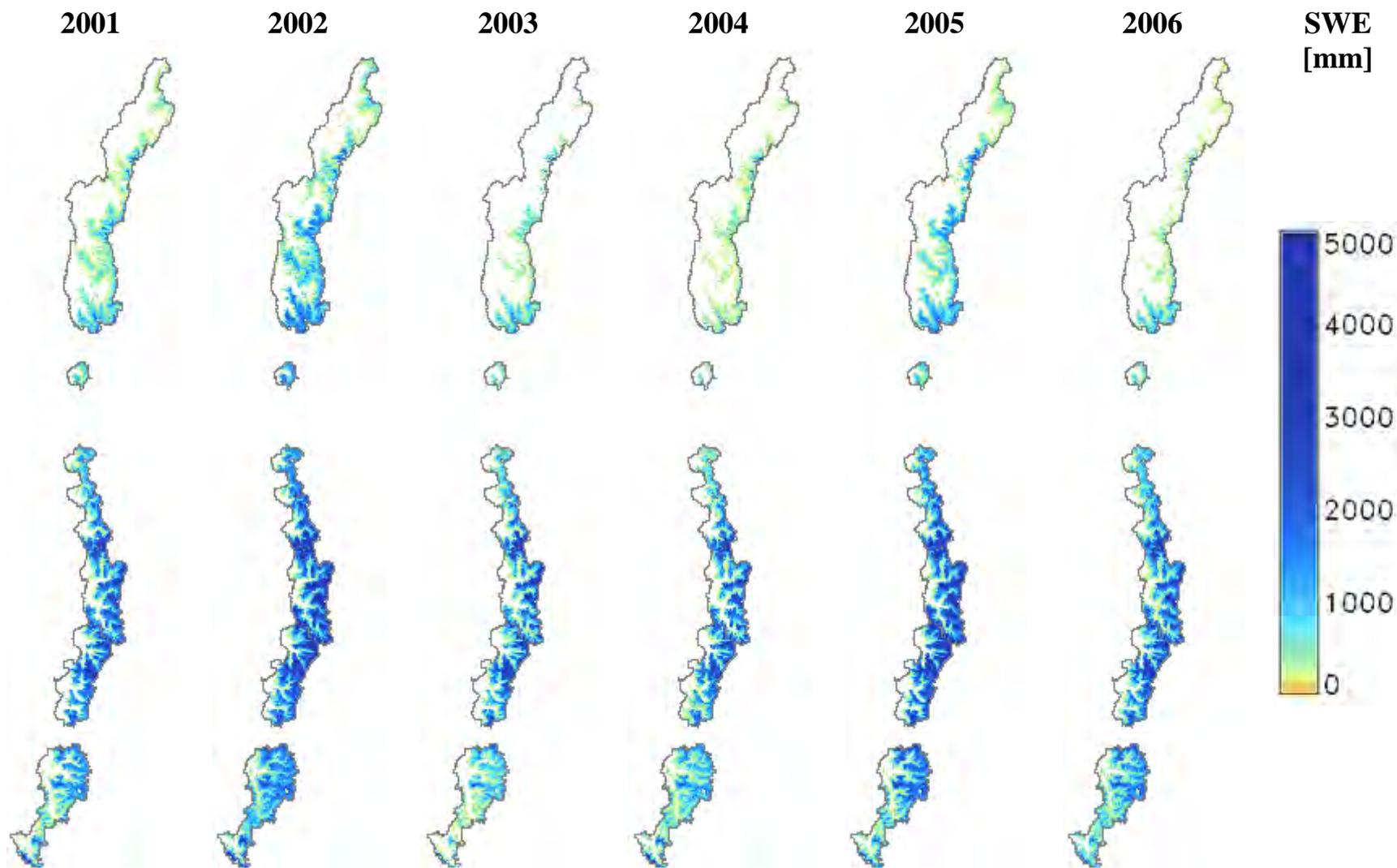


Figura 4.6a.- Modelación distribuida del SWE (promedios del 1/9 al 15/9 – máxima acumulación).

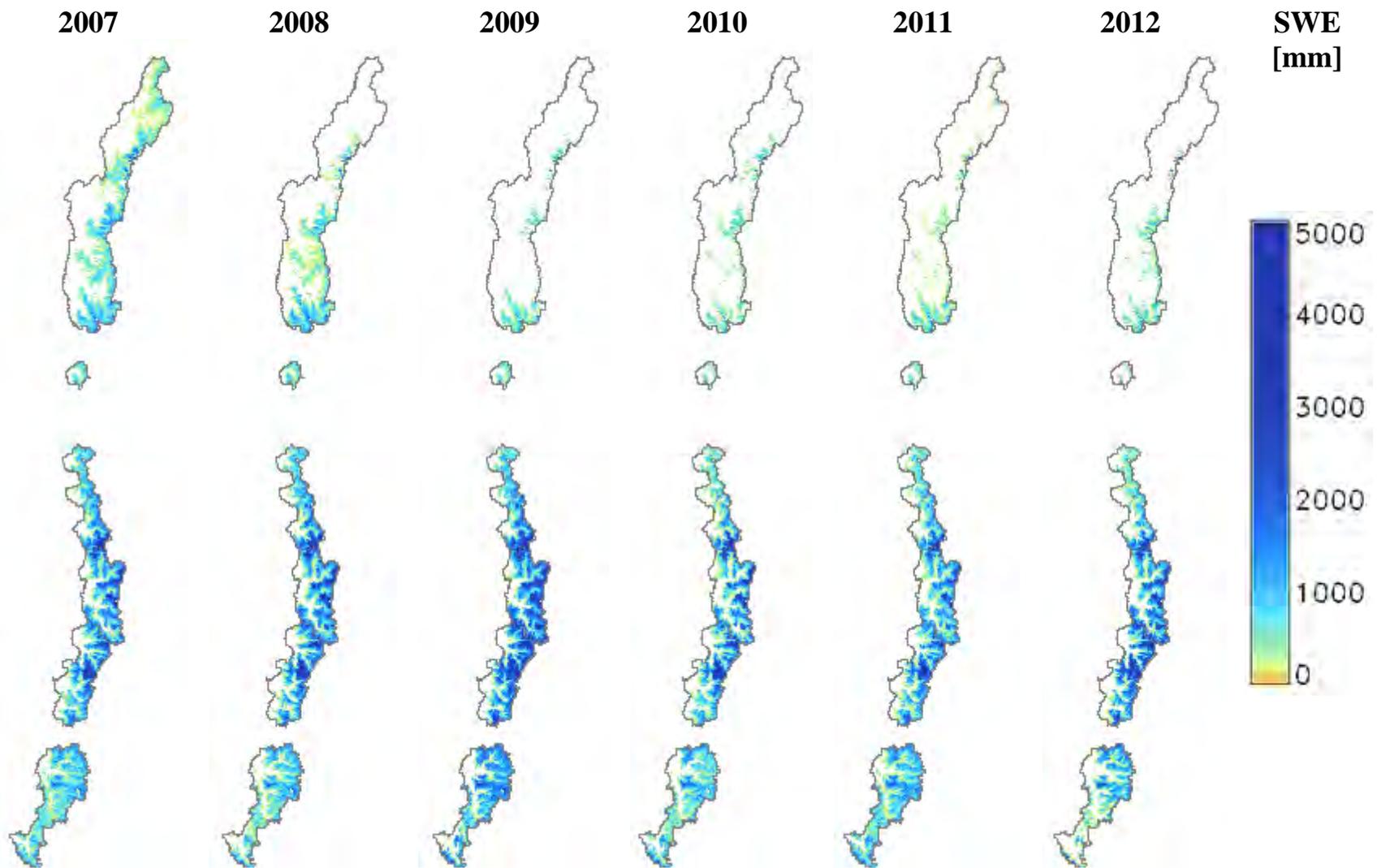


Figura 4.6b.- Modelación distribuida del SWE (promedios del 1/9 al 15/9 – máxima acumulación). Continuación.

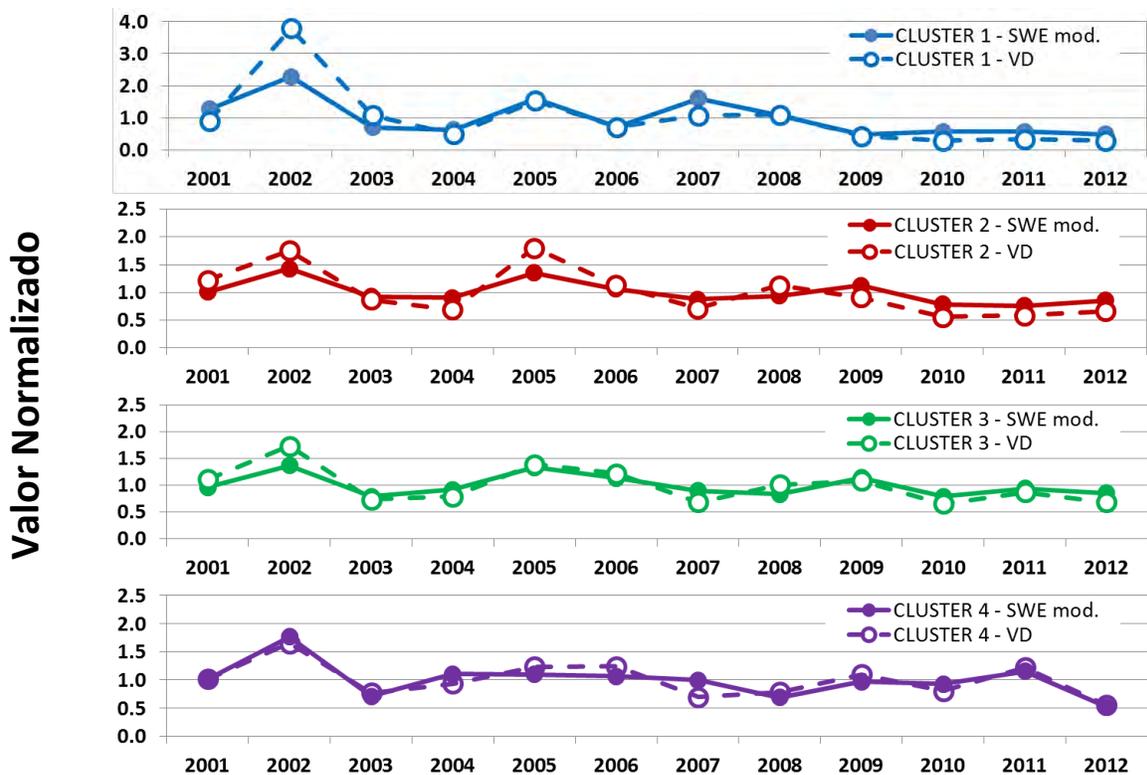


Figura 4.6c.- Comparación normalizada por cluster del SWE modelado (máxima acumulación) y el volumen de deshielo promedio para cada cluster (2001 – 2012).

La suavidad de las series viene dada en parte por la extensión geográfica de la que cada serie (promedio por cluster) es representativa, evidenciando mayor acumulación en la zona centro norte y centro sur (clusters 2 y 3, zonas de mayor altitud). También se presentan en la misma figura las series de tiempo para la evolución intra-anual de la desviación estándar del SWE. El comportamiento observado da cuenta de una alta dispersión en invierno (dada la extensión en elevación de cada cluster) la cual se mantiene casi constante hasta que el derretimiento es representativo de la mitad del volumen de SWE. Posteriormente existe menor varianza producto del retroceso de la cobertura nival. Ambas series de tiempo dan a entender que el proceso de derretimiento (agregado espacialmente) está modelado satisfactoriamente respecto a la dimensión temporal.

En tercer lugar, se procede a verificar la respuesta espacial de la modelación del SWE sólo para el periodo de máxima acumulación (**Figura 4.6e**). El primer ejercicio consiste en calcular la correlación simple entre el SWE y el conjunto de predictores fisiográficos (elevación, índice norte - *northness* y pendiente). Es sabido que la acumulación nival depende primeramente de la elevación (**Peña y Nazarala, 1987**) al menos hasta cierta altitud máxima. Por otra parte, las laderas con orientación norte deberían acumular menos nieve que las orientadas hacia el sur, por el hecho del tránsito norte del sol. Además, en altas pendientes existirá movimiento gravitacional de la nieve hacia zonas más planas.

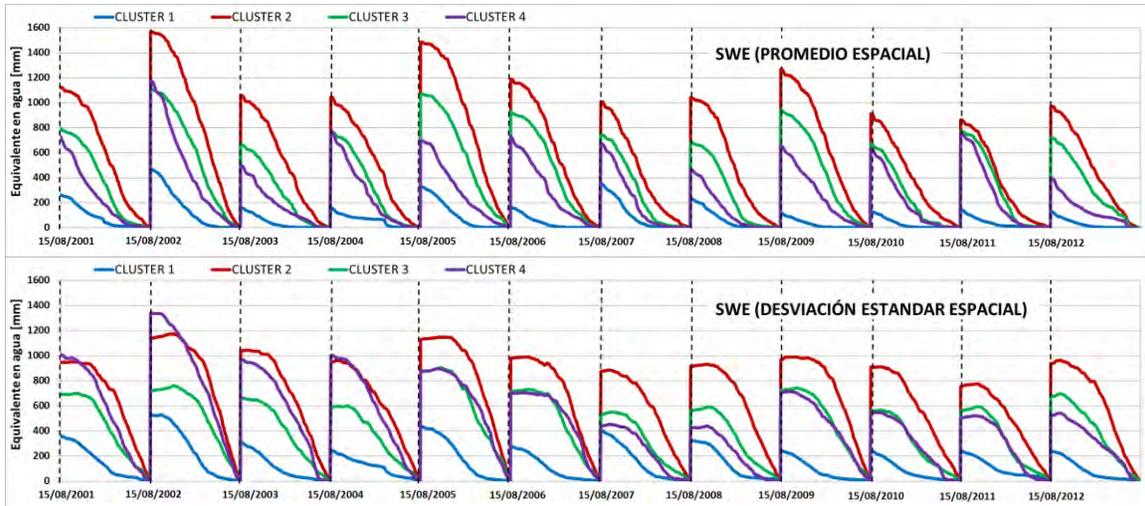


Figura 4.6d.- Series de tiempo del SWE promedio espacial y desviación estándar espacial por cluster.

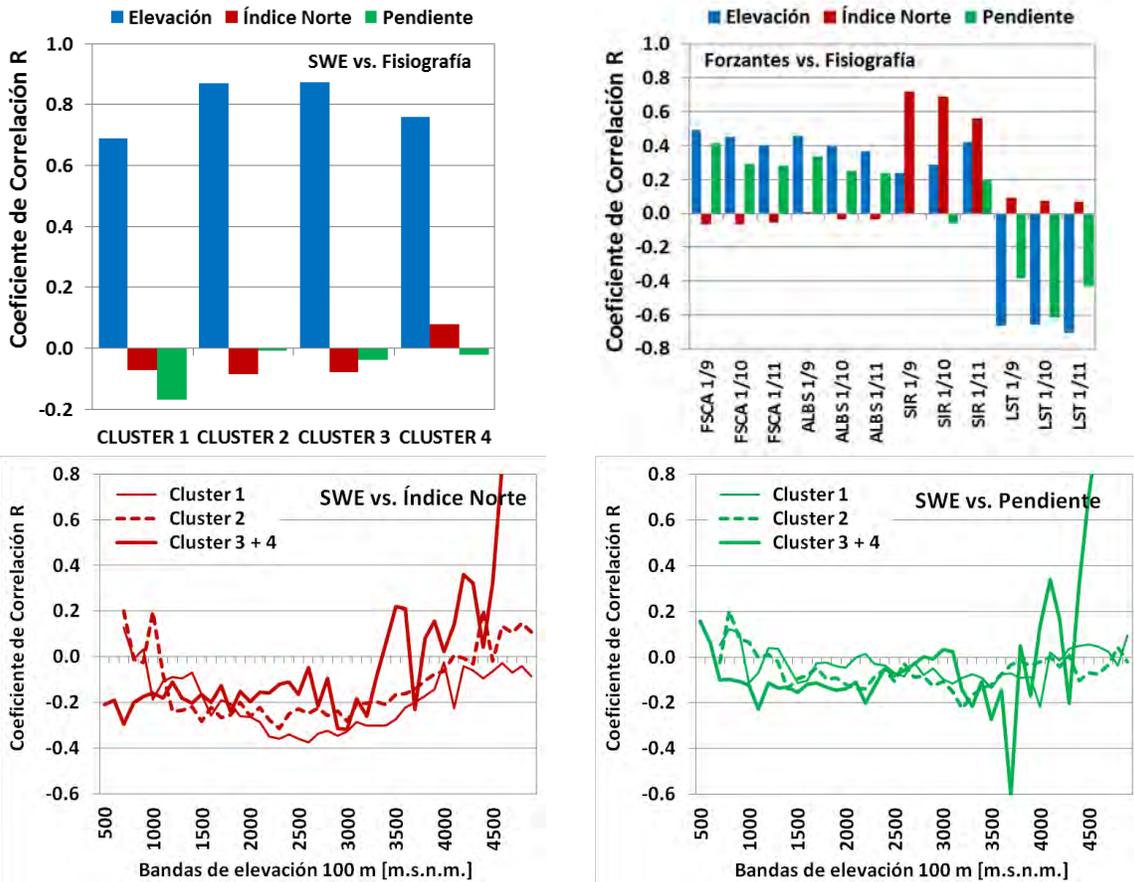


Figura 4.6e.- Análisis de la representatividad espacial del SWE modelado respecto a la fisiografía.

Se observa en el panel izquierdo superior (**Figura 4.6e**) que la correlación del SWE respecto a la elevación es considerable, no así respecto al índice norte (calculado como

el seno de la orientación anti horaria con cero al este (+ 1 si está orientada al norte, - 1 si está orientada al sur) y a la pendiente. Este resultado a nivel de cluster explica la dependencia del modelo respecto a la elevación a una escala regional. En el panel derecho superior (**Figura 4.6e**) se intenta entender el porqué de esta dependencia casi directa del modelo respecto a la elevación. La explicación se basa en que solo la radiación solar se correlaciona con la índice norte mientras que las demás forzantes (*FSCA*, albedo nival (α_s) y *LST*) lo hacen en menor medida. El hecho de que la radiación solar incidente (*RSI*) esté ponderada por el término $(1 - \alpha_s)$ genera un deterioro de la correlación *RSI* - índice norte, efecto incrementado por (1) la fuerte dependencia del término de onda larga y grado día (basados en el *LST*) con la elevación al sumar estos términos al flujo de energía de onda corta en el balance de masa energía y (2) al escalamiento por la cobertura nival *FSCA*.

El análisis anterior conduce a la siguiente conclusión: la fuente primaria de error de la representatividad espacial del modelo respecto a la orientación y pendiente es por causa del patrón de acumulación observado en el producto de cobertura nival fraccional de MODIS (cuya correlación es alta respecto a la elevación y baja respecto al índice norte y pendiente). Esto puede ser causa de la baja resolución espacial (500 metros) la cual no captura el efecto de la orientación. Sin embargo, para el SWE en el periodo de máxima acumulación, existe una correlación baja pero apreciable (en torno a 0.35) respecto al índice norte en bandas de elevación media (1500 - 3500 m.s.n.m.) de 100 metros de altitud (panel izquierdo inferior - **Figura 4.6e**). En resumen, la falta de explicación del SWE por parte de la orientación esta forzada por la cobertura nival satelital y por la superposición de distintos procesos físicos modelados que no hacen evidente esta relación.

4.7. Validación de la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve.

La validación del modelo distribuido se efectúa en términos de equivalente en agua de nieve, contrastando la modelación con observaciones y/o estimaciones de esta variable en terreno a nivel puntual o agregado, realizando dos esquemas de validación para asegurar la calidad de representación del proceso de acumulación - derretimiento del manto nival entregado por este producto. Los esquemas de validación son los siguientes:

- **Esquema 1:** se realiza la comparación entre el SWE máximo observado en cada snow pillow considerado (**Tabla A3.1 (Anexos)**) y el SWE modelado promedio entre el día 22 de Agosto al 7 de Septiembre, caracterizando esta ventana como de probable máxima acumulación (**Tabla A3.2 (Anexos)**). Se realiza esta aproximación de las fechas dado que (1) los registros de los snow pillows utilizados presentan vacíos de información parciales o totales a partir de fechas críticas en esta ventana temporal y (2) debido a la falta de información para una porción importante de años entre el 2001 y 2012, máximos de SWE que fueron estimados con correlaciones simples en base a los snow pillows con información más cercanos. Cabe destacar que el modelo entrega un valor

puntual que en realidad corresponde al pixel de 500 metros de resolución espacial que se localiza sobre el snow pillow evaluado, por lo que también existirá un error del tipo punto - pixel. Este esquema estará orientado más bien a evaluar la *representatividad de la condición de máxima acumulación* durante cada temporada de deshielo.

- **Esquema 2:** se realiza un "*resampling*" de las estimaciones puntuales en terreno del SWE (considerando el promedio de la densidad de la nieve observado por terreno) a la grilla de modelación de resolución espacial 500 metros. Luego se compara el resampling de terreno normalizado por el promedio espacial de dicho terreno con el modelo para el 1 de Septiembre normalizado (también por el promedio espacial modelado) a modo de verificar (1) si existe un patrón espacial invariante en el tiempo observado en terreno, (2) si el modelo logra replicar dicho patrón espacial observado - en el caso de ser invariante en el tiempo, (3) en el caso de existir variabilidad en el patrón espacial observado en terreno, evaluar cuan cercano es el producido por el modelo y a que se atribuye el error observado. Cabe destacar que la validación directa del patrón espacial no es posible dado que el conjunto muestral utilizado comprende los años 2012, 2013 y 2014 mientras que el modelo fue elaborado entre los años 2001 y 2012, esto, debido a la disponibilidad de información satelital y a la naturaleza "*backward*" de la modelación. Este esquema estará orientado más bien a *evaluar la representación del modelo respecto a los patrones espaciales de acumulación nival observados en terreno* por lo que puede ser tratado de manera normalizada.

Es necesario realizar un alcance preliminar para analizar posteriormente en detalle la validación. La estructura matemática del modelo de derretimiento del equivalente en agua de nieve (SWE) presentado en este estudio es, desde la fecha inicial de modelación, monótonamente decreciente para cada pixel en el tiempo. Esta característica subyace en que no se considera la incorporación de nevadas durante el periodo de deshielo debido al desconocimiento del patrón espacial de estas (objetivo transversal de este estudio). Es por esto que la modelación entrega solo una idea aproximada del proceso, entendiendo su uso como una herramienta de caracterización histórica más que un modelo de fiel representación de los procesos físicos. Dado esto, es que se utiliza, para efectos de la validación, la ventana de máxima acumulación explicada anteriormente en vez que una fecha precisa. Las series de tiempo de los snow pillows dan cuenta de nevadas durante el periodo de deshielo, irreproducibles por la modelación debido a su estructura (**Molotch y Bales, 2005; Cline et al., 1997**). La explicación en formato esquemático se presenta en la **Figura 4.7**. Los resultados del primer esquema de validación reflejan que la modelación en términos de la representatividad volumétrica total de la condición máxima de acumulación nival en el tiempo son satisfactorios con mayor o menor grado para los distintos puntos de control siendo, en general, satisfactoria para las ocho estaciones nivométricas ubicadas en la mayor parte de la zona de modelación general (precordillera y cordillera de los Andes de Chile y Argentina entre 27° y 38° latitud sur). Siguiendo con el análisis de la

validación (esquema 1) podemos decir que se aprecian errores de sesgo (sobrestimación por parte del modelo) en Quebrada Larga, Termas del Flaco (todos los años) y, El Soldado y Laguna Negra (solo años húmedos). El comportamiento general del resto de las estaciones analizadas parece no presentar de un sesgo importante. Por otra parte, la calidad de ajuste de modelo es satisfactoria en Quebrada Larga, Cerro Vega Negra, y, El Soldado, Laguna Negra y Lo Aguirre (exceptuando algunas anomalías). En el caso de Portillo y Alto Mallines se observan errores considerables caracterizados por una alta dispersión respecto al registro observado. En el caso de Termas del Flaco, el error está dado por una combinación de baja calidad de ajuste y sesgo (**Figura 4.8b - c**). Los gráficos de barras adjuntos en la **Figura 4.8b - a** muestran la comparación explícita en términos de SWE. Se destaca que la modelación explica a modo general la evolución de los tipos de años hidrológicos en la ventana temporal 2001 - 2012.

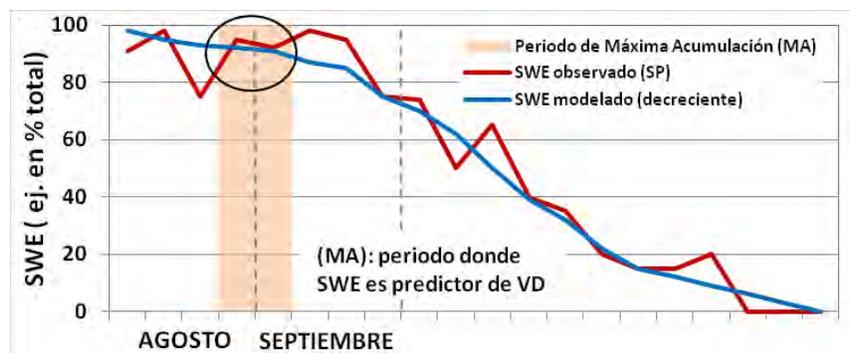


Figura 4.7.- Explicación ejemplificada de los supuestos adoptados para la validación propuesta.

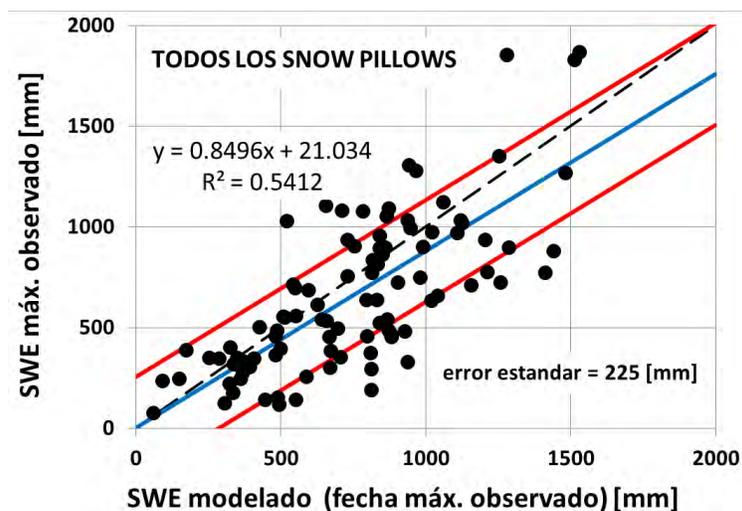


Figura 4.8a.- Visualización de la calidad de la modelación según el esquema de validación 1.

En la **Figura 4.8a** se presenta el gráfico de correlación general para los 12 años de las ocho estaciones nivométricas. Se observa un grado de correlación aceptable y un sesgo leve, en donde los errores se manifiestan en mayor medida para los años húmedos aunque porcentualmente, los errores son -2% (años secos), 12% (años normales) y 15% (años húmedos).

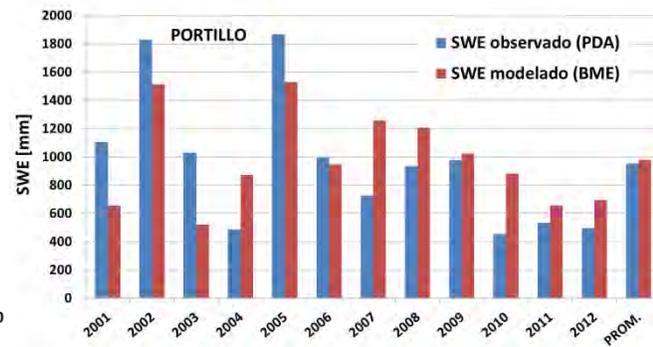
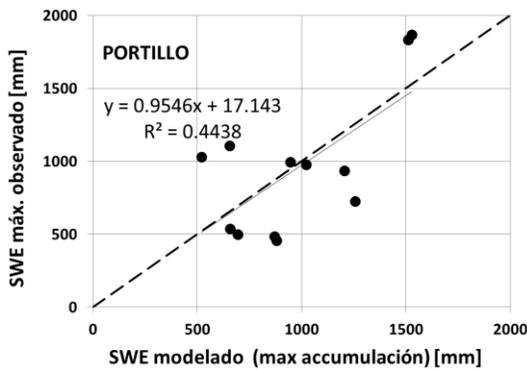
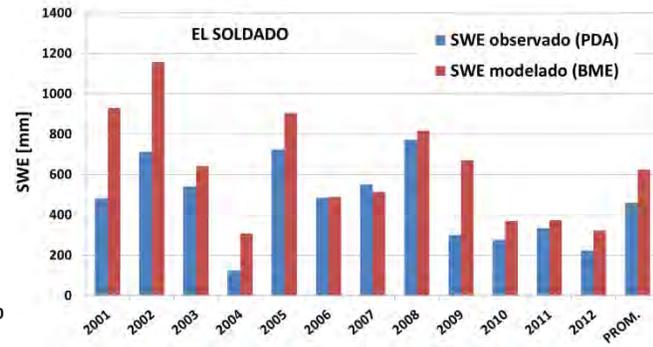
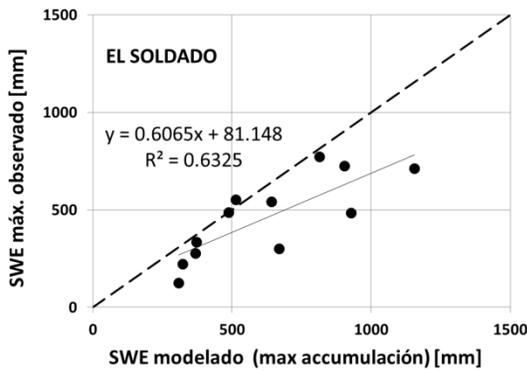
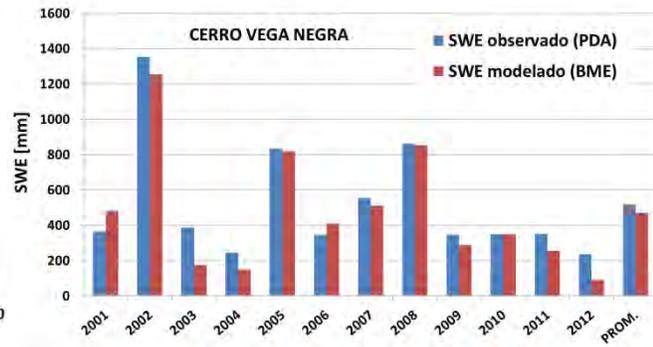
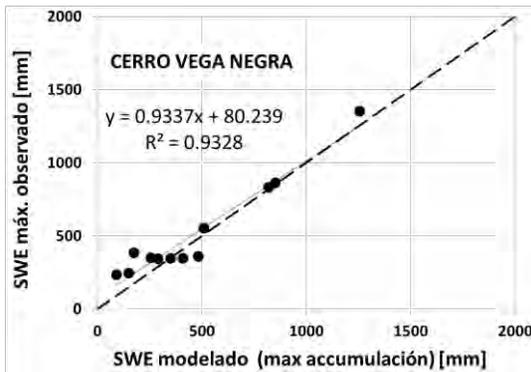
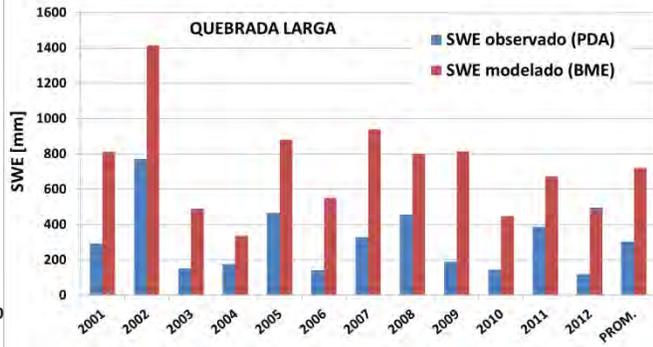
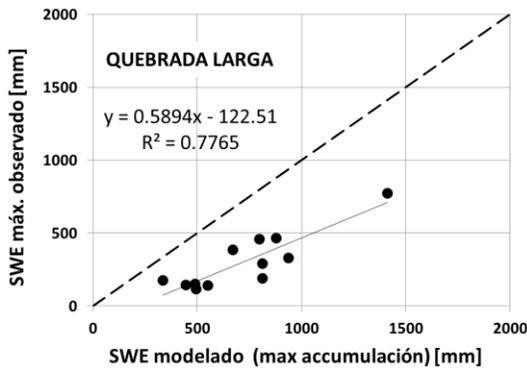


Figura 4.8b.- Validación por snow pillow de la modelación, esquema de validación 1.

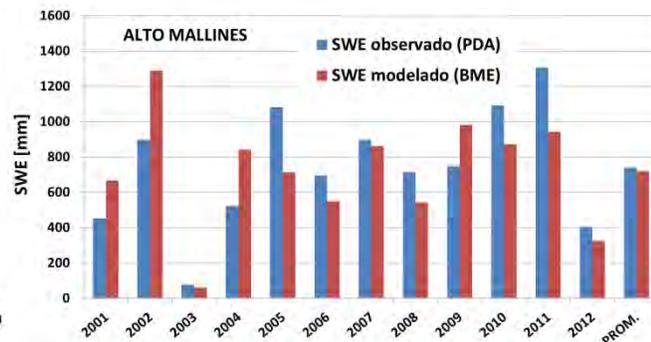
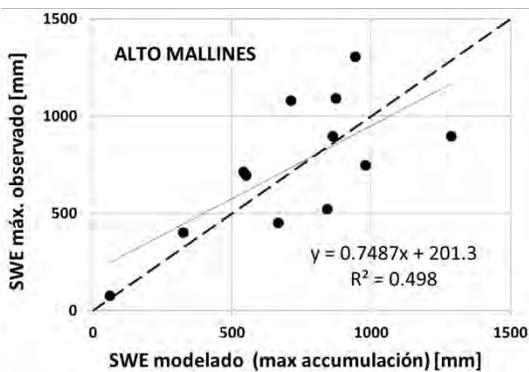
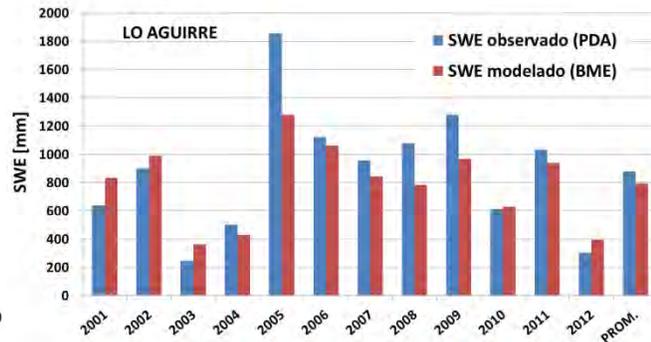
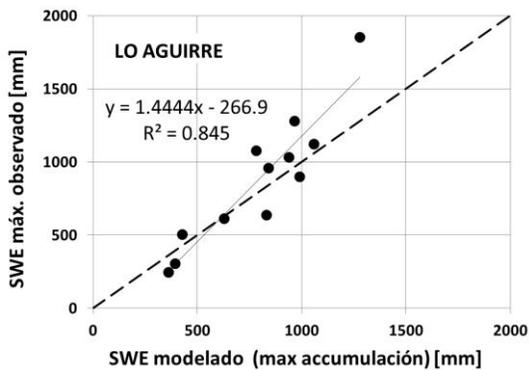
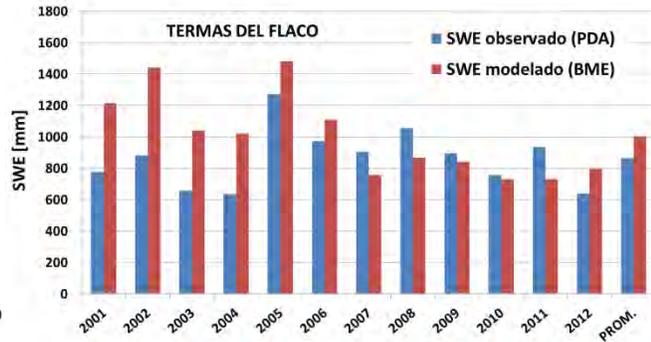
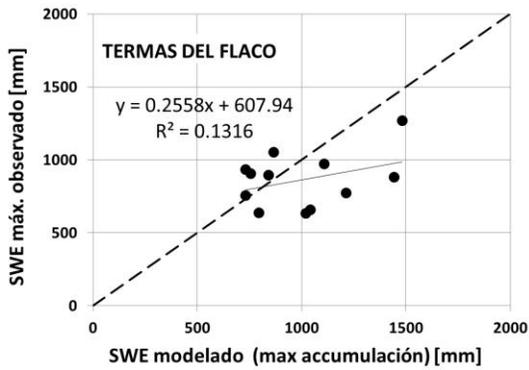
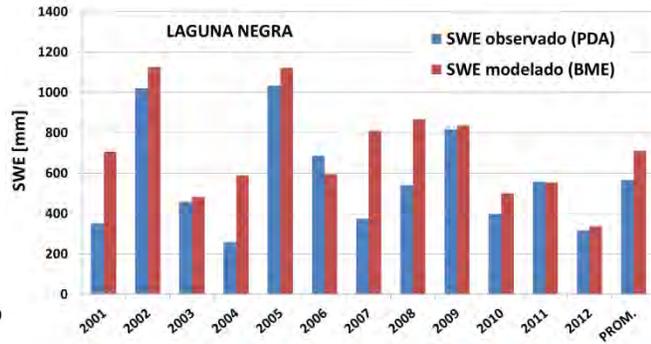
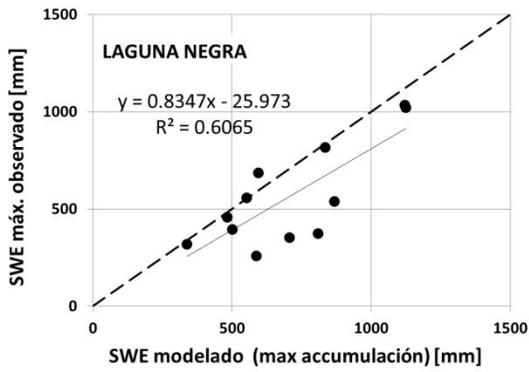


Figura 4.8c.- Validación por snow pillow de la modelación, esquema de validación 1. Continuación.

Los resultados del segundo esquema de validación son explicados a continuación. Se aprecia en la **Figura 4.9** los mapas normalizados de subestimación (< 1) y sobreestimación (> 1) del promedio espacial. En el caso del modelo, fueron acoplados los 12 años modelados y replanteados a las celdas observadas en terreno a modo de observar el patrón de acumulación generado. En el caso de las observaciones en terreno, estas fueron acopladas a modo de verificar la existencia de un patrón de acumulación real. El acoplamiento puede ser utilizado dado que los valores utilizados para la generación de patrones están normalizados. En primer lugar se observa que los resultados muestran cierta tendencia en los sistemas Ojos de Agua - Mardones y Morales - Lo Valdez debido a que la cobertura muestreada es suficientemente extensa para poder interpretar el patrón espacial generado con la modelación. En el caso de los otros tres sistemas esto no es factible por lo que los resultados no pueden ser considerados. Este análisis muestra que la metodología anterior solo sirve para extensiones amplias dada la alta resolución espacial utilizada (**Tabla 4.5**).

Tabla 4.5.- Comparación de los resultados obtenidos en ambos esquemas de validación del SWE.

Snow Pillow	R²	Sesgo [mm]	Error Estándar [mm]	Esquema de validación
Quebrada Larga	0.78	418	144	Esquema validación 1
Cerro Vega Negra	0.93	80	94	
El Soldado	0.63	171	176	
Portillo	0.44	304	262	
Laguna Negra	0.61	159	163	
Termas del Flaco	0.13	241	259	
Lo Aguirre	0.85	169	118	
Alto Mallines	0.50	213	240	
Cuenca Piloto	R²	número de pixeles contenidos		Esquema validación 2
Cerro Vega Negra (CVN)	0.02	11		Esquema validación 2
Ojos de Agua (ODA) + Mardones (MAR)	0.35	54 + 27		
Morado (MOR) + Lo Valdez (LVD)	0.42	44 + 18		
Olla Blanca (OBL)	0.20	14		
Valle Hermoso (VHM)	0.00	13		

Si continuamos el análisis considerando solo los sistemas Ojos de Agua - Mardones y Morales - Lo Valdez se puede observar que el patrón de acumulación nival generado por la modelación tiende a ser bastante más homogéneo que el observado en terreno (muy heterogéneo). Sin embargo, algunas cosas son comunes: (1) los mantos nivales tienden a ser más profundos en zonas altas, (2) este efecto es distorsionado por otros procesos, posiblemente la orientación, pendiente y viento. Esto no se advierte claramente en el patrón de acumulación modelado, (3) el manto nival tiende a ser más profundo en orientación este (sistema Ojos de Agua - Mardones) y con orientación oeste en el sistema Morales - Lo Valdez. Este patrón solo es replicado en Morales y Mardones. En resumen, el desempeño espacial del modelo no puede ser evaluado con claridad debido a una incompatibilidad de resoluciones espaciales. Sin embargo ciertas características del patrón de acumulación real si son reproducidas por la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve.

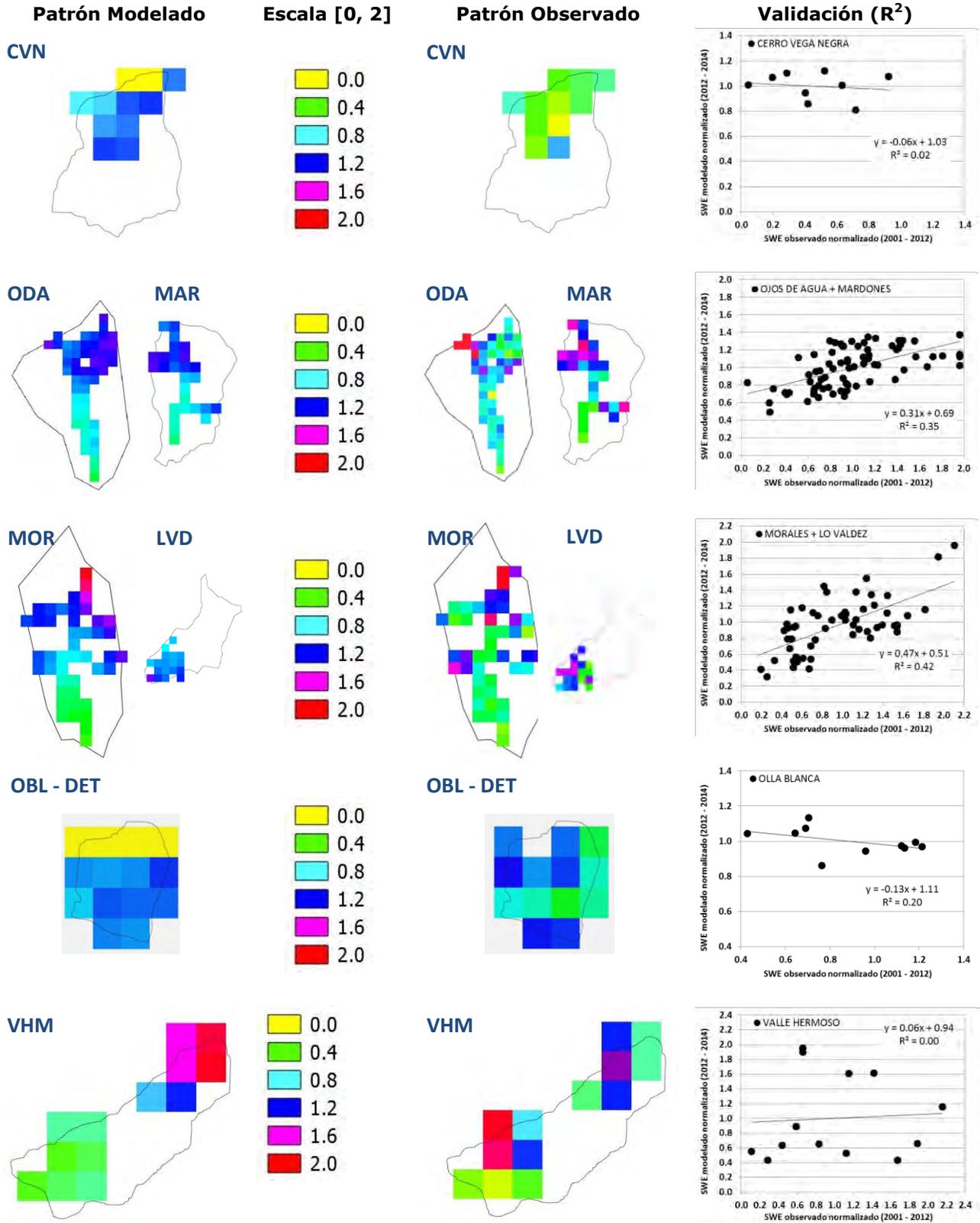


Figura 4.9.- Validación vía terrenos de la modelación según el esquema de validación 2.

5. ANALISIS DE LA RED NIVAL NECESARIA PARA CUANTIFICAR LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LOS ANDES DE CHILE CENTRAL.

El análisis de la red nival necesaria para cuantificar los recursos hídricos ha sido pensada como un estudio de observación, interpretación y modelación del manto nival en el periodo de máxima acumulación con el fin de poder establecer la calidad predictiva de la red nivométrica actual y, a partir de este punto, proyectar una mejora de la calidad tecnológica de las estaciones, cobertura de la red nivométrica y un mejoramiento en la metodología de pronóstico del caudal natural de deshielo en las 16 cuencas de control que la Dirección General de Aguas utilizó en el periodo 2013 - 2014. La proyección de la red se basa en (1) criterios técnicos basados en la respuesta hidrológica en alta montaña y (2) la necesidad de contar con una red de estaciones nivométricas mejorada entendiendo que el equivalente en agua de nieve es sin duda un predictor de importancia a la hora de realizar los pronósticos de caudales medios mensuales de deshielo (**Figura 5.3**). A continuación se procede con este análisis y propuestas finales respecto a la red nivométrica.

5.1. Evaluación de la representatividad local de las estaciones nivométricas visitadas en 2012 – 2014.

Uno de los objetivos del trabajo en terreno comprende la realización de grillas de medición (**Molotch y Bales, 2005**) de la altura de nieve **de tamaño igual a un "pixel"** del producto MOD10A1 (y posterior estimación del equivalente en agua de nieve) en torno a los snow pillows de Cerro Vega Negra, Portillo y Laguna Negra. El objetivo de este análisis es determinar si las estaciones nivométricas subestiman o sobrestiman la acumulación local a escala de pixel de 500 metros y determinar posibles causas de este fenómeno proponiendo mejoras en la instalación de las estaciones existentes y futuras. La comparación entre los registros de los snow pillow y la condición nival a escala de pixel es relevante, por cuanto la mayoría de los modelos de estimación espacial de equivalente en agua construidos en base a recursos satelitales utilizan la información en terreno para validar la modelación, la cual debe ser escalada mediante un modelo de error punto – pixel.

Tras la realización de las campañas de terreno se calcula el error relativo de (1) la estimación puntual del SWE al lado del snow pillow (que denominaremos puntual o "*manual*") y (2) el dato entregado por el snow pillow vía telemetría (que denominaremos "*sensor*"), ambos respecto a la acumulación observada en el pixel (**asumido como situación verdadera o "ground truth"**). Se observa (**Tabla 5.1- Figura 5.1**) que los errores relativos observados en Laguna Negra son prácticamente iguales en 2013 y 2014, sugiriendo que el modelo de error de la estimación manual versus el pixel podría ser invariante en el tiempo. En esta estación, las estimaciones manuales y vía sensor subestiman el equivalente en agua de nieve del pixel en un 20% y 30% aproximadamente para cada año evaluado. En el caso de Portillo se observan resultados consistentes que señalan una sobreestimación de la medición vía sensor de aproximadamente un 55%, evidenciando una disminución de este sesgo en 2014. Las

observaciones manuales oscilan entorno al error nulo. En el caso de Cerro Vega Negra, el sensor muestra una aleatoriedad en los años al igual que la estimación manual, en donde es notoria la sobreestimación observada en 2013 en el snow pillow.

Tabla 5.1.- Resumen del equivalente en agua de nieve verdadero de terreno (grilla - pixel) y los valores observados (manual) y registrados instrumentalmente (sensor) en los snow pillos junto con los errores relativos asociados a la respuesta del pixel.

	SWE pixel (promedio) [cm]	SWE snow pillow manual [cm]	SWE snow pillow sensor [cm]	Error Relativo manual c/r pixel [%]	Error Relativo sensor c/r pixel [%]
CAMPAÑAS DE TERENO - GRILLAS - AÑO 2012					
CVN (grilla)	20	19	22	-5%	10%
POR (grilla)	17	16	28	-6%	65%
CAMPAÑAS DE TERENO - GRILLAS - AÑO 2013					
CVN (grilla)	32	41	31	28%	-3%
POR (grilla)	36	39	57	8%	58%
LAG (grilla)	55	44	38	-20%	-31%
CAMPAÑAS DE TERENO -GRILLAS - AÑO 2014					
CVN (grilla)	15	16	7	7%	-53%
POR (grilla)	15	17	21	13%	40%
LAG (grilla)	24	19	17	-21%	-29%

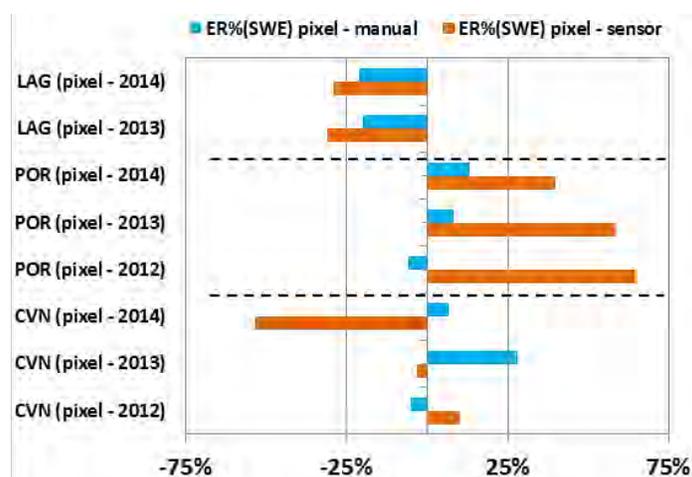


Figura 5.1.- Resumen de los errores relativos estimación manual y sensor vs. pixel (grilla).

Un análisis más detallado es realizado mediante la observación de la distribución estadística de las alturas de nieve observadas en cada pixel muestreado (grilla) (**Figura 5.2**). Se advierte una asimetría positiva en la distribución muestral, ubicando la mayor parte de las muestras en zonas de sobreestimación respecto al promedio de estas. Esto muestra que las ubicaciones de Cerro Vega Negra, Laguna Negra (ambas en menor medida) y Portillo (en gran medida) presentan zonas de mayor acumulación nival que la condición general observada en torno al snow pillow (laderas, zonas de depositación nival, etc.). En la **Figura 4.2b** se muestra la distribución estadística del muestreo por pixel (error relativo respecto al promedio), el error relativo del valor estimado manualmente, observado vía sensor y publicado en el Pronóstico de Disponibilidad de Agua (PDA). Se observa que los valores considerados por la Dirección General de Aguas difieren significativamente con la cobertura nival local en, al menos, Cerro Vega Negra (2014) y Portillo (2012 y 2013).

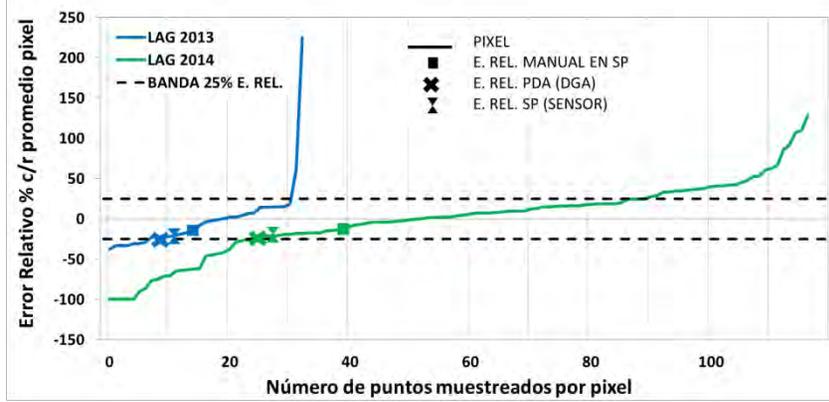
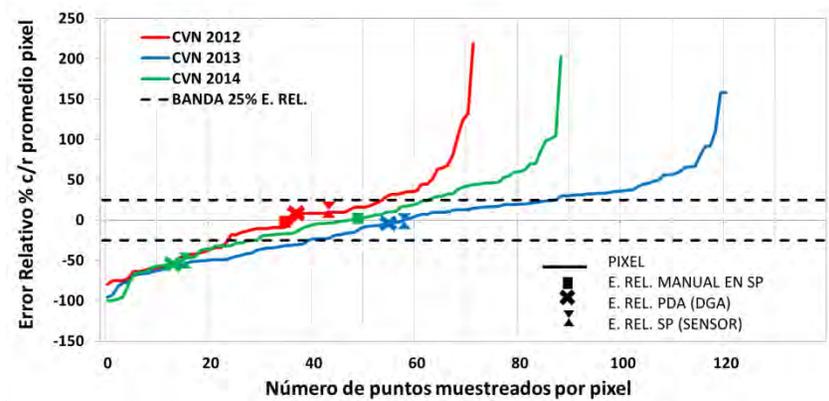
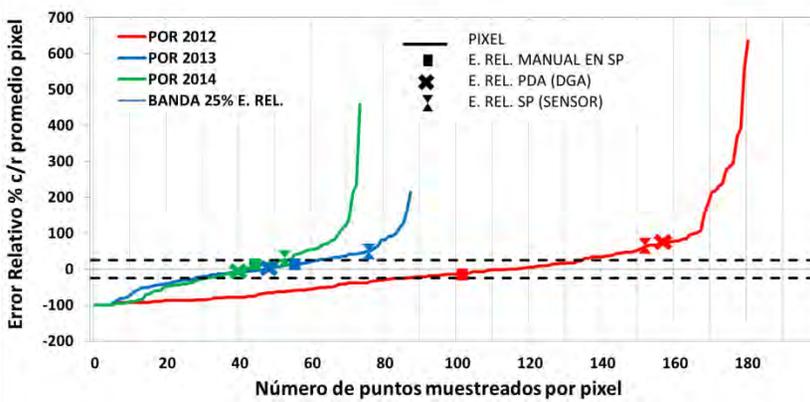
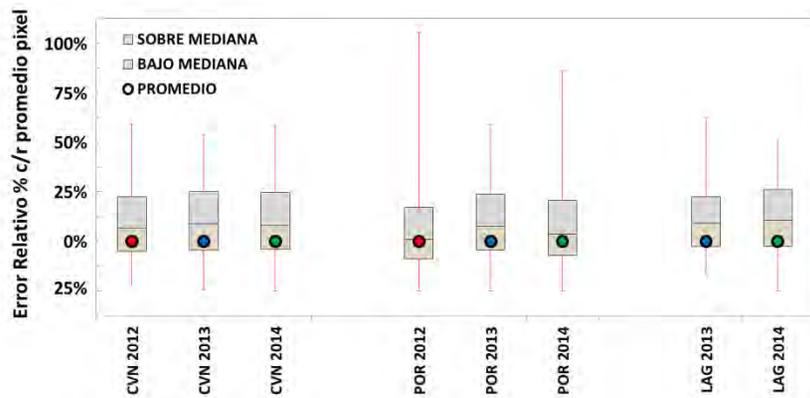


Figura 5.2.- Distribuciones del muestreo en cada pixel evaluado.

El análisis anterior junto con el análisis de los errores relativos permite visualizar un mayor error en la observación vía sensor que en la estimación manual sobre el snow pillow (la cual no sobrepasa el 30%). En el caso de Cerro Vega Negra, la variabilidad del comportamiento del error relativo indica que las estimaciones se ajustan aceptablemente al comportamiento local excepto en 2014, año en que existe una anomalía que podría ser atribuible a algún efecto meteorológico local dado que no coincide con el retiro de las rejillas de protección del snow pillow. En el caso de Portillo, existe un error sistemático de sobreestimación producto del sensor e independiente del retiro de las rejillas aunque en 2014 se observa una disminución del error vía sensor de un 65% (2012) a un 40%. En Laguna Negra, los resultados son claros, existiendo por parte de ambos tipos de mediciones puntuales errores relativos de subestimación atribuibles a la locación puntual. Naturalmente, repetir este ejercicio en años posteriores permitirá dar mayor robustez a las conclusiones, entendiendo el origen de las fuentes de incertidumbre en la observación instrumental del equivalente en agua de nieve en terreno lo cual hace imposible determinar algún grado de sobreestimación o subestimación para Cerro Vega Negra (en que no existiría un efecto significativo salvo en 2014). En el caso de Portillo y Laguna Negra es posible concluir que existe una sobreestimación de 55% y subestimación de 30% sistemática respectivamente (aunque variable año a año en el caso de Portillo).

5.2. Evaluación del estado actual y futura expansión en cobertura de la red nivométrica respecto a la capacidad predictiva del volumen total de deshielo.

La capacidad predictiva del equivalente en agua de nieve es consistente respecto al volumen total de deshielo (VD) en el periodo Septiembre – Marzo. Esta relación se presenta en forma de una relación lineal por lo que el concepto de capacidad predictiva será tratado en este apartado como dicho tipo de ajuste. A modo de ejemplificar la capacidad predictiva del SWE se presenta la **Figura 5.3** en la que se explicita dicha relación lineal. En esta figura se presenta la capacidad predictiva de (1) el SWE modelado en cada pixel correspondiente a la localización de cada snow pillow, (2) el SWE observado en el periodo de máxima acumulación (MA) en cada snow pillow (periodo entre el 22 de Agosto y el 7 de Septiembre) y (3) el SWE entregado en el Pronóstico de Disponibilidad de Agua (PDA). La calidad predictiva se presenta en la **Tabla 5.2 – superior**). Se observa que la calidad predictiva in situ varía según el sitio evaluado siendo, en general, más alta para Cerro Vega Negra, El Soldado y Portillo. Haciendo la distinción entre la calidad predictiva del SWE modelado y el estimado / observado in situ es posible advertir que el modelo posee mayor capacidad predictiva que su par estimado / observado en El Soldado y Termas del Flaco. La capacidad predictiva es similar entre el ajuste del conjunto modelado versus el conjunto estimado / observado en Cerro Vega Negra, Laguna Negra y Lo Aguirre mientras que es marcadamente menor en Portillo. Esto implica que la modelación del SWE en Portillo es deficiente y que, al menos, en los dos primeros casos, la estimación de valores del SWE en el periodo de máxima acumulación podría ser eventualmente apoyada por los resultados entregados por la modelación (mayor detalle de estos resultados en **Cornwell y McPhee (2013)**).

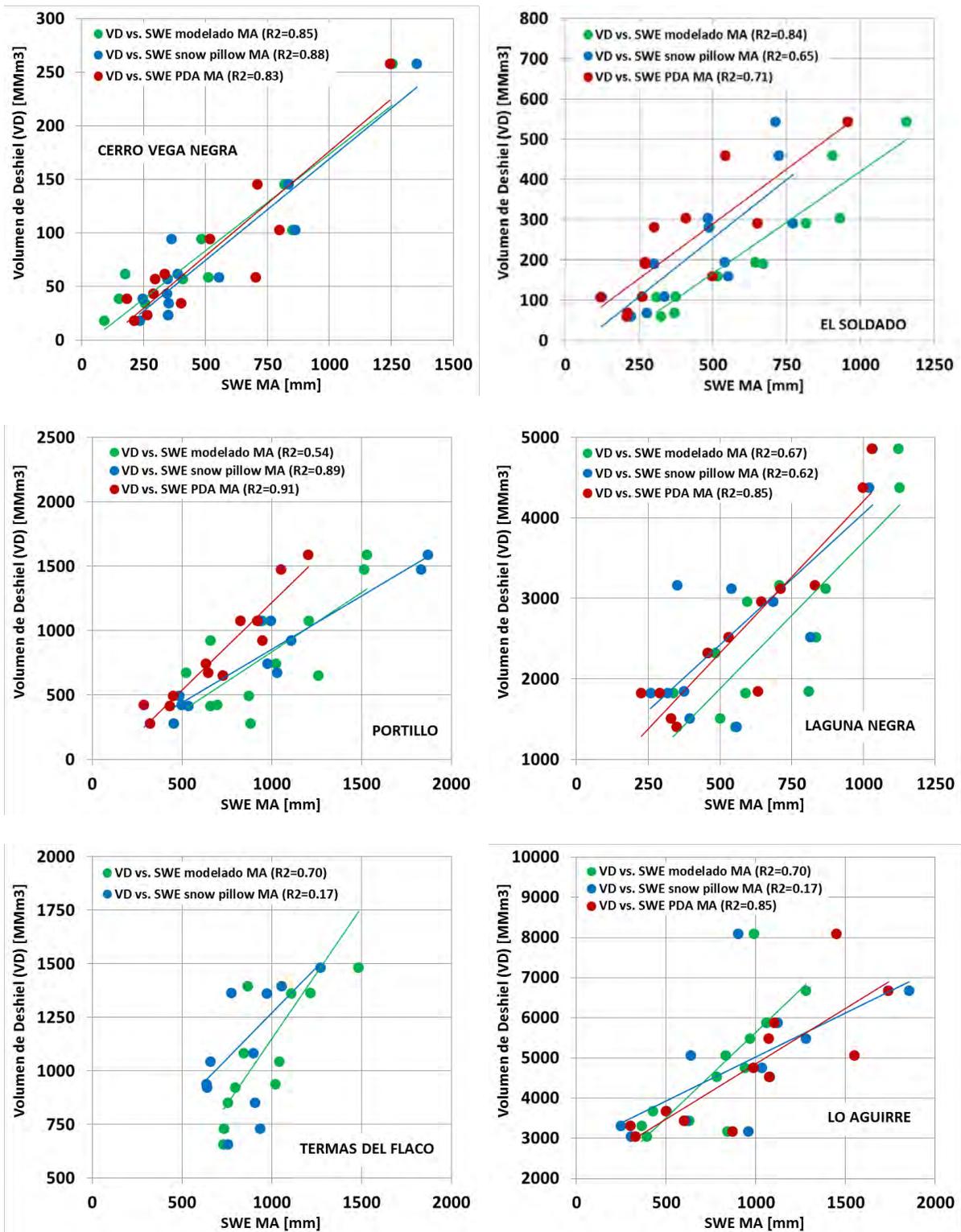


Figura 5.3.- Capacidad predictiva del SWE modelado, estimado y observado en distintos snow pillow respecto al volumen total de deshielo.

Cabe destacar además que en el caso de Laguna Negra y Lo Aguirre, existen diferencias claras entre el SWE observado (sensor) y el estimado (y posteriormente publicado en el Pronóstico de Disponibilidad de Agua (PDA)), dando a entender que es necesario establecer claramente los procedimientos de corrección y/o asimilación vía rutas de nieve, homogeneizando dichos procedimientos para todos los snow pillows tratados. Esta es también, una manera paralela de validar la modelación, la cual es considerada satisfactoria dado que cuatro de seis snow pillows de control comparten una calidad predictiva similar a la generada con el producto modelado por lo que se garantiza la utilización de la modelación distribuida como fuente de generación de mapas del coeficiente de determinación SWE – VD para efectos de determinar futuras ubicaciones para ampliar la red nivométrica nacional.

Tabla 5.2.- R^2 SWE – VD para valores del SWE considerados por la DGA (superior). R^2 SWE – VD para valores modelados en 12 años de modelación.

Snow Pillow	R^2 VD vs. SWE MA en cada SP (telemetría)[mm]	R^2 VD vs. SWE MA** según PDA (pronóstico disponibilidad de agua) [mm]
Cerro Vega Negra	0.88	0.83
El Soldado	0.65	0.71
Portillo	0.89	0.91
Laguna Negra	0.62	0.85
Termas del Flaco	0.17	sin datos
Lo Aguirre	0.40	0.67

Snow Pillow	R^2 VD vs. SWE MA en cada SP (modelado) [mm]	Clase en el mapa R^2_{SWE-VD}
Cerro Vega Negra	0.84	4 (alta capacidad predictiva)
El Soldado	0.84	4 (alta capacidad predictiva)
Portillo	0.49	1 (nula capacidad predictiva)
Laguna Negra	0.61	2 (baja capacidad predictiva)
Termas del Flaco	0.70	3 (media capacidad predictiva)
Lo Aguirre	0.59	2 (baja capacidad predictiva)

* Las estaciones nivométricas Quebrada Larga, y Alto Mallines no se incluyen en este análisis debido a que están fuera de las cuencas pronosticadas (PDA) por la Dirección General de Aguas.

** MA = máxima acumulación.

Finalmente, para evaluar la expansión de la red nivométrica se recurrirá a la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve desarrollada, implementada y validada en el marco del presente estudio. Para esto se generarán mapas del coeficiente de determinación R^2 entre las variables SWE – VD (volumen total de deshielo), herramienta que designaremos como R^2_{SWE-VD} . Más detalladamente, este valor corresponderá a la calidad de la regresión de un ajuste lineal cualquiera entre el volumen de deshielo de cada cuenca de control (cuencas de pronóstico utilizadas por la Dirección General de Aguas) y el SWE modelado en máxima acumulación para cada pixel en particular. De esta manera se construye la regresión para los 12 años modelados. Notar que la correlación buscada asociará el VD de una cuenca con los pixeles que están exclusivamente contenidos en ella. Para hacer más fácil la comprensión y visualización de este producto se ha decidido clasificar los valores de R^2_{SWE-VD} según:

$$R_{SWE-VD}^2 = \begin{cases} \text{clase 1: capacidad predictiva nula} \Leftrightarrow 0 \leq R_{SWE-VD}^2 < 0.5 \\ \text{clase 2: capacidad predictiva baja} \Leftrightarrow 0.5 \leq R_{SWE-VD}^2 < 0.65 \\ \text{clase 3: capacidad predictiva media} \Leftrightarrow 0.65 \leq R_{SWE-VD}^2 < 0.8 \\ \text{clase 4: capacidad predictiva alta} \Leftrightarrow 0.8 \leq R_{SWE-VD}^2 < 1 \end{cases} \quad [5.1]$$

La clasificación del R_{SWE-VD}^2 considera la evaluación del p -valor, probabilidad que explica el grado de significancia de la regresión lineal con los grados de libertad del problema asociados al tamaño muestral y número de predictores. Si el p -valor es menor a 0.05, el coeficiente de determinación es significativo para una confianza del 95% (rechazando la hipótesis nula de no linealidad entre el SWE y el VD). Paralelamente se ha incluido en el conjunto no significativo aquellos pixeles cuyos tamaños muestrales sean menor o igual a seis años (la mitad del total de posibles puntos por ajustar). Esto quiere decir que al menos, los pixeles con R_{SWE-VD}^2 significativo poseerán 7 años con cobertura nival para el periodo de máxima acumulación nival entendiendo que este resultado es derivado directamente de la modelación.

Con esta herramienta mapeada es posible (1) definir zonas de distinta naturaleza predictiva que podrían ser incorporadas a la red nivométrica y/o reforzadas con nuevas mediciones continuas del SWE y (2) evaluar la predictibilidad de las estaciones nivométricas actuales, entre otras posibles aplicaciones (**Tabla 4.2 – inferior**) a modo de validar este producto. En la **Figura 5.4a** se ha generado el mapa de R_{SWE-VD}^2 considerando un ajuste lineal, evaluando solo aquellas zonas con correlación significativa y con tamaños muestrales mayores a 6 años. Paralelamente, se desarrolla un análisis auxiliar enfocado a asegurar la existencia de cobertura nival (en términos de un equivalente en agua de nieve mínimo umbral) para una condición de tipo de año hidrológico seco estándar construido como el promedio de los tres años más secos por cluster de la serie 2001 - 2012. Esta clasificación se efectúa en términos del volumen total de deshielo. En la **Figura 5.5** se presenta una gráfica con la elevación mínima requerida para asegurar la existencia de cobertura en función de este umbral de SWE mínimo (considerado entre un rango de 100 milímetros a 500 milímetros). La base de esta herramienta radica en la fuerte correlación encontrada entre el SWE y la elevación a una escala regional modelable con un producto satelital MODIS.

La generación de ambas herramientas (1) mapa clasificado de R_{SWE-VD}^2 y (2) gráfica de elevación mínima en función del SWE umbral mínimo permitirá seleccionar ubicaciones con una capacidad predictiva del VD conocida garantizando la existencia de equivalente en agua de nieve para un escenario de escasez hídrica estándar a la hora de inicializar un pronóstico del caudales medios mensuales de deshielo que involucre este predictor. En las **Figura 5.4b – m** se muestra en detalle la situación de cada sistema de cuencas junto son el mapa de isocotas de manera de señalar mediante zonas potenciales (circulares en color cian) aquellas áreas en donde es posible extender la cobertura de la red nivométrica actual.

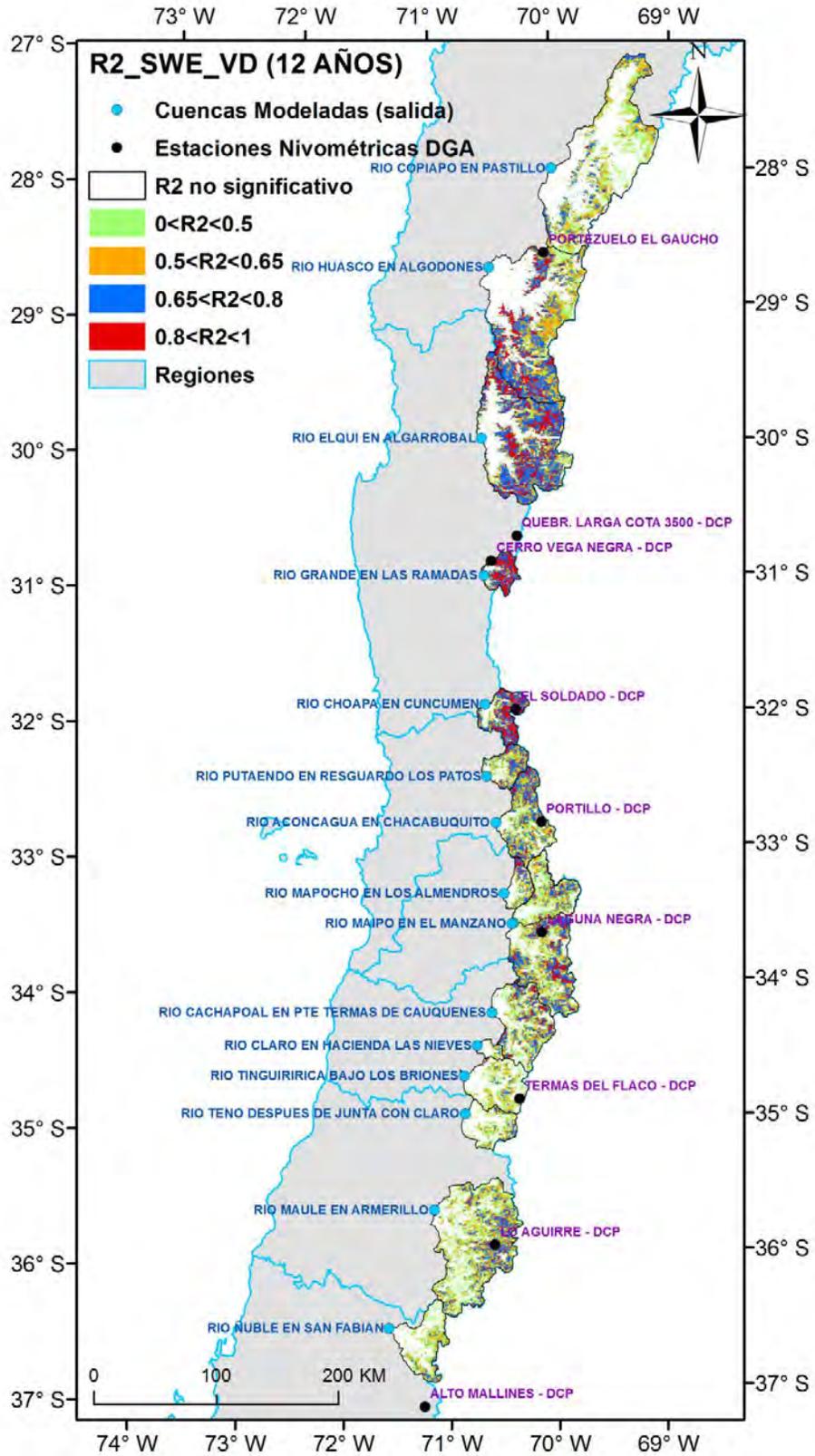


Figura 5.4a.- Mapa de la herramienta R_{SWE-VD}^2 para el caso 12 años, 4 grupos significativos.

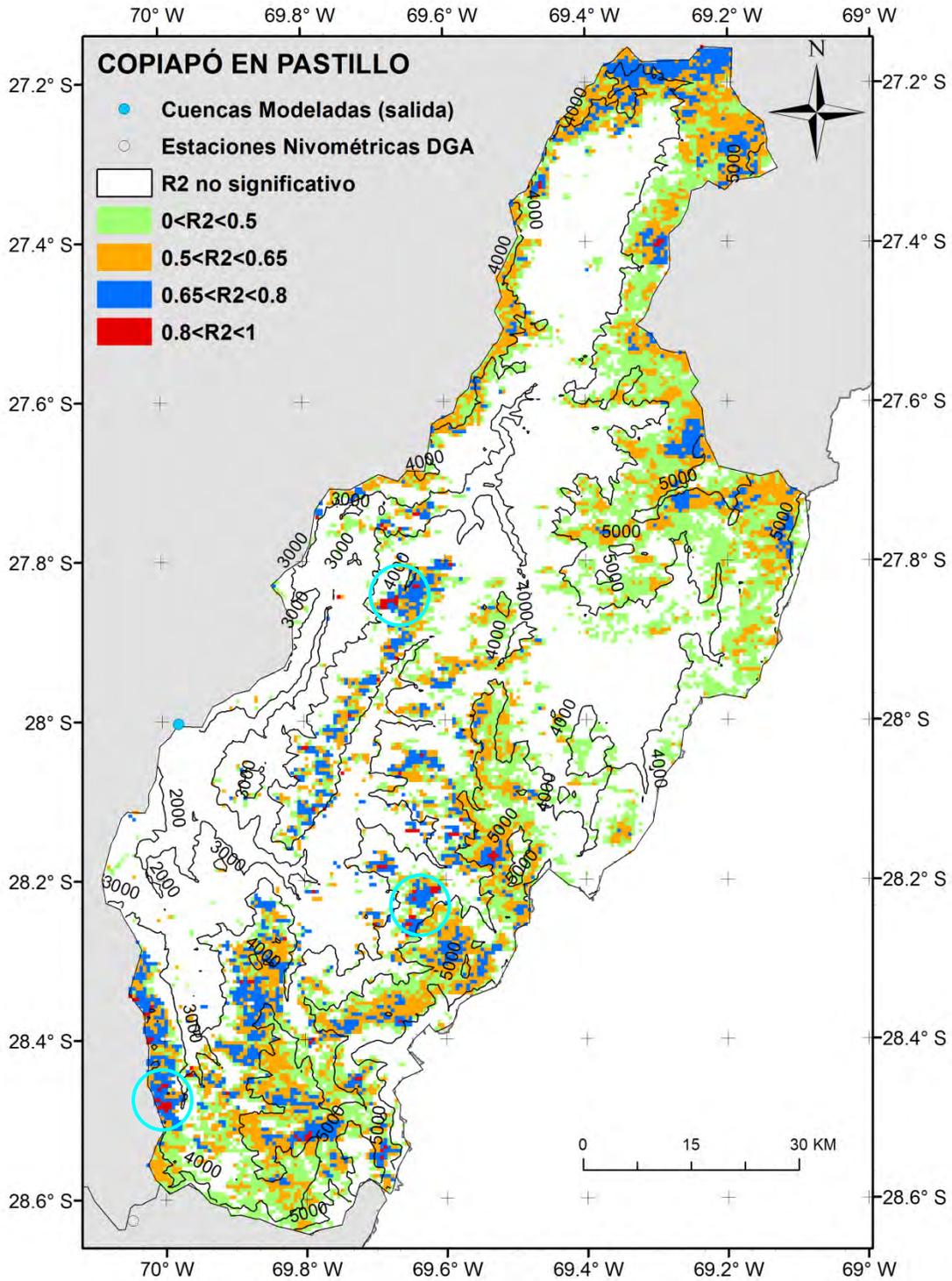


Figura 5.4b.- Mapa de la herramienta R^2_{SWE-VD} para el caso 12 años, 4 grupos significativos. Cuenca Copiapó en Pastillo.

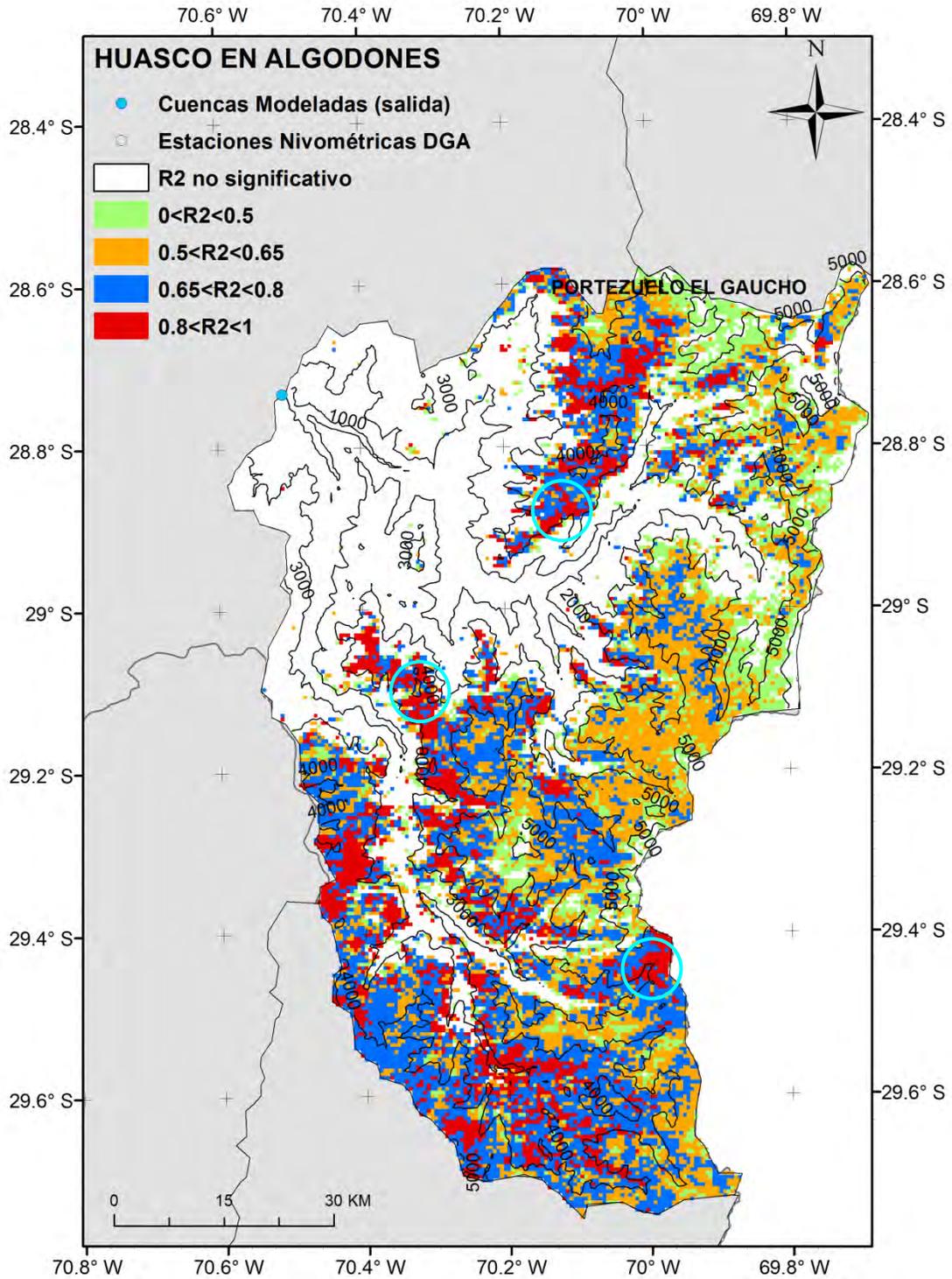


Figura 5.4c.- Mapa de la herramienta R_{SWE-VD}^2 para el caso 12 años, 4 grupos significativos. Cuenca Huasco en Algodones.

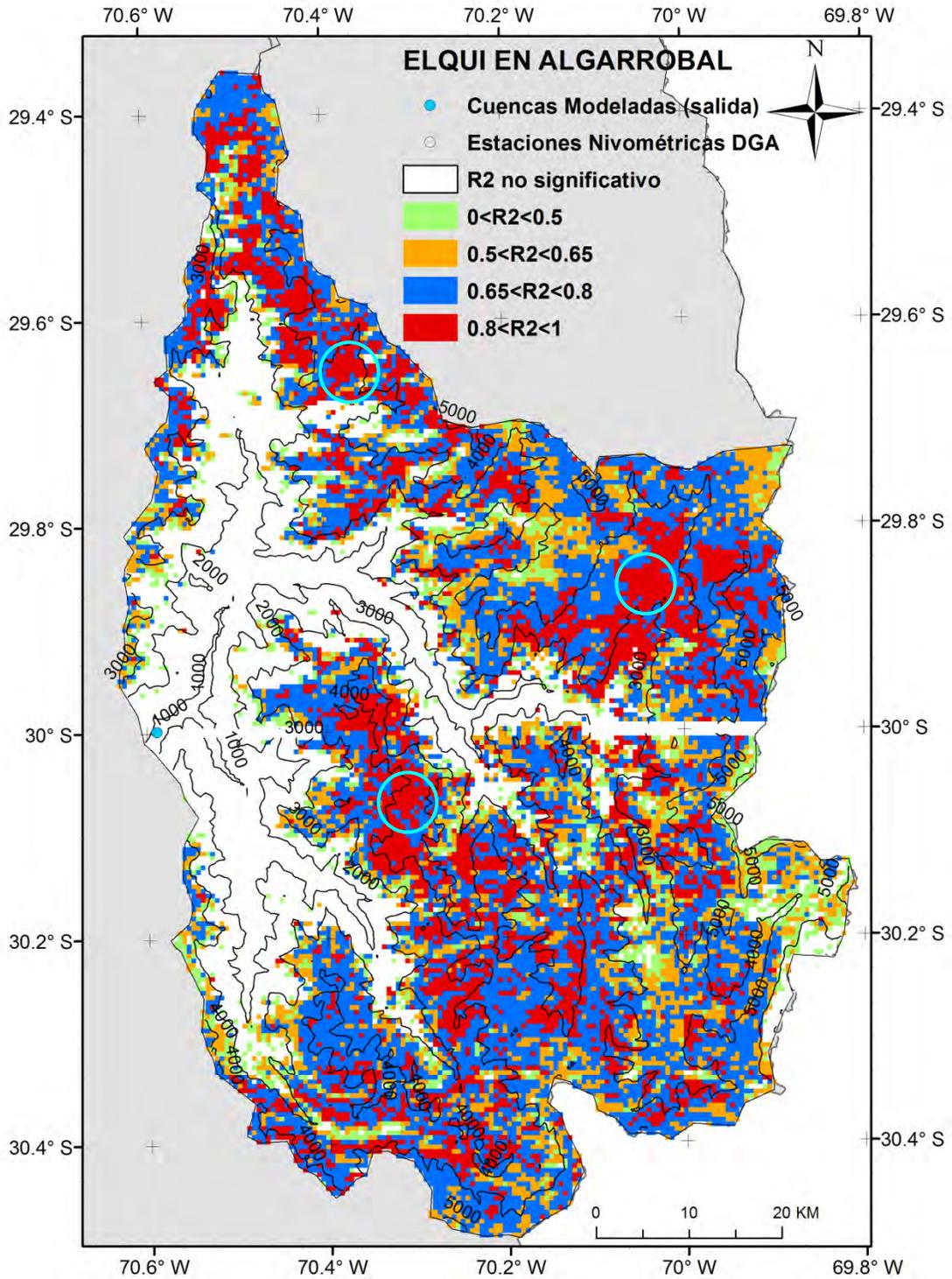


Figura 5.4d.- Mapa de la herramienta R_{SWE-VD}^2 para el caso 12 años, 4 grupos significativos. Cuenca Elqui en Algarrobal.

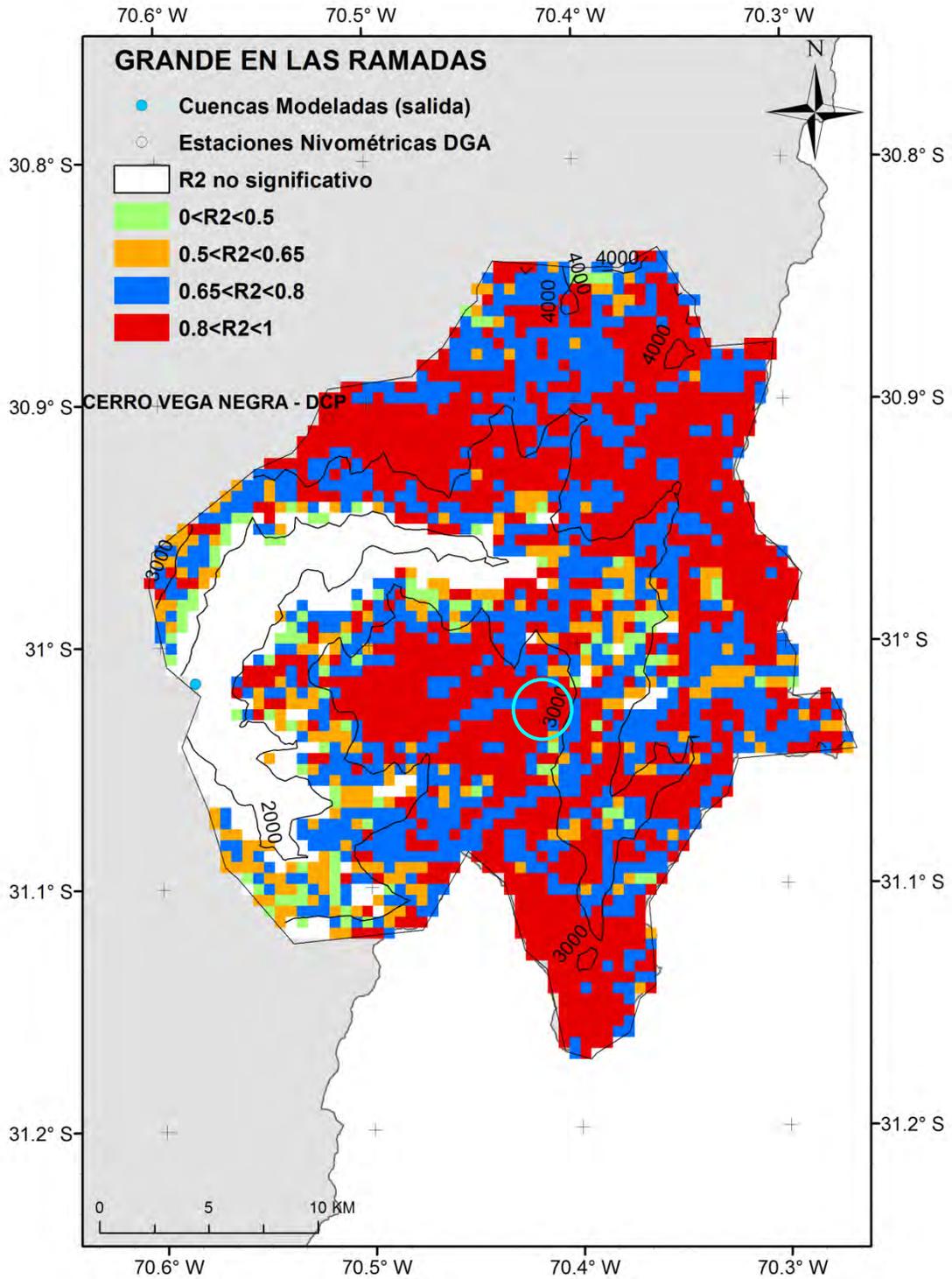


Figura 5.4e.- Mapa de la herramienta R_{SWE-VD}^2 para el caso 12 años, 4 grupos significativo. Cuenca Grande en Las Ramadas.

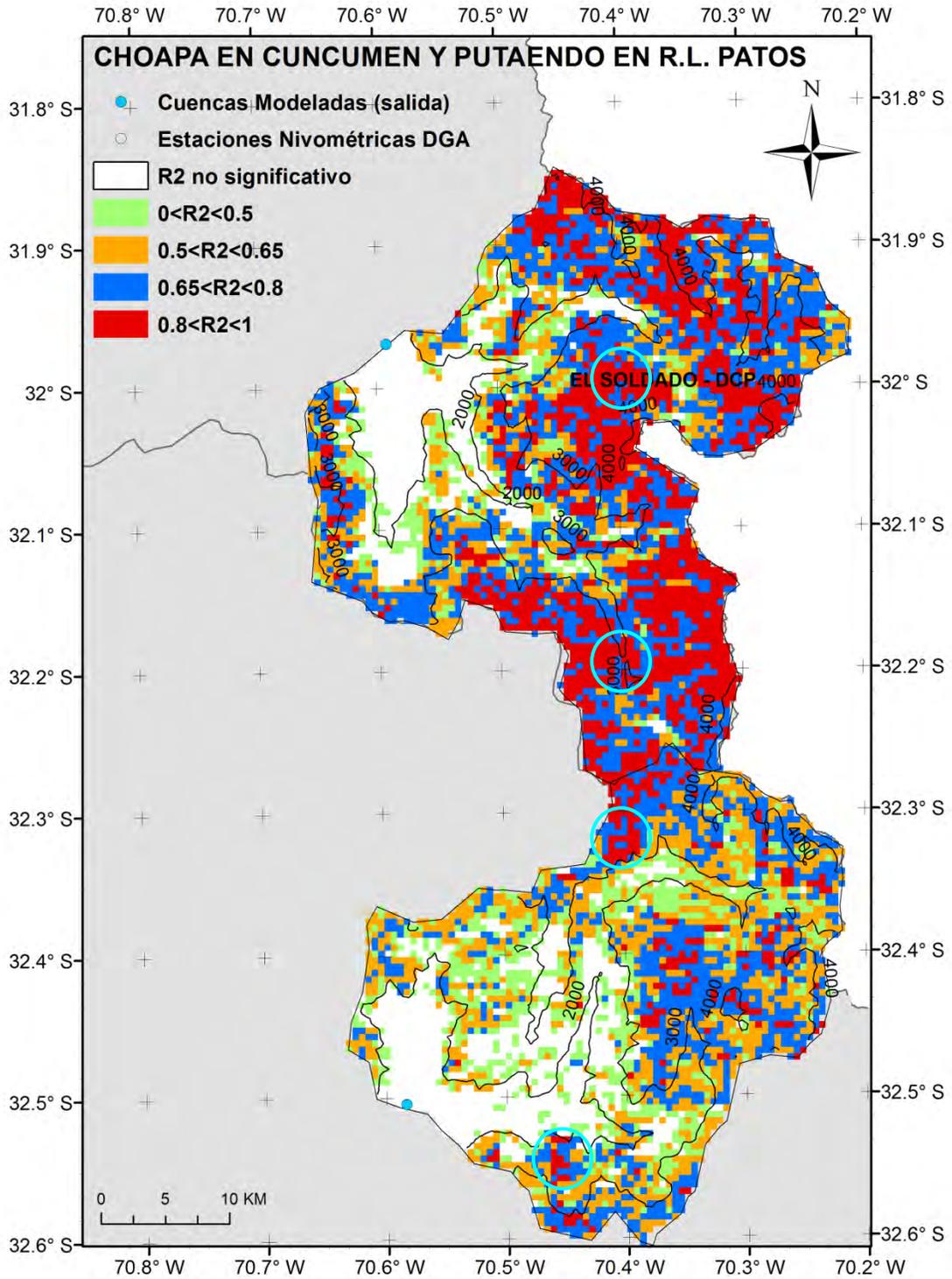


Figura 5.4f.- Mapa de la herramienta R_{SWE-VD}^2 para el caso 12 años, 4 grupos significativos. Cuenca Choapa en Cuncumén y Putaendo en Resguardo Los Patos.

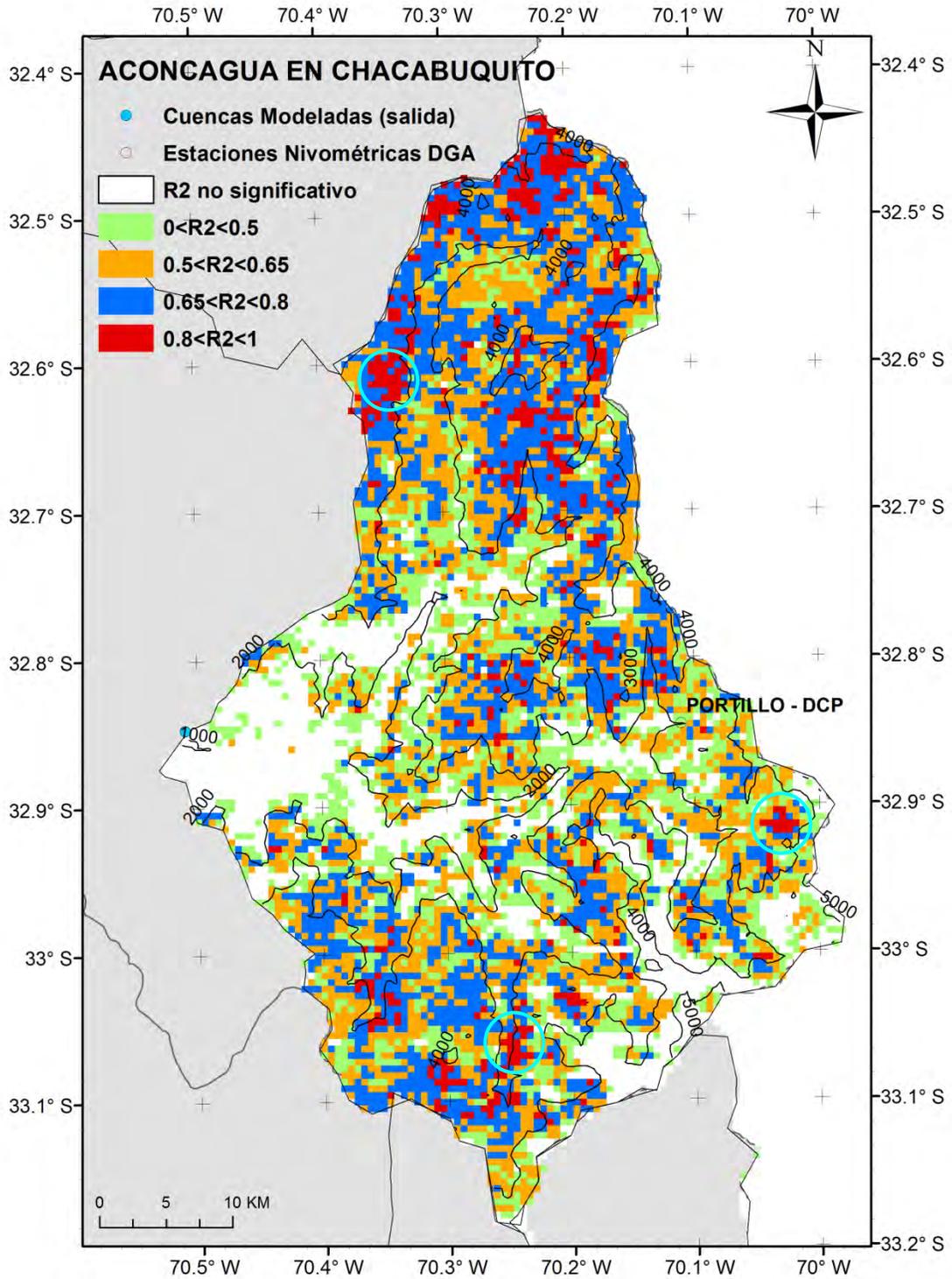


Figura 5.4g.- Mapa de la herramienta R_{SWE-VD}^2 para el caso 12 años, 4 grupos significativos. Cuenca Aconcagua en Chacabuco

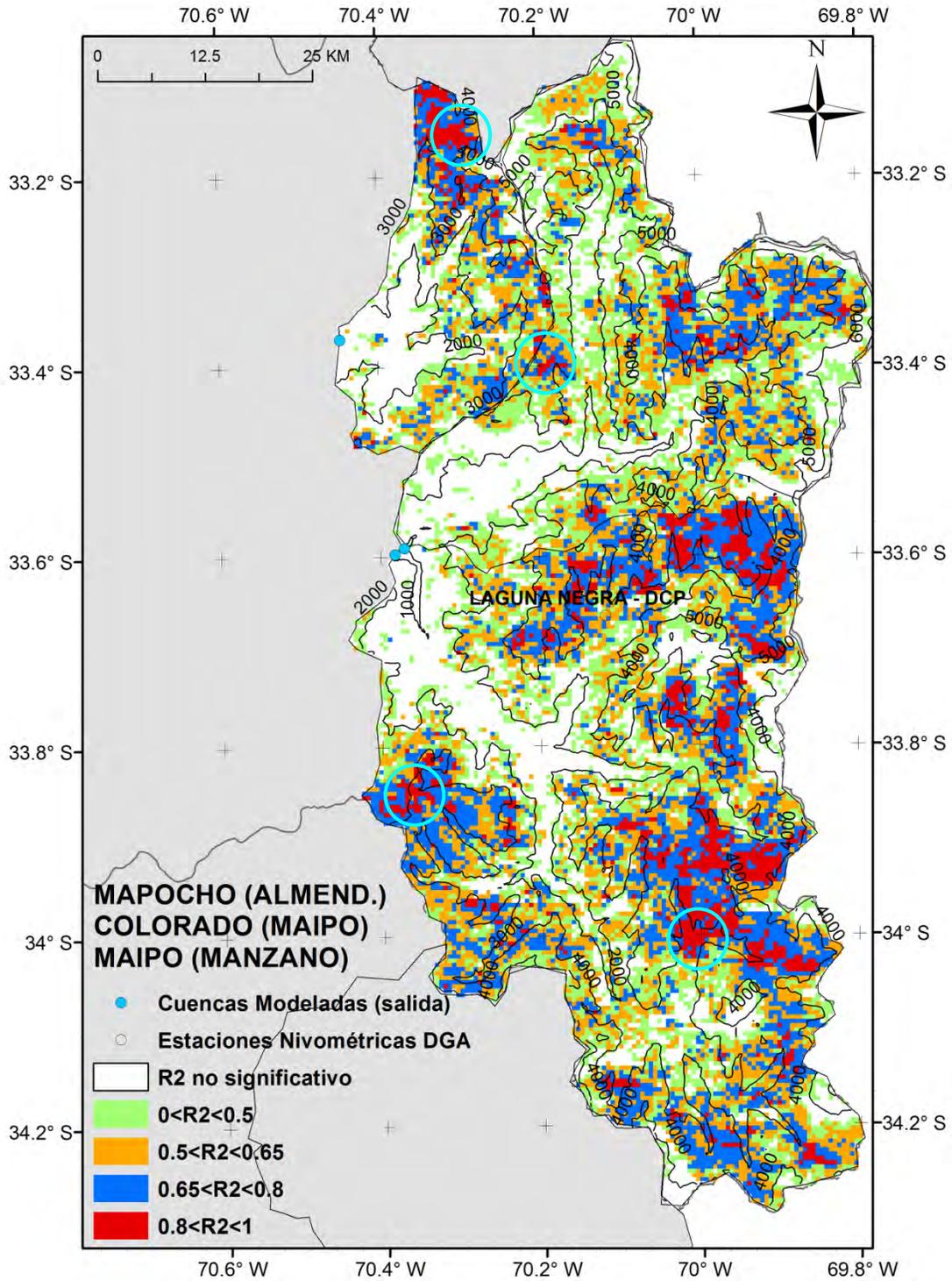


Figura 5.4h.- Mapa de la herramienta R^2_{SWE-VD} para el caso 12 años, 4 grupos significativos. Cuencas Mapocho en Los Almendros, Colorado en Junta río Maipo y Maipo en El Manzano.

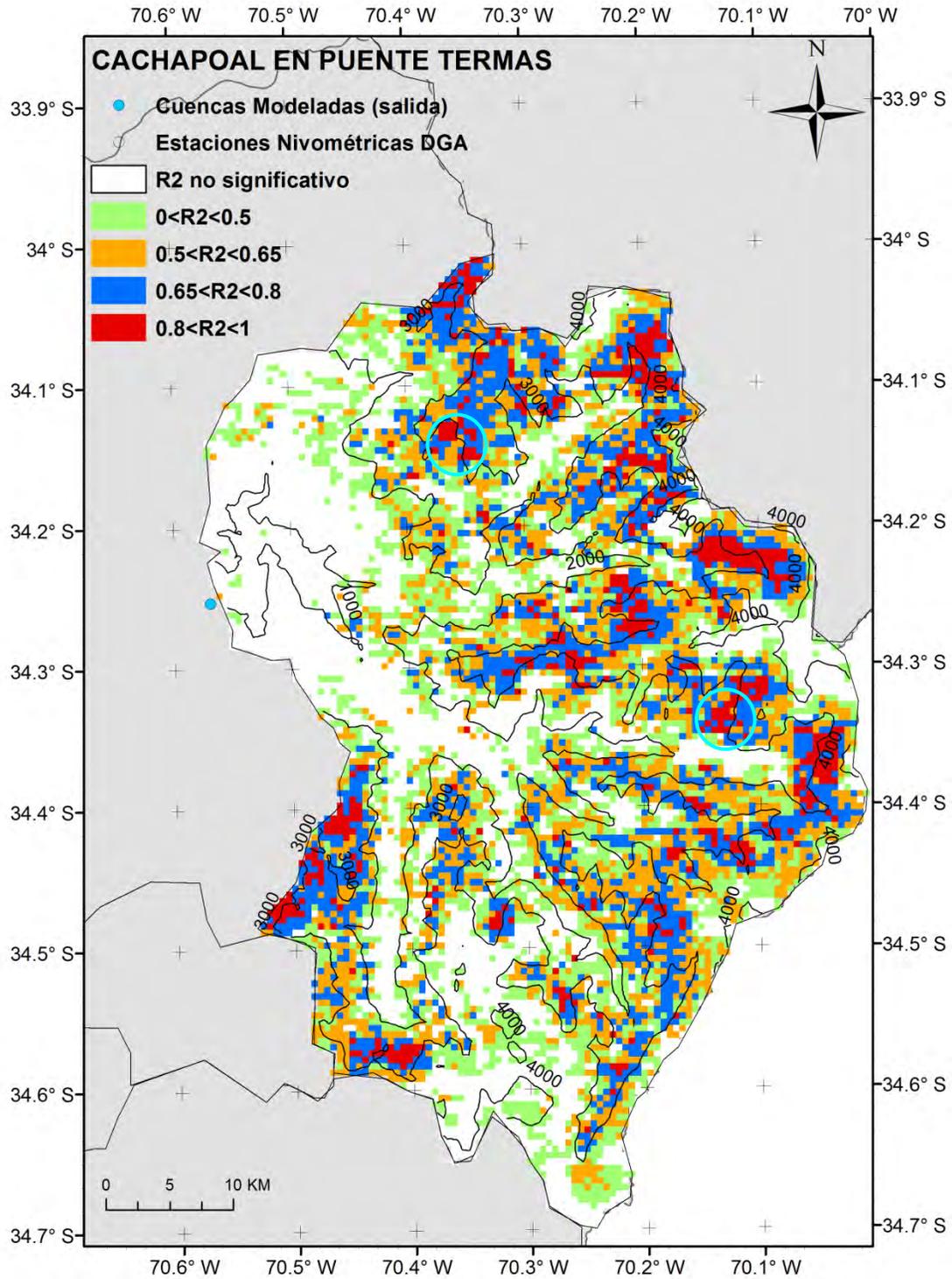


Figura 5.4i.- Mapa de la herramienta R^2_{SWE-VD} para el caso 12 años, 4 grupos significativos. Cuenca Cachapoal en Puente Termas.

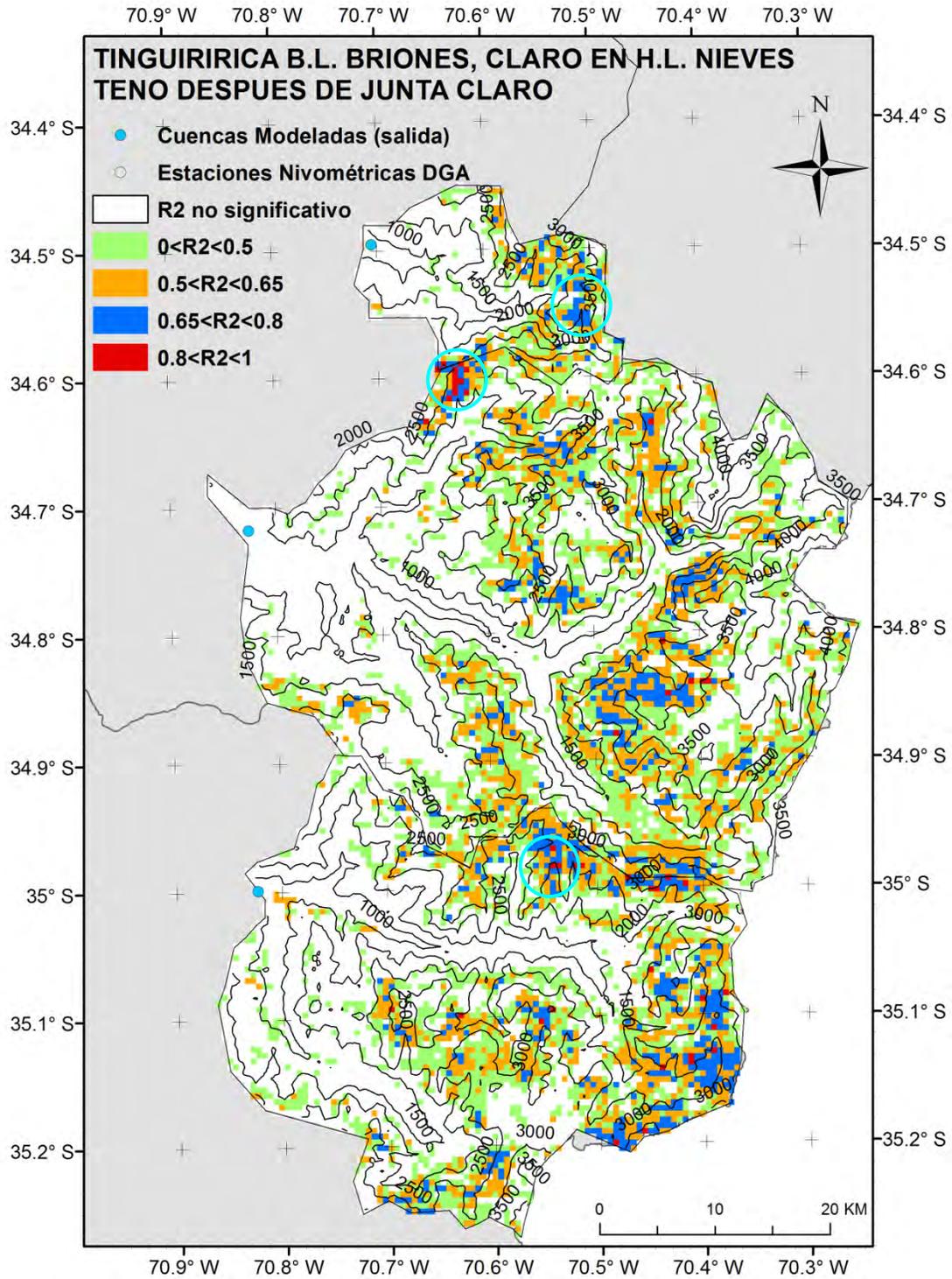


Figura 5.4j.- Mapa de la herramienta R^2_{SWE-VD} para el caso 12 años, 4 grupos significativos. Cuencas Tinguiririca bajo Los Briones y Teno después de junta río Claro.

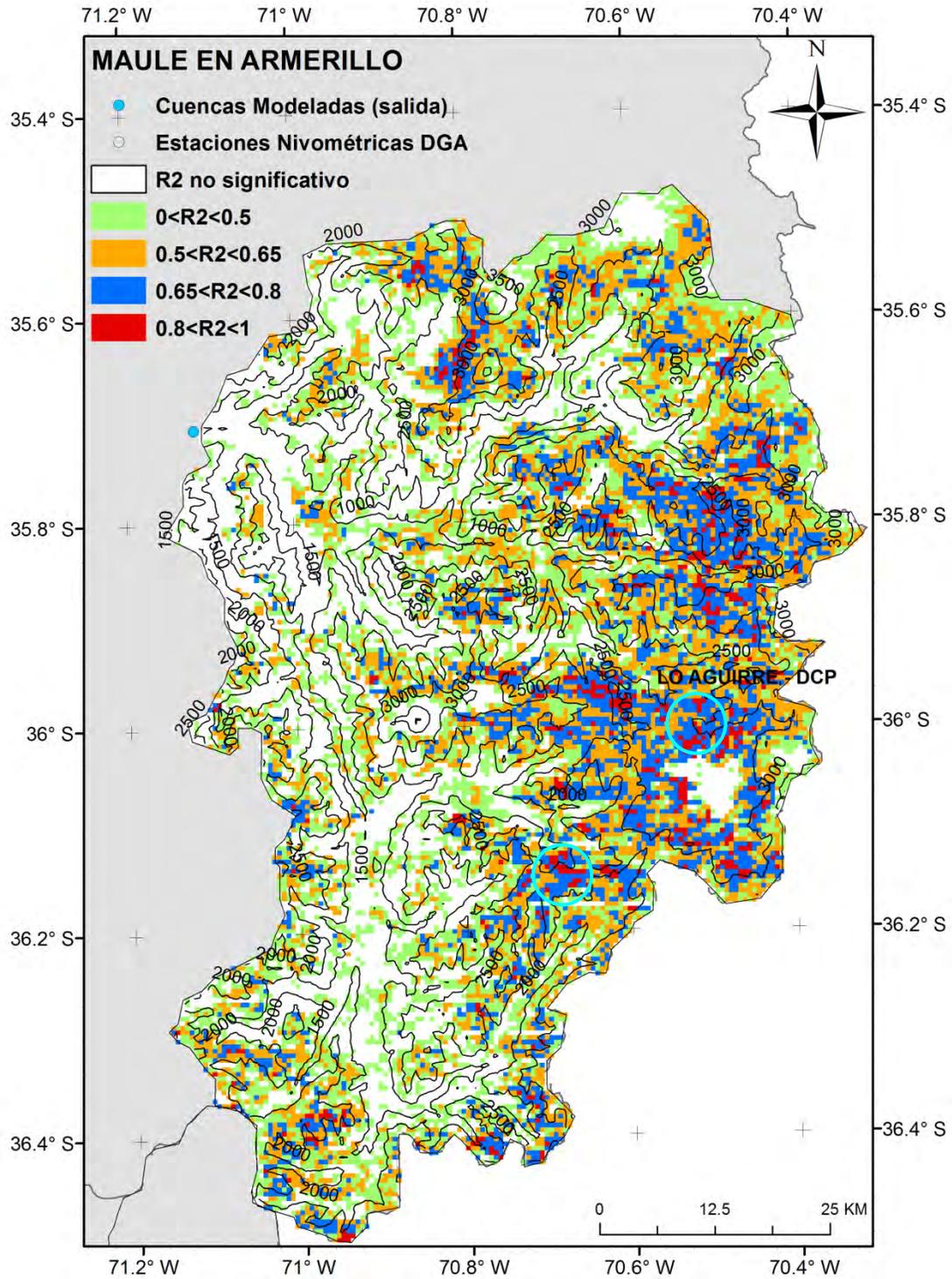


Figura 5.4k.- Mapa de la herramienta R^2_{SWE-VD} para el caso 12 años, 4 grupos significativo. Cuenca Maule en Armerillo.

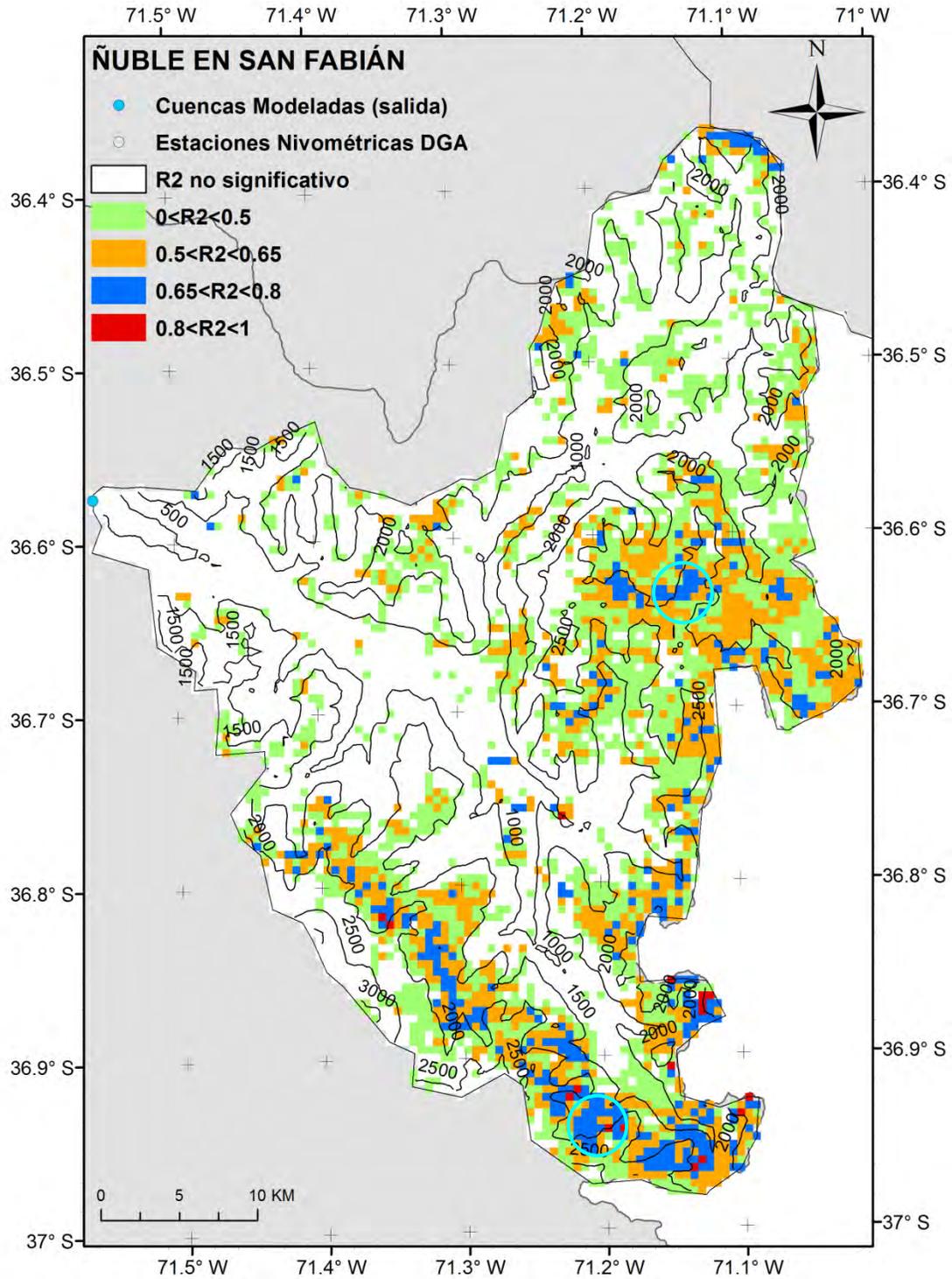


Figura 5.4I.- Mapa de la herramienta R^2_{SWE-VD} para el caso 12 años, 4 grupos significativos. Cuenca Nuble en San Fabián.

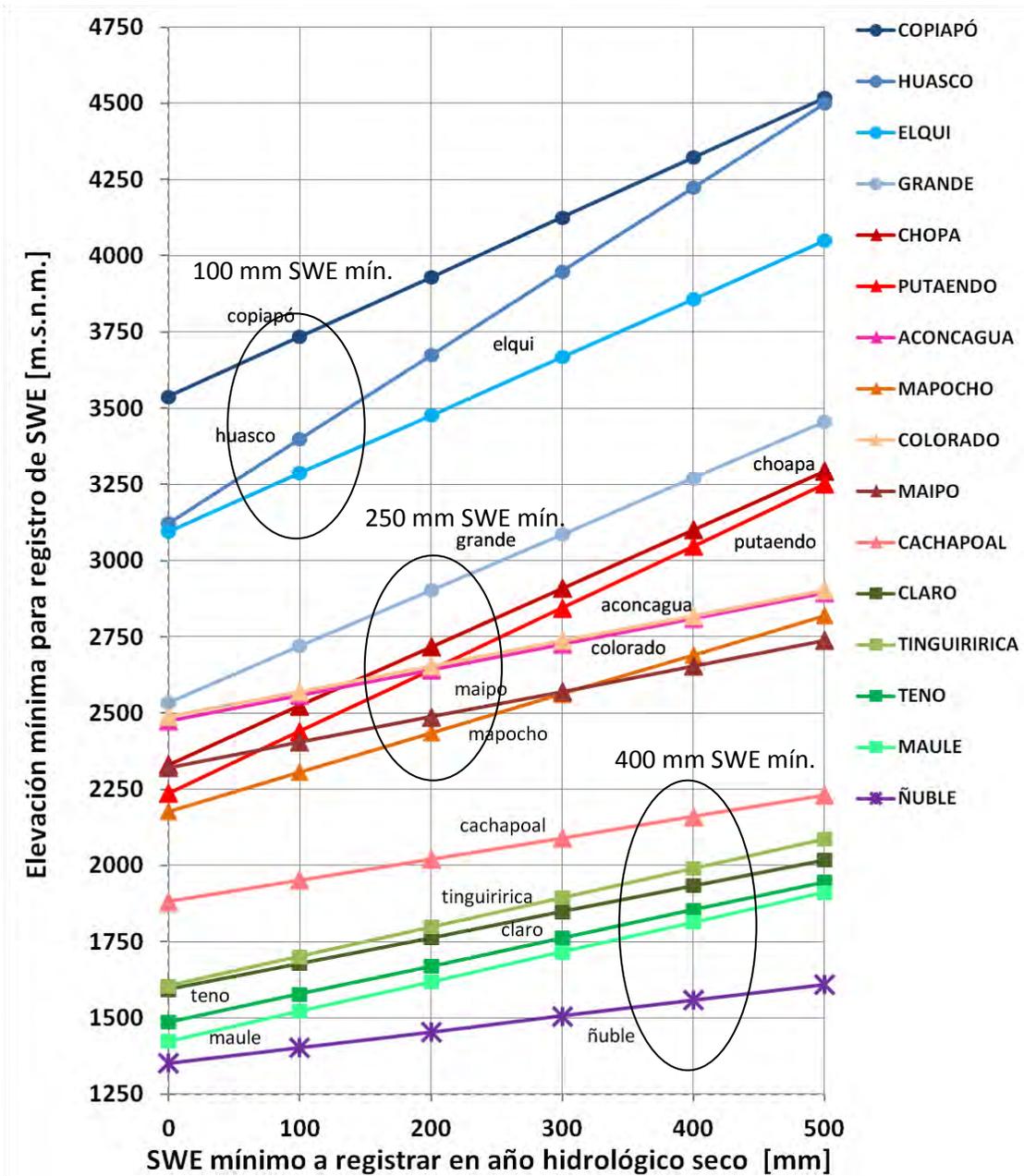


Figura 5.5.- Elevación mínima en función del equivalente en agua de nieve umbral mínimo en un escenario estándar año hidrológico tipo seco.

5.3. Evaluación técnico - operacional de la medición nivométrica (estaciones nivométricas visitadas en 2012 – 2014).

Tras el reconocimiento de tres snow pillows en terreno realizado durante los años 2012, 2013 y 2014 se constató el estado actual de la instrumentalización y disposición de las obras civiles, ejercicio que permitió definir dos estándares técnicos para el diseño de estaciones nivométricas. A modo general, se sugiere dos tipos de instalaciones, una tipo *básica* y otra tipo *avanzada*. La estación nivométrica básica está pensada como un refuerzo de la cobertura de la red nivométrica actual, enfocada en la medición de las variables nivométricas y meteorológicas básicas en el proceso precipitación – acumulación nival, viento y derretimiento indirecto del manto nival. La estación nivométrica avanzada está pensada como una nueva estación o también, como el reforzamiento técnico de una estación nivométrica existente para alcanzar un estándar que permita modelar los procesos físicos en el manto nival. Además de la definición de ubicaciones mediante un criterio técnico en función de la calidad predictiva del equivalente en agua de nieve modelado respecto al volumen total de deshielo se suma el incremento de la información extraída en terreno por cada estación, enriqueciendo la disponibilidad de nuevas variables y ubicaciones a incorporar en los modelos de pronóstico a inicializar en Septiembre, tales como la temperatura y humedad relativa del aire, dirección y velocidad del viento, temperatura del manto nival, balance radiativo de onda corta, balance radiativo de onda larga. Las especificaciones de los instrumentos / dispositivos / sensores sugeridos y observaciones afines se listan a continuación (**Tabla 5.3a** - estación tipo básica, **Tabla 5.3b**, estación tipo avanzada, **Tabla 5.3c**, equipos asociados).

Tabla 5.3a. Especificaciones instrumentos de estación nivométrica tipo básica.

Estación Nivométrica tipo Básica			
Instrumentos / Unidades	Rango / Precisión	Instalación / Observaciones	Propósito (ejemplos)
Temperatura del aire (1)	-30 – + 50 °C / ± 0.5 °C	2 o 5 metros sobre el suelo (manto nival), brazo horizontal, protección contra radiación solar incidente	Modelos grado día / BME manto nival
Precipitación total tipo báscula (1)	200 cm ² / ± 0.1 mm (tasa)	Mástil paralelo a 2 metros sobre el suelo (manto nival) protegido con panel protector por viento. Debe tener mantención de líquido anticongelante, vaciamiento y en lo posible, con calefactor	Modelos hidrológicos / patrones acumulación
Altura de nieve ultrasónico (1)	0.5 – 10 m / ± 0.25 mm	Ubicado en brazo horizontal a 2 metros del suelo (manto nival)	Modelos hidrológicos / BME manto nival
Monitor de viento (1)	0 – 100 m/s / ± 0.3 m/s 0 – 360 deg. / ± 5 deg.	Ubicado a 2 o 5 metros sobre el suelo (manto nival) al tope del mástil. Debe estar al lado contrario del panel solar	Patrones acumulación / modelo transporte eólico
Snow Scale (Pillow) (1)	0 – 2000 mm / ± 0.1 mm (SWE)	Colocado a 5 - 10 metros de ambos mástiles en un terreno plato y delimitado de manera que sea imperturbable.	Modelos hidrológicos / BME manto nival

Tabla 5.3b. Especificaciones instrumentos de estación nivométrica tipo avanzada.

Estación Nivométrica tipo Avanzada			
Instrumentos / Unidades	Rango / Precisión	Instalación / Observaciones	Propósito (ejemplos)
Temperatura y humedad relativa del aire (junto) (1)	-30 - + 50 °C / ± 0.5 °C	Ídem estación tipo básica	Modelos grado día / BME manto nival
Barómetro (1)	600 - 1100 mbar / ± 1.5 mbar	Se instala usualmente dentro del gabinete	BME manto nival
Precipitación total tipo báscula (1)	Ídem estación tipo básica	Ídem estación tipo básica	Modelos hidrológicos / patrones acumulación
Altura de nieve ultrasónico (1)	Ídem estación tipo básica	Ídem estación tipo básica	Modelos hidrológicos / BME manto nival
Monitor de viento (1)	Ídem estación tipo básica	Ídem estación tipo básica	Patrones acumulación / modelo transporte eólico
Snow Scale (Pillow) (1)	Ídem estación tipo básica	Ídem estación tipo básica	Modelos hidrológicos / BME manto nival
Radiómetro Neto (1) o Piranómetro (2)	0.30 - 2.8 μm / ± 20 μV/W/m ² (piranómetro) 0.45 - 4.2 μm / ± 20 μV/W/m ² (pirgeómetro)	Montado en brazo horizontal a 2 metros del suelo (manto nival). Separación de la radiación neta en 4 partes	BME manto nival / Patrones acumulación
Cadena de termistores (1)	-80 - + 75 °C / ± 0.25 °C	Se aconseja uno cada 50 cm en el manto nival (vertical). Deben ser resistentes al agua	BME mano nival multicapa

Tabla 5.3c. Especificaciones de dispositivos de control, energización, almacenamiento y transmisión.

Equipos asociados (ambos tipos de estaciones)	Especificación	Instalación / Observaciones
Datalogger (1)	Extracción de datos vía Ethernet – manual – tarjeta PC Variados tipos de salidas.	***
Batería interna con regulador de voltaje (1)	Recargable – 12 Volt – 7Ah	***
Panel Solar (1)	20 W	Orientada al Norte y montada sobre el mástil libre de efectos de sombra por los otros instrumentos. Requiere de una barra de cobre a tierra
Gabinete (1)	Índice protección IP 6 polvo, 6 agua	Índice IP mínimo en alta montaña
Modem de transmisión remota (opcional) (1)	Propio del tipo de antena de telemetría a utilizar	Requiere de la alineación de la antena con el ángulo de recepción satelital y de un GPS orientado al Norte y montado en un brazo horizontal

Respecto a la instalación de las obras civiles cabe destacar algunas consideraciones básicas. Se sugiere que la estación meteorológica propiamente tal debe ir montada en una torre de base triangular enrejada con distinción de colores por metro lineal. Esto permite estabilidad y la posibilidad de operar con seguridad. La altura mínima dependerá del promedio de la acumulación nival en años húmedos estimada para la locación. La idea es que en una condición de máxima acumulación nival, el sensor de

temperatura / humedad relativa del aire, monitor de viento, sensor ultrasónico y radiómetro neto / piranómetro estén a una altura de no menos de 2 metros sobre el manto nival. En el caso de disponer de un diseño con múltiples sensores de temperatura / humedad relativa del aire y monitores de viento, se sugiere la instalación a 2, 5 y 10 metros del suelo (**WMO, 2006**). El pluviómetro debe ir en un mástil separado (>3 metros respecto a la torre meteorológica) a modo de no comprometer el trayecto de la precipitación hacia el contenedor. Este debe ser instalado a 2 metros de la superficie del manto nival y protegido con un panel protector por viento el cual reduce las pérdidas de precipitación a causa del viento.

La utilización de vientos para garantizar la estabilidad de la obra civil (torre / mástil) es recomendada solo al inicio de las obras dado que en el periodo de acumulación nival puede generar una sobrecarga por el peso de la nieve, pudiendo potenciar la inclinación de las estructuras en una dirección. Un punto importante es la nivelación del radiómetro neto / piranómetro, pluviómetro y antena de telemetría, instrumentos que requieren de dicha nivelación horizontal o angular, relacionada también con la nivelación de la estructura. La utilización de rejas para cercar la genera algunos problemas a la hora de correcta instalación. No se recomienda cercar un *snow scale* (pillow) debido a que esto genera una sobreacumulación de nieve en ella, pudiendo inducir a una sobreestimación del snow scale (pillow) en la temporada de deshielo avanzada. Se recomienda cercar la estación nivométrica completa en un perímetro de 3 metros respecto a la disposición de las obras - instrumentos. La disposición sugerida de los elementos dentro de la estación meteorológica se presenta a continuación (**Figura 5.6**). El siguiente diagrama ejemplifica la disposición de la torre meteorológica, el mástil del pluviómetro, el snow scale y un mástil opcional para el sensor ultrasónico.

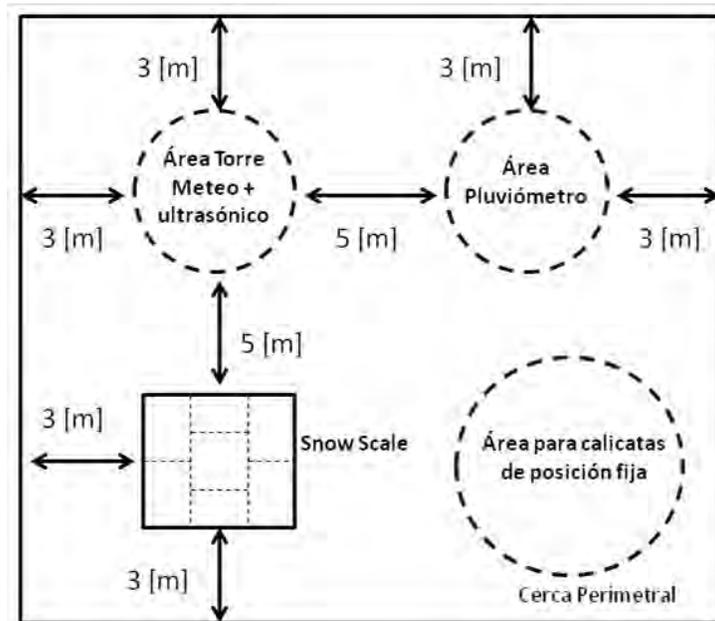


Figura 5.6. Ejemplo de disposición en planta de una estación nivométrica (básica o avanzada).

5.4. Propuesta final respecto al análisis de la red nival necesaria para cuantificar los recursos hídricos en los Andes de Chile central.

A continuación se procede a evaluar al estado actual de la red nivométrica nacional, formulando una propuesta final para su mejoramiento. Este análisis comprende la discusión de todos los capítulos previos expuestos en este informe en un sentido inclusivo, enfocando dicha propuesta final en el marco del mejoramiento del pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo en base a herramienta que incluya parámetros físicos relacionados con el equivalente en agua de nieve medido en terreno. Los puntos a tratar corresponden a: (1) estructura actual del pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo, (2) incorporación de nuevas variables y/o extensión de la cobertura de las estaciones hidro - climatológicas para efectos del pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo, (3) estado actual de la red nivométrica, (4) mejoras de la red nivométrica actual respecto al tipo de estación nivométrica sugerida, (5) mejoras en la instalación - mantenimiento y corrección de errores sistemáticos en la medición del manto nival y, (6) una propuesta final para la extensión de la cobertura espacial de la red nivométrica actual.

Estructura actual del pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo.

El presente estudio propone una nueva metodología de pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo (de carácter estadístico) basada básicamente en cuatro elementos: (1) la agrupación y posterior simplificación del número de cuencas por pronosticar mediante la identificación de similitudes hidro-climáticas en el volumen de deshielo histórico, (2) la inclusión de predictores simples que son una síntesis de variables físicas observadas en terreno previo a la inicialización del pronóstico o bien, obtenidas de herramientas sinópticas sin requerimientos de modelación previa por parte del usuario, (3) la desagregación del volumen total de deshielo en porcentajes mensuales extraídos mediante el comportamiento histórico y (4) la generación de un resultado determinístico y una banda de incertidumbre basada en la estadística misma de la estructura del pronóstico y de los resultados históricos arrojados por este último. Cabe destacar que la metodología propuesta carece de adición de juicio de experto, haciéndola idónea para el apoyo en dicho ejercicio.

Respecto a la metodología de pronóstico de caudales de deshielo se sugiere mantener el esquema de agrupación hidro - climática y reducción del pronóstico a series sintéticas debido a que disminuye la incertidumbre de los predictores de inicialización de un nuevo pronóstico a la vez que otorga un sentido geográfico según la disposición secuencial de las cuencas conforme aumenta la latitud sur. Además, la utilización de componentes principales ahorra tiempos considerables de calibración y validación de los modelos estadísticos utilizados.

La inclusión de predictores simples (sin requerimientos de modelación por parte del usuario) es sugerida debido a la necesidad de contar con un esquema operacional simple que permita, en cosas de días, inicializar el pronóstico. La utilización de

predictores derivados de productos distribuidos que requieran procesamiento y/o modelación por parte del usuario podrían ser incluidos siempre y cuando exista la capacidad real de automatización operacional computacional. Respecto a los predictores utilizados en la metodología de pronóstico expuesta en este informe cabe destacar que, inclusive, al tener un modelo robusto, la incertidumbre detectada en inicializar los pronósticos en 2013 y 2014 asociada a la incertidumbre del valor exacto de los predictores requeridos es alta. Se recomienda contar con un sistema seguro y diario de recopilación y generación de los datos observados en terreno (precipitación, caudal, SWE) que construirán los predictores a utilizar. En el caso de las variables utilizadas, la precipitación suele contar con una base de datos actualizada semanalmente pero con errores en cuanto a cobertura espacial y seguridad de la adquisición y transmisión de datos. Esto impone un desafío al modelador dado que debe estimar y/o ajustar los predictores previo a su utilización en el modelo. En el caso del caudal esta situación es menos preocupante dada la seguridad en la adquisición y transmisión de los datos. Respecto al caudal, se sugiere publicar constantemente las series de caudales naturales o en su efecto, publicar las relaciones y datos pertinentes para su generación en tiempo real. En el caso de la información de equivalente en agua de nieve se ha detectado la utilización de una metodología para generar el valor máximo en el periodo invernal que bien puede contener datos del snow pillow y/o la observación de rutas de nieve. En este caso los valores estarán sujetos a la publicación por parte de la Dirección General de Aguas. Respecto a la desagregación mensual cabe destacar que existen múltiples metodologías para su realización, habiendo sido elegida para efectos de este estudio su versión más simple. El conocimiento de la evolución mensual es complejo dado que interviene necesariamente el efecto de las precipitaciones estivales. Un pronóstico de alta calidad mensual implicará una modelación mes a mes con un esquema de asimilación estadística, por ejemplo, con relaciones tipo grado día (simple o mejorada).

En cuanto al resultado del pronóstico se sugiere la inclusión de un resultado estocástico basado en bandas de incertidumbre. Esto nos da la posibilidad de (1) evaluar el desempeño del pronóstico al final de la temporada de deshielo con mayor facilidad y (2) poder incorporar el concepto de *seguridad estadística* en el producto publicado. Este elemento enriquece el resultado del pronóstico, siendo sumamente útil a la hora de la toma de decisiones para distintos ámbitos industriales que utilicen los resultados publicados.

Incorporación de nuevas variables y/o extensión de la cobertura de las estaciones hidro - climatológicas para efectos del pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo.

Dentro de la propuesta de mejoramiento de las instalaciones se sugiere aumentar la densidad de la red nivométrica con estaciones tipo básicas (en gran medida) y avanzadas (en menor medida). Las estaciones tipo básica están enfocadas en brindar datos para la generación de predictores para los modelos de pronóstico de caudales en cuencas nivales o nivo - pluviales (snow scale, pluviómetro, sensor ultrasónico) y el

estudio de patrones de precipitación invernales mediante variaciones en la temperatura del aire y velocidad / dirección del viento (tormentas convectivas y variación de campos de viento respecto al tipo de año hidrológico). La incorporación de los tres primeros instrumentos nombrados es clara. La medición de temperatura del aire y velocidad / dirección del viento permitirá mejorar la modelación del manto nival que podría eventualmente proveer información para la inicialización del pronóstico y, entender la generación dinámica de los clusters sugeridos. Las estaciones avanzadas incluyen otros instrumentos (presión atmosférica, humedad relativa del aire, temperatura del manto nival, radiación solar neta, etc.) vinculados a potenciar los puntos de calibración de modelos distribuidos del equivalente en agua de nieve utilizados para la generación de múltiples herramientas de diseño muestral en alta cordillera. Con mayor información (número de variables hidro - meteorológicas en este caso) se incrementará la calidad de los modelos de reconstrucción del equivalente en agua de nieve, desde modelos semi - empíricos (actual) a modelos de carácter netamente físicos que no dependan de calibración alguna.

Respecto al pronóstico del volumen total de deshielo se sugiere incorporar paulatinamente nuevos puntos predictores generados a partir de mediciones del equivalente en agua de nieve y/o sensor de altura de nieve y pluviometría. La incorporación de predictores asociados a la velocidad y dirección promedio del viento, radiación solar incidente, estado térmico inicial del manto nival y temperatura - humedad relativa del aire permitirá entender el dinamismo interanual de la distribución espacial del tipo de año hidrológico. Una propuesta detallada de la extensión de la cobertura de la red nivométrica actual se presenta en la **Tabla 5.5a - b**.

Estado actual de la red nivométrica.

La red nivométrica propiamente tal no es completamente útil a la hora de generar o inicializar un pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo si no cuenta con una red de estaciones de valle que apoyen las mediciones con valores de precipitación y caudal que permitan realizar extrapolaciones espaciales de estas variables propios de la metodología en un contexto geo - espacial.

Respecto a las estaciones ubicadas en zonas de la depresión intermedio y cordillera, la situación actual es la siguiente: actualmente se cuenta con aproximadamente con 45 estaciones con medición de temperatura del aire en zonas de valle - montaña, 75 estaciones con medición de precipitación líquida en zonas de valle - montaña, 9 estaciones nivométricas (de las cuales Portezuelo El Gaucho y Termas del Flaco presentan a problemas de locación / medición reiterativos), 9 estaciones con medición de radiación solar incidente (piranómetro - actinómetro) y/o horas sol (heliógrafo) de las cuales solo 6 se encuentran en alta montaña o cercanas a alguna de las 16 cuencas estudiadas. En el caso de mediciones de viento se tienen aproximadamente 25 estaciones (*fuentes: mapoteca digital DGA*). En términos de cobertura por latitud, si consideramos una extensión aproximada de 1200 Kilómetros entre Copiapó y Ñuble se observa una densidad de 3.75 observaciones de temperatura del aire, 6.25

observaciones de precipitación líquida, 0.75 observaciones nivométricas, 0.75 observaciones relacionadas con radiación solar y 2.1 observaciones de parámetros de viento por cada 100 Kilómetros de latitud. Si hacemos el mismo ejercicio por elevación observaremos que existen aproximadamente 45 estaciones entre 500 y 1000 m.s.n.m., 40 estaciones entre 1000 y 2000 m.s.n.m., 11 estaciones entre 2000 y 3000 m.s.n.m. y solo 7 estaciones sobre los 3000 m.s.n.m.

El primer problema reflejado en el análisis anterior reafirma el hecho de que no existe una densidad significativa de estaciones en alta montaña lo que provoca dificultades al caracterizar las condiciones climáticas en la transecta este - oeste. Esto repercute en (1) la dificultad de calibrar o forzar modelos de pronóstico de caudales de deshielo y (2) la dificultad de validar y calibrar la modelación distribuida del equivalente en agua de nieve. El segundo problema subyace en la diferencia de densidad de estaciones por latitud entre la red nivométrica (cordillera) y la red de valle. En la **Tabla 5.4** se resumen el listado de instrumentos actualmente operativos en cada una de las estaciones de la red nival actual.

Mejoras de la red nivométrica actual respecto al tipo de estación nivométrica sugerida.

Tras revisar las debilidades de la red nivométrica actual y el área porcentual arrojada por los criterios utilizados se sugiere incrementar el número de estaciones básicas respecto a la latitud y elevación, fortaleciendo principalmente las zonas entre las cuencas Choapa en Cuncumén - Mapocho en Los Almendros y Cachapoal en Puente Termas - Teno después de junta río Claro, zonas especialmente caracterizadas por la baja densidad de estaciones. Esta densificación de la red puede ser mediante nuevas estaciones bajo los estándares de instalación presentados en la **Tabla 5.3a** y **Tabla 5.3c**. Respecto a la red nivométrica propiamente tal se sugiere la actualización paulatina al estándar avanzado de las estaciones Cerro Vega Negra, El Soldado, Portillo, Laguna Negra y Lo Aguirre, estaciones que presentan un alto grado de correlación (in situ) con el volumen de deshielo de sus respectivas cuencas contenedoras.

Mejoras en la instalación - mantención y corrección de errores sistemáticas en la medición del manto nival.

La correcta instalación y puesta en marcha de los sensores es crucial para generar una base de datos nivométricos confiable. En rigor se debe estandarizar la altura de los sensores de viento, temperatura - humedad relativa del aire (2, 5 y 10 metros sobre el terreno, **(WMO, 2006)**) asegurando que estén operativos incluso para años de acumulación nival extrema. Se destaca el esfuerzo realizado por la Dirección General de Aguas en la utilización eficaz del sistema de telemetría de la mayoría de las estaciones evaluadas. Se sugiere extender esta práctica para un número mayor de estaciones pudiendo disponer de la información pública en tiempo real. Respecto a los pluviómetros, se sugieren aquellos que capturen la precipitación total y dispongan de

sistemas de energización capaz de alimentar sistemas de calefacción. Deben estar situado entre 0.5 y 1.5 metros del suelo (**WMO, 2006**).

Respecto a los snow pillows, la experiencia obtenida este año en Portillo con el snow scale instalado indica que es conveniente disponer de este sensor sin reemplazar los antiguos snow pillows a modo de corregir la serie de tiempo histórica del equivalente en agua de nieve con las series de tiempo registradas a futuro. También se sugiere contar con estaciones nivométricas con sensores (1) ultrasónico, (2) pluviómetro de precipitación total y (3) snow scale a modo de poder identificar el total acumulado y las nevadas mediante tres instrumentos distintos. Ambas consideraciones son de suma relevancia a futuro.

Tabla 5.4.- Parámetros medidos por la red nivométrica actual de la DGA (Fuente: Mapoteca Digital DGA, Informe "Pronóstico de Disponibilidad de Agua - Temporada de Riego 2014 - 2015, DGA").

Red Nivométrica Actual DGA	Temperatura del aire	Parámetros de viento	Precipitación	Snow Pillow / Scale / altura de nieve	Radiación solar incidente	Radiación solar neta	Humedad relativa del aire	Presión atmosférica	Temperatura del manto nival	Ruta de Nieve
Portezuelo El Gaucho	X*			X	X		X			
Cerro Olivares				X						X
Quebrada Larga				X						X
Cerro Vega Negra	X	X		X	X		X			X
El Soldado	X	X		X	X		X			X
Portillo	X			X			X			X
Farellones										X
Laguna Negra	X			X			X			X
Termas del Flaco	X			X			X			
Lo Aguirre	X			X	X		X			X
Volcán Chillán										
Alto Mallines	X			X			X			X

(*) Indica existencia de dicha observación / sensor.

Respecto a la representatividad local de las mediciones del equivalente en agua de nieve es claro que la comparación entre las mediciones en la grilla (pixel MODIS) y las mediciones manuales - sensor realizadas en 2012, 2013 y 2014 no son suficientes aunque si es posible determinar con los resultados a la fecha que existe una subestimación del entorno en Laguna Negra (sensor = -30%) y una sobreestimación del entorno en Portillo (sensor = 55%). A su vez, el error relativo derivado de la observación manual al lado del snow pillow podría corresponder al error aleatorio natural al tratar de representar la situación de un pixel de 500 metros mediante una medición puntual ($\pm 15\%$ para los tres sitios estudiados). La continuidad de esta actividad podrá eventualmente generar algún procesamiento simple para escalar las observaciones históricas a modo de llevar los valores estimados a la magnitud observada en el pixel representado mediante el muestreo en grilla. Esta corrección

deberá ser incluida en los modelos de pronóstico del volumen de deshielo que consideren esta variable como predictor.

Respecto a la instalación propiamente tal se sugiere eliminar cualquier tipo de rejas implementando más bien un sistema de cercas cableadas dispuestas en un esquema perimetral de tres o más metros de distancia de cualquier instrumento de la estación nivométrica. Además, se sugiere instalar las estaciones en zonas planas alejadas de cursos de agua - zonas coluviales o de acarreo, sin efecto de sombra, seguras y con garantía de acceso, en donde el transporte eólico de la nieve no sea característico de zonas de exposición o escondimiento (**WMO, 2006**) (esto se puede verificar al calcular el parámetro fisiográfico MUS). Estas disposiciones deberán ser verificadas en terreno con registros fotográficos, visitas a terreno, etc. Paralelamente se sugiere continuar con la medición de las rutas de nieve en torno a los snow pillows debido a que entregan valiosa información histórica respecto al comportamiento interanual del manto nival, pudiendo complementar el muestreo en grilla con la lectura en ruta de nieve y el muestreo manual - sensor sobre el snow pillow.

Respecto a la frecuencia de muestreo en cada estación nivométrica se sugiere una programación de los dataloggers con un intervalo de registro de 15 minutos (velocidad y dirección del viento, piranómetro, radiómetro neto, temperatura - humedad relativa del aire, barómetro), transfiriendo dicha información vía telemetría. En el caso del snow scale, sensor ultrasónico, pluviómetro y cadena de termistores solo se requerirá el dato horario. En caso de las rutas de nieve se sugiere mediciones en el periodo de deshielo cada 30 días aproximadamente para validar el agotamiento observado en los sensores afines de las estaciones nivométricas.

Propuesta para la extensión de la cobertura de la red nivométrica actual.

En función de los resultados presentados en la **Figura 5.4** y **Figura 5.5** se sugerirán distintas zonas por cuenca estudiada para la expansión de la red nivométrica actual (**Tabla 5.5**). En dicha tabla se explicita el criterio de selección, mostrando a modo de ejemplo hasta tres opciones por cuenca. No se dará más detalle en la definición de las ubicaciones debido a que el fundamento de esta selección es (1) un criterio técnico aplicable y no un juicio de experto (2) un criterio científico que no contempla temas como accesibilidad, seguridad, cercanía respecto a principales ciudades, costos, criterios estratégicos, optimización respecto al número de estaciones y/o requerimientos de telemetría, etc. y (3) una definición de resolución en escala de metros requiere de una visita a terreno para constatar la condición topográfica de la zona. En la **Tabla 5.5**, el criterio utilizado se entiende de la siguiente manera. Primero se selecciona un SWE umbral mínimo (100 [mm] para las cuencas del cluster 1, 250 [mm] para las cuencas del cluster 2 y 400 [mm] para las cuencas del cluster 3 y 4 - valores impuestos). En el caso de Grande en Las Ramadas y Cachapoal en Puente Termas se decide optar por un umbral de elevación un tanto mayor al indicado en la **Figura 5.5** según el criterio seleccionado por cluster. Luego, se verifica la existencia de zonas con un valor de R_{SWE-VD}^2 alto, localizadas en torno a la cota mínima designada

en función del SWE umbral mínimo. De existir, dichas zonas, pueden ser definidas como posibles ubicaciones para expandir la cobertura de la red nivométrica actual, asegurando (1) una alta predictibilidad del volumen total de deshielo y (2) la existencia de cobertura nival incluso en años secos para el periodo de máxima acumulación nival.

Tabla 5.5- Expansión de la cobertura espacial de la red nivométrica actual.

Expansión Red Nivométrica DGA	Latitud (zona)	Longitud (zona)	Criterio			SWE mínimo [mm]
			$a < R_{SWE-VD}^2 < b$	Cota mínima [m.s.n.m.]	Área [%] definida	
Copiapó en Pastillo	-28.25° -28.50° -28.85°	-69.65° -70.00° -69.70°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	3750	0.1	100
Huasco en Algodones	-28.90° -29.10° -29.45°	-70.10° -70.35° -70.00°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	3500	5.0	100
Elqui en Algarrobal	-29.85° -30.10° -29.70°	-70.05° -70.30° -70.40°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	3250	14.2	100
Grande en Las Ramadas	-31.05°	-70.42°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	3250	26.3	250
Choapa en Cuncumén	-32.20° -32.00°	-70.40° -70.40°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	3000	27.0	250
Putando en Resg. Patos	-32.35° -32.55°	-70.40° -70.45°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	3000	5.3	250
Aconcagua en Chacabuquito	-32.92° -33.08° -32.60°	-70.02° -70.25° -70.35°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	2750	5.5	250
Mapocho en Los Almendros	-33.15°	-70.30°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	2500	6.6	250
Colorado antes de junta Maipo	-33.40°	-70.20°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	2750	1.9	250
Maipo en El Manzano	-33.82° -34.00°	-70.35° -70.00°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	2500	6.0	250
Cachapoal en Puente Termas	-34.15° -34.25°	-70.35° -70.13°	$0.8 < R_{SWE-VD}^2 < 1$	2250	5.9	400
Claro en Hac. Las Nieves	-34.55°	-70.53°	$0.65 < R_{SWE-VD}^2 < 0.8$	2000	6.3	400
Tinguiririca bajo Los Briones	-34.60°	-70.62°	$0.65 < R_{SWE-VD}^2 < 0.8$	2000	4.5	400
Teno después de junta Claro	-35.00°	-70.55°	$0.65 < R_{SWE-VD}^2 < 0.8$	2000	7.2	400
Maule en Armerillo	-36.00° -36.15°	-70.50° -70.70°	$0.65 < R_{SWE-VD}^2 < 0.8$	2000	14.4	400
Ñuble en San Fabián	-36.65° -36.95°	-71.15° -71.20°	$0.65 < R_{SWE-VD}^2 < 0.8$	1500	5.2	400

Tras definir (a modo de ejemplo) distintas zonas para la extensión de cobertura de la red nivométrica es posible concluir que desde Claro en Hacienda Las Nieves al sur la posibilidad de disponer de zonas cuya capacidad predictiva del volumen total de deshielo sea superior a $R_{SWE-VD}^2 = 0.8$ es escasa. No obstante lo anterior, en el peor de los casos esta métrica nunca es inferior a $R_{SWE-VD}^2 = 0.65$. En el listado de zonas anteriormente explicitado no se incluyen aquellas que pudieran contener exacta o

cercanamente a las estaciones de la red nival actual dado que no se sugiere en ningún caso suspender dichas mediciones. Lo correcto en el caso de las estaciones con peor desempeño predictivo, elaborar alguna metodología de corrección (ver **Tabla 5.2**).

Según algunos informes vinculados a la Organización Meteorológica Mundial (WMO), el requerimiento estándar para una cobertura muestral significativa y suficiente de la variable precipitación total establece un mínimo de una estación climatológica de superficie por cada 250 - 150 Kilómetros (**WMO-N° 544, 2013**). Según esto, si establecemos 100 Kilómetros como un estándar factible y mínimo (sugerido), para la distancia de 1200 Kilómetros que separan las cuencas del río Copiapó y del río Ñuble se requerirán 12 estaciones nivométricas. En la actualidad, la situación según este estándar no se alcanza, evidenciando aproximadamente 175 Kilómetros por estación nivométrica operativa. Esto implica que, asumiendo las sugerencias en mejoras (estaciones básicas y avanzadas) propuestas para las 7 estaciones actualmente operativas, la red nival debiera ser complementada con 5 estaciones más como mínimo en el corto y mediano plazo. Cabe destacar que este análisis solo toma en consideración la red hidrológica y no las estaciones actualmente instaladas por el Departamento de Glaciología de la Dirección General de Aguas dado que estas no cuentan con snow scales.

Por esta razón se sugiere en una primera fase de mejoramiento de la cobertura de la red nival, iniciar esfuerzos para la extensión de la cobertura nivométrica priorizando aquellas cuencas sin la presencia de estaciones, incluyendo estaciones básicas en estas cuencas. En una segunda fase se sugiere complementar las estaciones existentes en la actualidad con nuevas tecnologías y/o variables a medir, elevando estas estaciones al estándar avanzado de manera de mejorar la calidad de medición y poder, mediante el trabajo en grillas, corregir los errores de representatividad local. En una tercera fase se sugiere incorporar paulatinamente la nueva información en nuevas metodologías de pronóstico del volumen de deshielo, ya sea para la caracterización de una agrupación dinámica de las cuencas a pronosticar o mediante la generación de series sintéticas históricas en las nuevas ubicaciones monitoreadas de manera de contribuir a la construcción de un mejor conjunto de predictores del volumen total de deshielo. Una densificación de la red nivométrica sería, en el corto y mediano plazo, un avance positivo y considerable con repercusiones claras en la metodología y calidad de los pronósticos del volumen total de deshielo.

6. CONCLUSIONES.

La conclusión del trabajo realizado entre 2012 y 2014 enfocado en el análisis de la red nival necesaria para cuantificar los recursos hídricos provenientes de los Andes de Chile central ha mostrado resultados importantes tanto en la generación de conocimiento como en la generación de herramientas operacionales para la ayuda en la toma de decisiones respecto al pronóstico de caudales de deshielo y en el mejoramiento de la red nivométrica nacional.

Como resultado de este trabajo se ha generado una metodología para el pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo entre los meses de Septiembre y Marzo para 16 cuencas de cabecera basada en la predicción sintética del volumen total de deshielo agrupado geográficamente en clusters e inicializada con predictores de generación simple. La metodología fue evaluada con datos históricos y destaca por tener una calidad estadística histórica similar al pronóstico realizado por la Dirección General de Aguas, sin adición de juicio experto. Paralelamente, la metodología presentada en este estudio complementa el pronóstico tradicional con un enfoque basado en la cuantificación de la incertidumbre mediante bandas. Es por esto que la metodología de pronóstico presentada surge como una herramienta de apoyo factible de utilizar en un formato operacional, sirviendo como apoyo a la metodología utilizada actualmente por la Dirección General de Aguas.

Asimismo, se implementó una metodología para la modelación espacio - temporal del equivalente en agua de nieve a escala diaria durante el periodo de derretimiento entre Copiapó y Ñuble. Este modelo fue debidamente validado con la información distribuida de altura de nieve y densidad nival observada en terreno (años 2012, 2013 y 2014) en siete cuencas de la zona central de Chile. Esta metodología, válida en cualquier dominio espacial, fue aplicada a las 16 cuencas pronosticadas en 2014 - 2015 por la Dirección General de Aguas, y se utilizó como insumo para vincular la capacidad predictiva del equivalente en agua modelado respecto del volumen total de escorrentía de deshielo, contemplando criterios de persistencia mínima de cobertura nival por elevación y nivel de correlación entre la evolución del equivalente en agua modelado y el caudal. Esta herramienta es propuesta como una solución de apoyo concreta para la definición de zonas para la expansión de la red nivométrica de la DGA. Se proponen además, sitios alternativos para dicha expansión para cada una de las 16 cuencas analizadas, respectivamente.

Los resultados presentados en este informe están sujetos a incertidumbre y se verían beneficiados con actividades futuras. Algunos de los aspectos más importantes en este sentido incluyen:

- Calidad y cantidad de la información satelital utilizada. El producto satelital de cobertura fraccionaria de nieve MODIS está disponible sólo desde el año 2001. Los 12 años de información utilizada implican, por lo tanto, una muestra relativamente pequeña de la variabilidad interanual de las condiciones nivales

en la cordillera, aun cuando en el período se han registrado años húmedos, normales y secos. El reducido número de años impacta negativamente en la robustez de algunas relaciones estadísticas encontradas. Por otro lado, la resolución espacial del producto MODIS (500 m) es adecuada pero insuficiente si se quieren distinguir patrones más finos de distribución espacial en el manto nival. Trabajos futuros en este ámbito podrían incluir la evaluación de la combinación de MODIS y otros productos disponibles (tales como LANDSAT), para mejorar la resolución espacial de la estimación del equivalente en agua de nieve distribuido.

- Cantidad y cobertura de campañas de validación en terreno. El estudio que se reporta en este informe incluyó un importante esfuerzo de recolección de datos en terreno, sobre todo de profundidad de nieve y densidad nival. No obstante, la cobertura espacial de los datos obtenidos es mínima respecto de la zona de análisis (escala regional), y la representatividad temporal de los datos está limitada dado que el estudio se desarrolló durante uno de los períodos más secos del que se tenga registro en Chile central. Trabajos futuros deberían propender a continuar el esfuerzo de recolección de datos de validación, procurando incorporar metodologías de medición remota basadas en altimetría terrestre o aerotransportada. Dentro de las tecnologías más promisorias en este respecto se cuenta la altimetría Laser (LiDAR), ya sea terrestre o aérea.

El trabajo realizado junto con los desafíos futuros deben ser entendidos dentro de un proceso de constante evaluación del estado de la red nivométrica e hidrométrica en general. Esta evaluación debe propender a la generación de conocimiento científico respecto a la modelación del manto nival y pronóstico del caudal medio mensual de deshielo, así como a la generación de productos operacionales que posibiliten un marco base cada vez más amplio para la generación de desarrollo científico respecto a la caracterización del proceso de precipitación - escorrentía en los Andes de Chile central.

7. BIBLIOGRAFÍA.

1.- Brubaker, K. et al., (1996): *Incorporating radiation inputs into the snowmelt runoff model*. Hydrological Processes, Vol. 10, 1329 - 1343 (1996).

2.- Cline, D., Bales, R., Dozier, J. (1998): *Estimating the spatial distribution of snow in mountain basins using remote sensing and energy balance modeling*. Water Resources Research, Vol. 34, No. 5, 1275 - 1285.

3.- Cornwell, E. (2012): *Reconstrucción del equivalente en agua de nieve mediante imágenes MODIS incorporadas a un balance de masa - energía*. Memoria para optar al título de ingeniero civil. FCFM, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Memoria para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería mención recursos y medio ambiente hídrico. FCFM, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

4.- Cornwell, E. y McPhee, J. (2014a): *Identificación de patrones de acumulación nival a escala de ladera en los andes de Chile central*. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, Agosto 2014.

5.- Cornwell, E. y McPhee, J. (2014b): *¿Qué tan característica es una estación nivométrica? Las áreas representativas como herramienta de decisión*. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile, Agosto 2014.

6.- Cornwell, E. y McPhee, J. (2013): *Capacidad predictiva y representatividad espacial del equivalente en agua de nieve mediante modelación inicializada con información remota MODIS*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XXI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Concepción, Chile, Octubre 2013.

7.- DeWalle, D., y Rango, A. (2008): *Principles of Snow Hydrology*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN-13 978-0-521-82362-3.

8.- DGA - RHMA, (2008): *Investigación de nieves y escorrentía de deshielo en la cuenca alta del río Aconcagua. Aplicación de modelos de simulación nival y de pronóstico de volúmenes de deshielo*. Dirección General de Aguas (MOP) - Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. S.I.T. N° 165.

9.- DGA - RHMA, (2011): *Investigación de los aportes nivoglaciares en algunas cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel; y estimación de los efectos del cambio climático*. Dirección General de Aguas (MOP) - Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. S.I.T. N° 266.

10.- DGA - RHMA, (2012): *Análisis de la red nival necesaria para cuantificar los recursos hídricos, Etapa 1*. Dirección General de Aguas (MOP) - Universidad de Chile,

Departamento de Ingeniería Civil, División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente.
S.I.T. N° 309.

11.- DGA (2014): *Pronóstico de Disponibilidad de Agua - Temporada de Riego 2014 - 2015*. Dirección General de Aguas (MOP).

12.- Gafurov, A. y Bárdossy, A. (2009): *Cloud removal methodology from MODIS snow cover product*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 13611373, 2009.

13.- Granger, R. J. y Male, D. H., (1978): *Melting of a prairie snowpack*. American Meteorological Society, 0021-8952/78/ 1833-1842.

14.- Hall, D., K., et al., (2006): *Updated daily. MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid V005*. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital Media.

15.- Hofierka, J. y Suri, M. (2002): *The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications*. Proceedings of the Open source GIS - GRASS user's conference 2002 - Trento, Italy, 11 - 13 September 2002.

16.- Linacre, E. (1992): *Climate data and resources*. London: Routledge.

17 - Lopez - Burgos et al., (2012): *A probability of snow approach to removing cloud cover from MODIS Snow Cover Area products*. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 9, 13693–13728, 2012.

18.- Marks, D., Dozier, J. y Davis, R. (1992): *Climate and energy exchange at the snow surface in the alpine region of the Sierra Nevada, 2. snow cover energy balance*. Water Resour. Res., 28(11), 3043–54.

19.- Mendoza, P. et al., (2014): *A robust multimodel framework for ensemble seasonal hydroclimatic forecast*. Water Resour. Res. 50, 6030-6052 doi: 10.1002/2014WR015426.

20.- Molotch, N., Painter, T., Bales, R., Dozier, J. (2004): *Incorporating remotely-sensed snow albedo into a spatially-distributed snowmelt model*. Geophysical Research Letters, Vol. 31, L03501, doi: 10.1029/2003GL019063, 2004.

21.- Molotch, N. y Bales, R., (2005): *Scaling snow observations from the point to the grid element: implications for observation network design*. Water Resources Research, Vol. 41, W11421, 2005.

22.- Molotch, N. y Bales, R., (2006a): *Comparison of ground-based and airborne snow surface albedo parameterizations in an alpine watershed: Impact on snowpack mass balance*. Water Resources Research, Vol. 42, No. 5, 1275 - 1285.W05410.

- 23.- Molotch, N. y Bales, R., (2006b):** *SNOTEL representativeness in the Rio Grande headwaters on the basis of physiographic and remotely sensed cover persistence*. Hydrological Processes, Vol. 20, 723 - 739.
- 24.- Moradkhani, H. y Meier, M. (2010):** *Long-Lead Water Supply Forecast Using Large-Scale Climate Predictors and Independent Component Analysis*. J. Hydrol. Eng., 15(10), 744–762.
- 25.- Neteler, M. (2010):** *Estimating daily land surface temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data*. Remote Sensing 2010, 2, 333 - 351.
- 26.- Ohmura, A. (2000):** *Physical basis for the temperature - based melt - index method*. American Meteorological Society, 2001.
- 27.- O'Neill, A. y Gray, D., (1996):** *Spatial and temporal variations of the albedo of prairie snowpack*. Journal of Hydrology, Vol. 184, 3-4, 277-298.
- 28.- Páez, F. y Vargas, X. (2012):** *Obtención de la temperatura del aire a través de imágenes satelitales MODIS y análisis de su variabilidad*. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica, 9 al 12 de Setiembre de 2012.
- 29.- Peña, H. y Nazarala, B. (1987):** *Snowmelt-runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects*. IAHS-AISH publication, ISSN 0144-7815.
- 30.- Pontailier, J. Y. et al., (2003):** *Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques*. Can. J. Remote Sensing, Vol. 29, No. 3, pp. 381–387, 2003.
- 31.- Rees, W., G. (2005):** *Remote Sensing of Snow and Ice*. CRC Press, Taylor & Francis Group: New York. 2006. xix, ISBN 0-415-29831-8.
- 32.- Richards, J., Jia, X. (2008):** *Remote sensing digital. Image analysis, an introduction, 4th edition*. Springer, ISBN-10 3-540-25128-6 Springer Berlin Heidelberg New York.
- 33.- Rubio - Alvarez, E. y McPhee, J. (2010):** *Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003*. Water Resources Research, VOL. 46, W05514, doi: 10.1029/2009WR007982, 2010.
- 34.- Stowhas, L. (1968):** *Estudio de los procesos de deshielo en un laboratorio de hidrología de nieves*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. FCFM, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

35.- Winstral, A., Marks, D. (2002): *Simulating wind fields and snow redistribution using terrain-based parameters to model snow accumulation and melt over a semi-arid mountain catchment.* 59th Eastern Snow Conference Stowe, Vermont USA 2002.

36.- WMO (2006): *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation WMO-No 6.* Chairperson, Publications Board, ISBN 978-92-63-10008-5.

37.- WMO-N° 544 (2013): *Manual on the Global Observing System: Volume I - Global aspects.* WMO ; 2013 (2010 edition updated in 2013).

8. ANEXOS.

8.1. Información de entrada para la construcción del pronóstico de caudales de deshielo (2014 - 2015). Resumen operacional y actualización al 30 de Noviembre.

Tabla A1.1.- Volumen total de deshielo (VD) calculado (rellenado) para las 16 cuencas a pronosticar más las 2 cuencas auxiliares (cluster4).

Volúmenes totales de deshielo (Septiembre - Marzo) (VD) considerados para elaborar el pronóstico.																		
AÑO	Copiapó	Huasco	Elqui	Grande	Choapa	Putendo	Aconcagua	Mapocho	Colorado	Maipo	Cachapoal	Claro	Tinguiririca	Teno	Maule	Ñuble	Longaví	Diguillín
1990	24	29	84	26	88	50	408	110	629	1927	1442	94	887	817	3239	1158	359	171
1991	19	111	204	136	344	252	1046	221	967	3421	2305	234	1149	1079	5135	1585	483	179
1992	57	224	369	140	297	222	878	171	871	3186	2397	181	1566	1541	6443	2034	491	208
1993	20	63	133	59	170	129	627	101	802	2576	1996	187	1403	1089	4775	1658	365	165
1994	20	51	127	44	116	94	617	94	759	2667	2118	156	1224	1075	4614	1655	427	196
1995	15	33	82	16	66	57	484	69	651	2297	2044	168	1565	1302	5873	2011	497	222
1996	19	18	57	18	37	20	238	28	395	1094	1091	74	760	524	2243	766	192	94
1997	186	869	1156	343	653	533	1394	263	1011	4045	3435	297	1725	2145	7600	2287	717	269
1998	63	124	160	26	60	43	368	35	506	1425	1158	55	633	460	1436	909	154	65
1999	30	61	133	43	151	131	642	98	603	1941	1652	158	991	1307	5054	1797	584	221
2000	41	112	139	113	298	280	1130	187	911	3722	2660	252	1589	1707	6583	2097	566	286
2001	30	80	143	94	304	214	922	149	919	3160	2788	216	1363	1411	5060	1597	426	173
2002	114	375	703	258	544	384	1473	290	1169	4372	3947	277	2036	2131	8090	2602	594	321
2003	46	93	210	62	194	132	670	76	715	2324	1915	131	1044	843	3305	1214	294	150
2004	20	41	88	39	107	76	492	86	539	1826	1633	112	939	1019	3679	1470	456	190
2005	45	110	288	146	460	405	1587	235	1143	4862	3845	189	1481	1697	6670	1943	446	154
2006	12	35	166	57	281	299	1076	128	738	2963	2388	187	1361	1396	5882	1954	570	245
2007	48	98	204	58	159	147	649	77	557	1843	1484	97	852	842	3168	1101	340	167
2008	15	56	242	103	291	296	1076	165	845	3119	2013	172	1394	1215	4533	1231	274	133
2009	14	18	89	43	190	148	743	151	529	2517	2024	150	1083	1109	5479	1733	478	212
2010	17	20	49	24	68	47	276	66	432	1511	1455	82	657	563	3434	1273	345	181
2011	18	27	49	34	108	85	412	66	560	1401	1436	95	730	705	4749	1927	539	246
2012	15	18	58	18	59	46	423	61	493	1821	1683	172	921	825	3047	871	298	148
ESTADÍSTICOS ENTRE AÑOS 1990 - 2012																		
Promedio	39	116	214	83	219	178	767	127	728	2610	2126	162	1189	1165	4786	1603	430	191
Desviación Estándar	40	183	249	81	164	137	387	73	222	1010	782	65	374	464	1686	479	137	59
	CLUSTER 1				CLUSTER 2				CLUSTER 3				CLUSTER 4					

Tabla A1.2a.- Componente principal calculada (histórica) y modelada (pronóstico).

	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4	CLUSTER 1	CLUSTER 2	CLUSTER 3	CLUSTER 4
Año	Componente principal de VD histórica <i>(PC1_{VD,cluster,t})</i>				Componente principal de VD pronosticada <i>(PC1_{VD,cluster,t}*)</i>			
1990	-1.036	-1.853	-1.762	-1.032	-1.163	-2.592	-2.603	-1.446
1991	0.035	2.049	0.496	0.083	0.068	1.472	-0.040	0.152
1992	1.215	1.226	1.546	0.939	0.721	0.721	1.600	1.330
1993	-0.695	-0.474	0.385	-0.466	-0.653	-0.658	0.687	0.411
1994	-0.831	-0.720	-0.152	0.096	-0.700	-0.338	0.078	1.107
1995	-1.209	-1.556	1.016	1.074	-1.228	-1.731	0.437	1.333
1996	-1.236	-3.524	-2.699	-2.962	-1.170	-2.935	-1.713	-1.944
1997	7.365	4.950	3.642	2.796	7.529	5.075	3.765	2.632
1998	-0.099	-2.898	-3.321	-3.236	-0.080	-2.724	-3.255	-2.892
1999	-0.664	-1.253	-0.064	1.176	-0.871	-1.377	-0.136	0.414
2000	0.058	2.117	2.338	2.095	0.125	2.143	0.781	0.758
2001	-0.283	1.409	0.988	-0.203	-0.475	1.535	1.511	0.467
2002	3.787	5.142	4.036	3.161	3.566	5.483	4.019	1.894
2003	-0.091	-0.777	-1.224	-1.446	-0.038	-1.243	-1.874	-0.901
2004	-0.969	-1.876	-1.204	-0.061	-0.762	-1.716	-1.053	-0.838
2005	0.610	4.927	1.731	0.111	-0.104	4.726	1.509	1.254
2006	-0.824	1.063	0.992	1.539	-0.538	0.793	1.011	-0.263
2007	-0.087	-1.487	-1.779	-1.220	-0.536	-0.853	-1.062	-2.083
2008	-0.292	1.327	0.326	-1.676	0.366	1.761	1.412	0.133
2009	-1.086	-0.469	-0.094	0.562	-0.802	-0.828	-0.460	1.056
2010	-1.237	-2.749	-2.382	-0.856	-1.278	-2.358	-1.460	-1.043
2011	-1.144	-2.253	-1.641	1.386	-0.985	-2.348	-0.732	1.480
2012	-1.287	-2.323	-1.174	-1.859	-1.105	-1.989	-1.566	-1.532
2013	***	***	***	***	-1.186	-2.106	-1.144	-0.669
2014	***	***	***	***	-1.408	-2.457	-1.502	3.233

Tabla A1.2b.- Predictores primarios históricos y para 2013, 2014.

Año	CLUSTER 1			CLUSTER 2			CLUSTER 3			CLUSTER 4			COMÚN
	IPP_{48}	Q_8	SWE_{PDA}	SOI_{38}									
1990	53	2.5	51	161	15.3	122	432	51.1	63	921	48.7	85	0.98
1991	192	3.8	312	449	27.0	778	968	76.2	721	1707	37.7	242	1.11
1992	196	6.2	333	472	23.7	617	1393	63.7	1284	1756	36.4	998	1.22
1993	74	4.7	48	351	25.6	463	1115	85.7	934	1858	97.4	785	1.52
1994	55	3.5	152	251	24.2	564	943	71.3	995	1411	45.9	780	2.25
1995	16	2.5	0	232	18.6	388	1006	78.6	1208	1551	58.5	1184	1.00
1996	62	2.1	118	172	12.6	82	600	56.5	342	841	40.8	102	0.60
1997	423	11.0	950	657	35.1	955	1390	161.2	764	1409	109.7	602	2.59
1998	42	7.4	60	90	13.9	30	252	29.7	23	610	22.2	194	1.00
1999	36	3.4	185	235	14.1	553	742	43.0	1090	1250	70.9	800	0.73
2000	179	4.1	339	448	25.2	910	1113	81.8	1200	1576	71.0	950	0.86
2001	92	3.8	261	397	35.9	888	1332	146.2	1550	2244	117.3	1448	1.00
2002	306	8.9	698	659	53.4	1023	1545	254.2	1449	1709	160.5	1200	1.11
2003	71	6.8	152	231	21.2	550	596	49.9	300	1038	36.4	511	1.00
2004	94	4.2	49	281	15.1	338	736	65.9	500	1288	50.8	185	1.01
2005	139	3.5	367	546	46.3	1115	1432	188.4	1739	1771	146.4	1201	1.00
2006	46	4.7	175	378	30.3	780	1139	116.0	1104	1685	92.8	650	1.00
2007	60	3.6	333	231	16.5	678	428	38.5	871	667	29.1	503	1.00
2008	154	4.8	427	501	30.2	767	1185	134.2	1075	1273	113.3	544	0.76
2009	73	3.2	180	282	21.4	580	794	94.7	1070	1352	89.7	850	0.99
2010	87	2.0	41	201	16.2	324	545	49.9	600	741	45.3	730	0.48
2011	99	2.3	186	191	12.0	391	709	86.3	986	984	90.5	1020	0.30
2012	40	2.6	98	250	11.9	288	658	58.5	330	826	36.0	376	1.00
2013	73	1.8	150	209	15.7	373	577	52.4	750	758	53.8	640	0.62
2014	55	1.6	15	203	14.6	160	571	116.6	820	962	140.6	670	1.00

Tabla A1.3.- Valores para la inicialización del pronóstico de caudales medios mensuales de deshielo (años 2014- 2015) por cada cluster.

CLUSTER	IPP_{48} [mm]	Q_8 [m3/s]	SWE_{PDA} [mm]	SOI_{38}	$IPP_{48} \times Q_8$ [mm m3/s]	$IPP_{48} \times SWE_{PDA}$ [mm2]	$IPP_{48} \times SOI_{38}$ [mm]	$Q_8 \times SWE_{PDA}$ [mm m3/s]	$Q_8 \times SOI_{38}$ [m3/s]	$SWE_{PDA} \times SOI_{38}$ [mm]
	Predictores Primarios				Predictores Secundarios					
CLUSTER 1	1.6				834.8			15.0		
CLUSTER 2				1.0	32484.6		203.2			
CLUSTER 3	820.0				66606.9			95616.1		
CLUSTER 4	962.5	140.5			135263.3		94157.3		140.7	

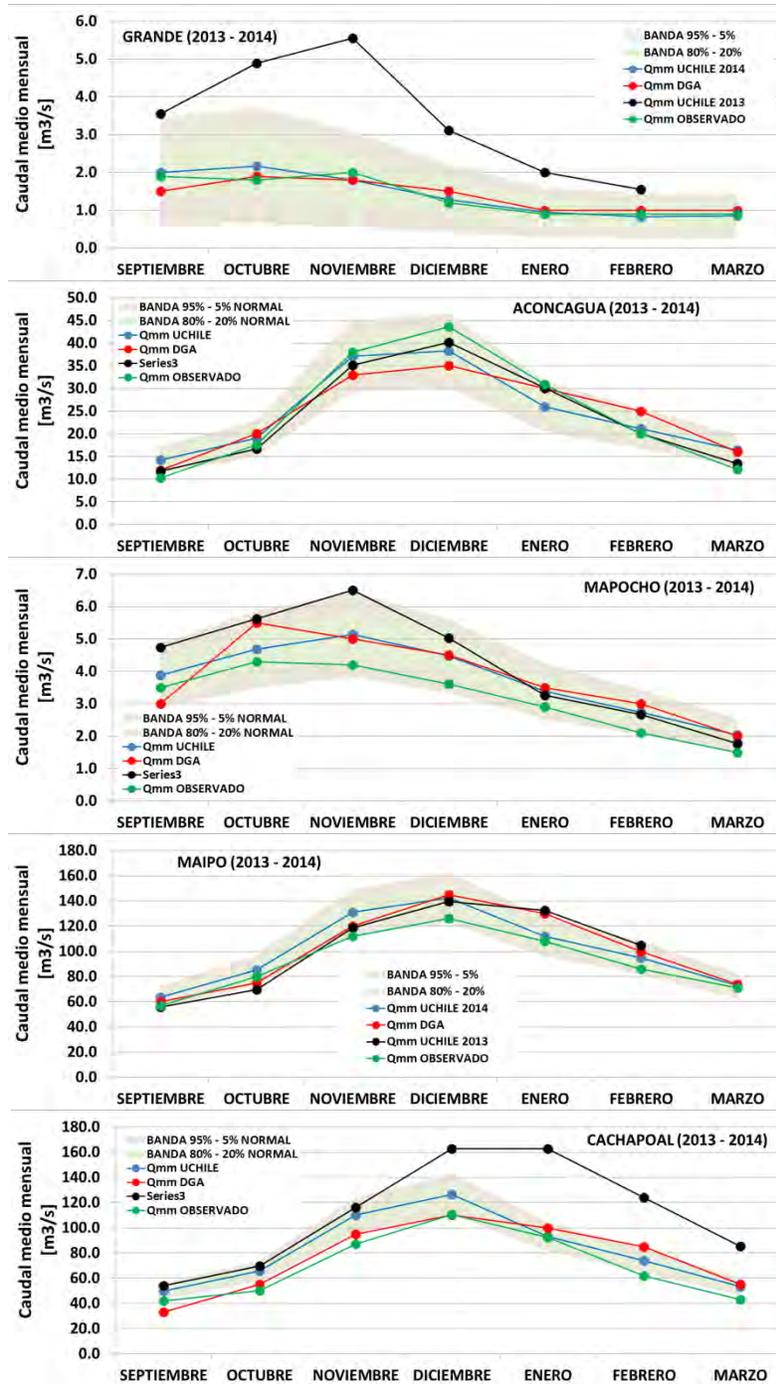


Figura A1.1.- Reelaboración del pronóstico para 2013 y comparación con la metodología anterior.

Tabla A1.4.- Variables utilizadas para construir los predictores de la componente principal del VD (pronóstico 2014 - 2015).

Variable	CLUSTER 1		CLUSTER 2		CLUSTER 3		CLUSTER 4	
PRECIPITACIÓN ACUMULADA ABRIL - AGOSTO [mm]								
Precipitaciones acumuladas para generar el predictor IPP_{48}	Iglesia Colorada	(60.5)	La Mostaza	(151.5)	San Fernando	(390.1)	Las Trancas	(802.0)
	Conay	(37.0)	Riecillos	(174.1)	La Rufina	(548.9)	San Fabián	(1123.0)
	Monte Grande	(32.0)	Vilcuya	(169.5)	Potrero Grande	(459.1)		
	Las Ramadas	(93.1)	Cerro Calán	(200.6)	Vílchez Alto	(886.1)		
			Antupirén	(245.5)				
			San José Retén	(273.3)				
			Rancagua (Cachap.)	(206.7)				
CAUDAL MEDIO MENSUAL DE AGOSTO [m³/s]								
Caudales medios mensuales de agosto para generar el predictor Q_8	Copiapó-Pastillo	(0.7)	Choapa- Cuncumén	(2.4)	Claro-Nieves	(3.8)	Ñuble-San Fabián	(273.8)
	Huasco-Algod.	(1.8)	Putando-Patos	(1.4)	Ting.-Briones	(27.6)	Longaví-Castillo	(105.0)
	Elqui-Algarrobal	(2.8)	Aconc.-Chacab.	(6.0)	Teno-Junta Claro	(61.4)	Diguillín-San Lorenzo	(42.8)
	Grande-Ram.	(0.9)	Mapocho-Almendr.	(1.7)	Maule-Armerillo*	(373.7)		
			Colorado-Maipo	(9.7)				
			Maipo-Manzano	(46.5)				
		Cachap.-Termas*	(34.1)					
SWE MÁXIMO (DGA) [mm]								
Equivalente en agua de nieve máximo entregados por la DGA para la generación del predictor SWE_{PDA}	Quebrada Larga	(15)	Portillo (150)		Lo Aguirre (820)		Volcán Chillán (670)	
			Laguna Negra (170)					
INDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR (SOI) - ADIMENSIONAL								
Valor del SOI mensual para generar el predictor SOI_{38}	Marzo (-0.9)		Marzo (-0.9)		Marzo (-0.9)		Marzo (-0.9)	
	Abril (0.8)		Abril (0.8)		Abril (0.8)		Abril (0.8)	
	Mayo (0.5)		Mayo (0.5)		Mayo (0.5)		Mayo (0.5)	
	Junio (0.2)		Junio (0.2)		Junio (0.2)		Junio (0.2)	
	Julio (-0.2)		Julio (-0.2)		Julio (-0.2)		Julio (-0.2)	
	Agosto (-0.7)		Agosto (-0.7)		Agosto (-0.7)		Agosto (-0.7)	

**RESUMEN OPERACIONAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PRONÓSTICO PROPUESTO
(UNIVERSIDAD DE CHILE – 2014).**

Paso 1: Pronóstico de la componente principal para cada cluster.

CL1: $PC1_{VDcluster1}^* = 0.221(Q_8) + 1.39 \times 10^{-5}(IPP_{48} \times SWE_{PDA}) + 5.20 \times 10^{-4}(SWE_{PDA} \times SOI_{38}) - 1.774$

CL2: $PC1_{VDcluster2}^* = 0.865(SOI_{38}) + 1.31 \times 10^{-5}(IPP_{48} \times SWE_{PDA}) - 0.001(IPP_{48} \times SOI_{38}) - 3.526$

CL3: $PC1_{VDcluster3}^* = 0.004(SWE_{PDA}) + 4.13 \times 10^{-5}(IPP_{48} \times Q_8) - 3.75 \times 10^{-5}(Q_8 \times SWE_{PDA}) - 3.622$

CL4: $PC1_{VDcluster4}^* = 0.005(IPP_{48}) + 0.074(Q_8) - 7.49 \times 10^{-5}(IPP_{48} \times Q_8) + 3.57 \times 10^{-5}(Q_8 \times SWE_{PDA}) + 0.014(Q_8 \times SOI_{38}) - 6.899$

Paso 2: Transformación de la componente principal pronosticada al VD por cuenca.

Cuencas: **Transformación de $PC1_{VDcluster_i}^*$ a VD (volumen de deshielo)**

Copiapó en Pastillo	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.498) \times 40 + 39$
Huasco en Algodones	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.501) \times 183 + 116$
Elqui en Algarrobal	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.509) \times 249 + 214$
Grande en Las Ramadas	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.488) \times 81 + 83$
Choapa en Cuncumén	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.379) \times 164 + 219$
Putauendo en Resguardo Los Patos	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.375) \times 137 + 178$
Aconcagua en Chacabucuito	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.385) \times 387 + 767$
Mapocho en Los Almendros	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.377) \times 73 + 127$
Colorado antes de junta Maipo	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.372) \times 222 + 728$
Maipo en El Manzano	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.383) \times 1010 + 2610$
Cachapoal en Puente Termas	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.376) \times 782 + 2126$
Claro en Hacienda Las Nieves	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.492) \times 65 + 162$
Tinguiririca bajo Los Briones	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.501) \times 374 + 1189$
Teno después de junta Claro	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.510) \times 464 + 1165$
Maule en Armerillo	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.498) \times 1686 + 4786$
Ñuble en San Fabián	$VD^{PC1*} = (PC1_{VDcluster1}^* \times 0.574) \times 479 + 1603$

Paso 3: Actualización del caudal medio mensual de Agosto (factor φ). Cálculo de las varianzas σ_f^2 y σ_{obs}^2 en Tabla 1.3. Este paso se utiliza solo en el tipo de año especificado en la Tabla 1.3, de no aplicar, utilizar $\varphi = 1$.

$$VD^{PC1*}_{escalado} = \varphi VD^{PC1*} \quad \text{donde} \quad \varphi = \frac{\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sigma_{obs}^2} \left(\frac{Q_{agosto\ obs.} - Q_{agosto\ modelado}}{Q_{agosto\ modelado}} \right)$$

Paso 4: Desagregación mensual mediante curva de desagregación mensual (Tabla 1.8).

Paso 5: Construcción de bandas según volumen de deshielo pronosticado final considerando. El valor se aplica como porcentaje al VD y en cada mes pronosticado.

$$VD^{PC1*}_{escalado}(x\%) = VD^{PC1*}_{escalado} + N(x\%, 0, \sigma_{ensamble\ VD}^2)$$

Figura A1.2.- Resumen operacional de la metodología de pronóstico de caudales de deshielo propuesta. Esta guía está implementada en una planilla computacional (ver archivo digital).

Tabla A1.5.- Actualización del pronóstico de caudales de deshielo (2014 - 2015).

Cuencas	Caudal medio [m³/s] Sep.	Caudal medio [m³/s] Oct.	Caudal medio [m³/s] Nov.	Caudal medio [m³/s] Dic.	Caudal medio [m³/s] Ene.	Caudal medio [m³/s] Feb.	Caudal medio [m³/s] Mar.	Volumen Total de Deshielo [MMm³]	Factor de actualización proporcional
	OBSERVADO			UCHILE (2014 - 2015) ACTUALIZACIÓN					
Copiapó	0.9	0.8	0.7	0.6	1.0	0.9	0.9	15.6	1.43
Huasco	1.3	0.8	0.7	0.6	0.6	0.8	0.9	14.8	0.82
Elqui	2.5	2.2	2.3	2.5	2.3	2.2	2.2	42.3	0.78
Grande	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.4	0.4	11.2	0.72
Choapa	2.4	5.7	2.9	2.6	1.8	1.4	1.4	48.0	0.85
Putaendo	1.6	3.2	2.3	2.1	1.2	1.0	0.8	32.2	0.62
Aconcagua	8.2	18.9	21.0	26.1	17.7	14.4	11.1	308.9	0.77
Mapocho	2.5	4.0	2.5	2.9	2.2	1.8	1.3	45.4	0.76
Colorado	9.9	16.2	20.1	28.8	27.0	24.0	17.6	378.2	0.72
Maipo	47.5	84.6	101.9	118.9	93.2	79.1	60.6	1556.3	0.93
Cachapoal	38.3	60.2	88.1	104.9	77.1	61.3	44.1	1250.5	0.89
Claro	6.7	7.0	8.4	8.2	6.9	5.6	4.1	122.5	1.07
Tinguiririca	32.1	44.9	66.2	76.7	59.6	46.3	28.4	926.0	1.02
Teno	53.1	58.6	81.8	52.9	34.0	30.3	20.5	866.4	1.07
Maule	284.9	379.6	349.7	252.6	146.9	125.8	106.6	4301.5	1.22
Ñuble	168.5	167.0	122.0	108.2	57.2	33.0	22.4	1794.5	0.72

8.2. Perfiles de densidad y temperatura nival (2012 - 2014).

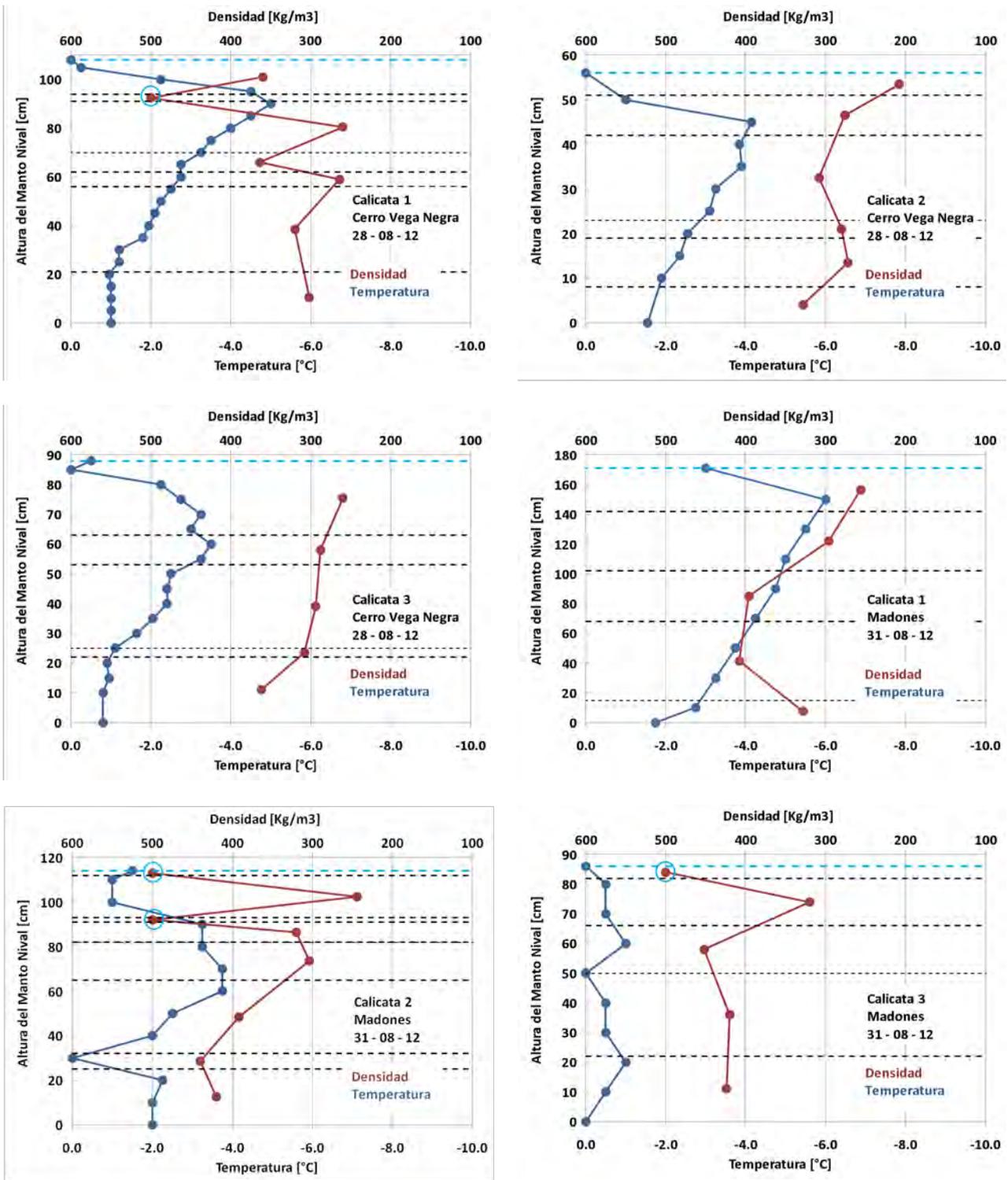


Figura A2.1a.- Perfiles de densidad nival (por estrato) y temperatura nival (graduado) para la cuencas piloto en estudio (cirulos celestes representan estratos de hielo). Año 2012.

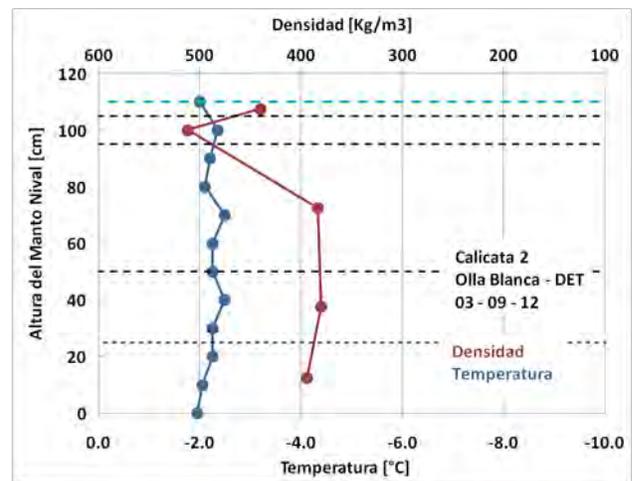
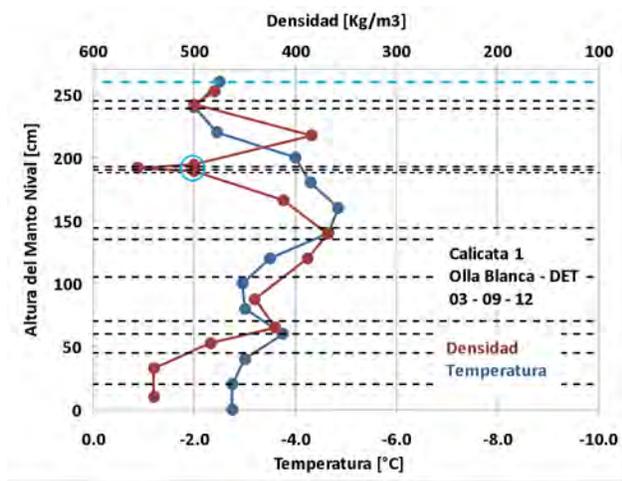
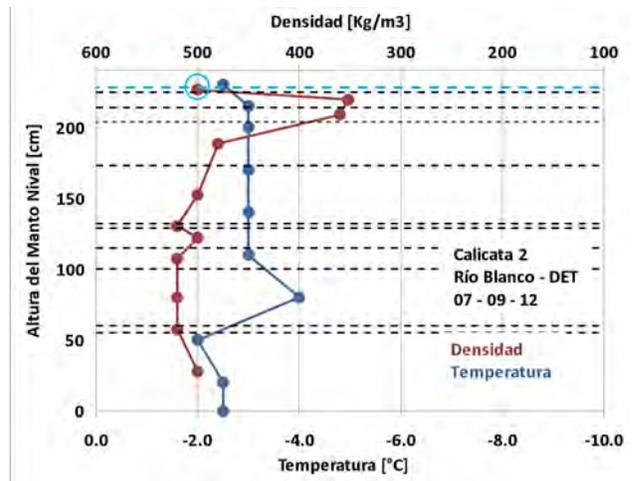
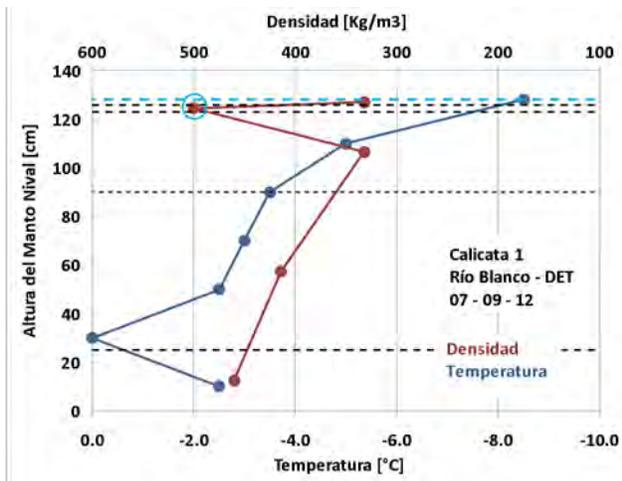
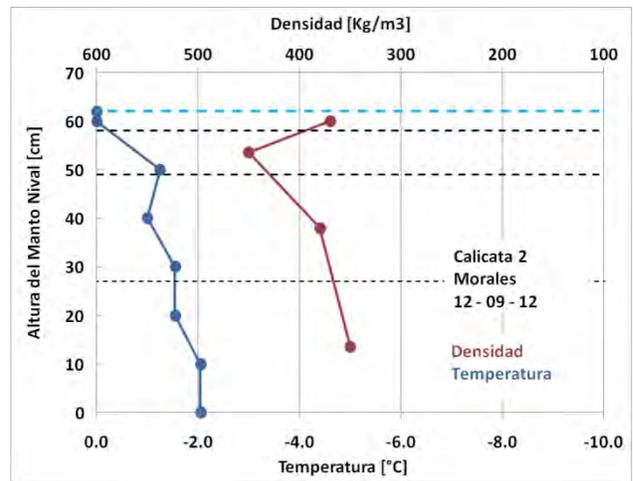
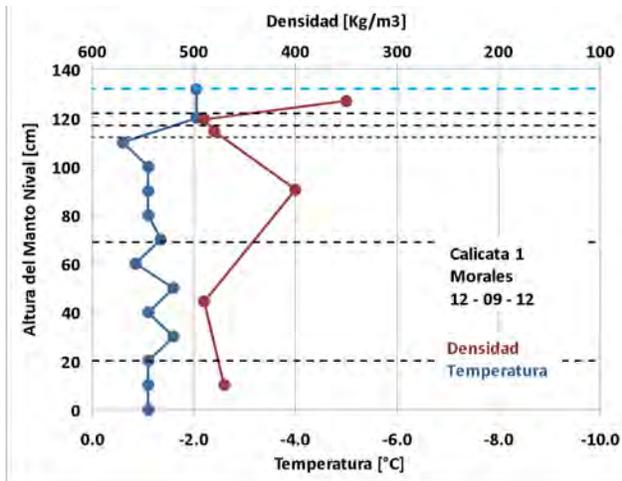


Figura A2.1b.- Perfiles de densidad nival (por estrato) y temperatura nival (graduado) para la cuencas piloto en estudio (cirulos celestes representan estratos de hielo). Año 2012. Continuación.

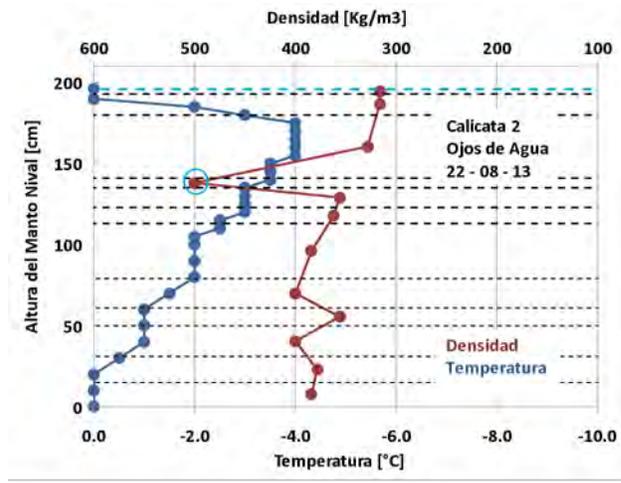
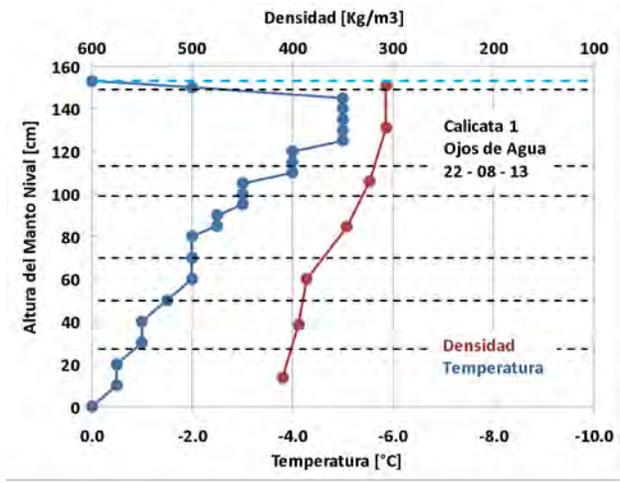
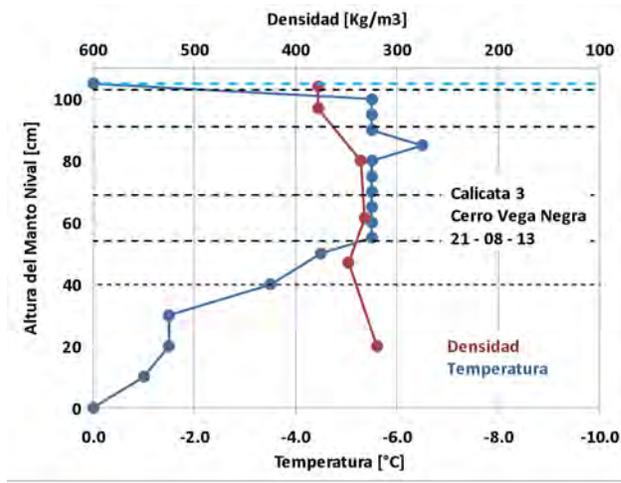
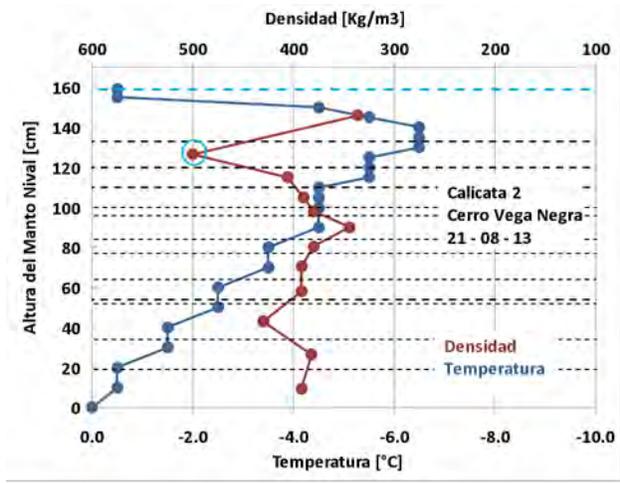
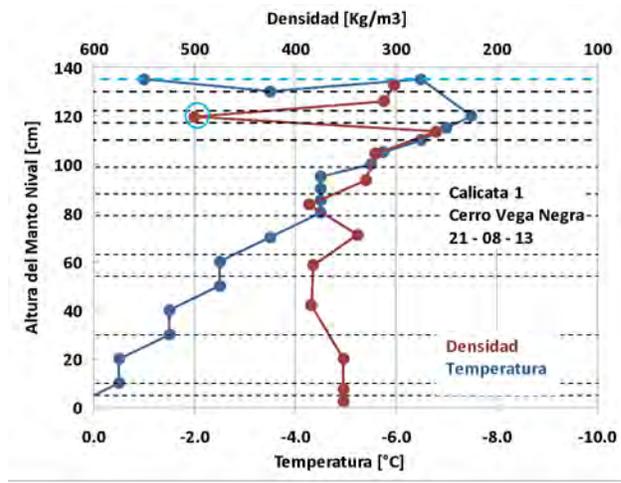
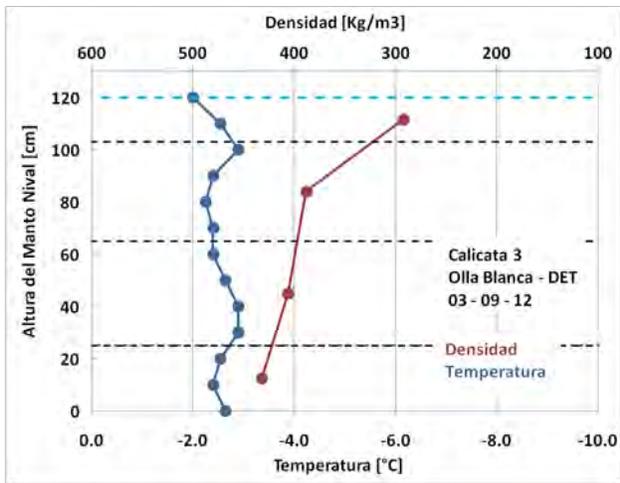


Figura A2.1c.- Perfiles de densidad nival (por estrato) y temperatura nival (graduado) para la cuencas piloto en estudio (cirulos celestes representan estratos de hielo). Año 2012 (a), Año 2013. Continuación.

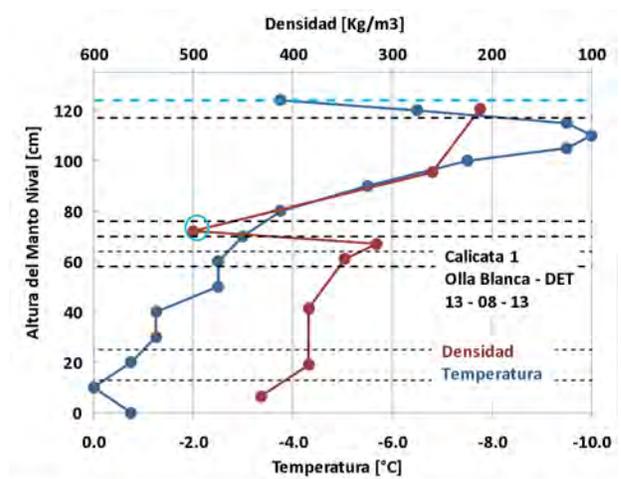
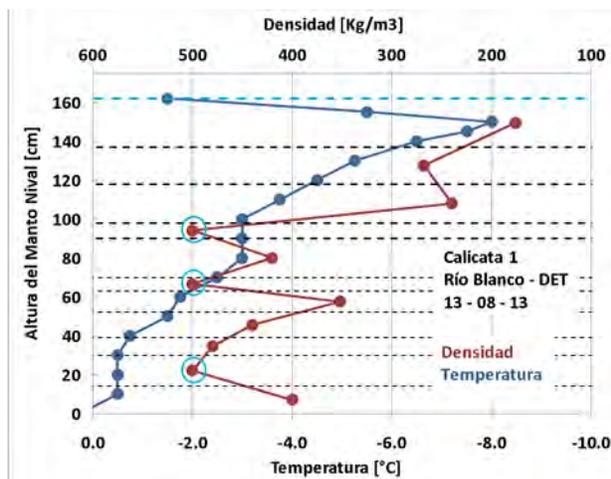
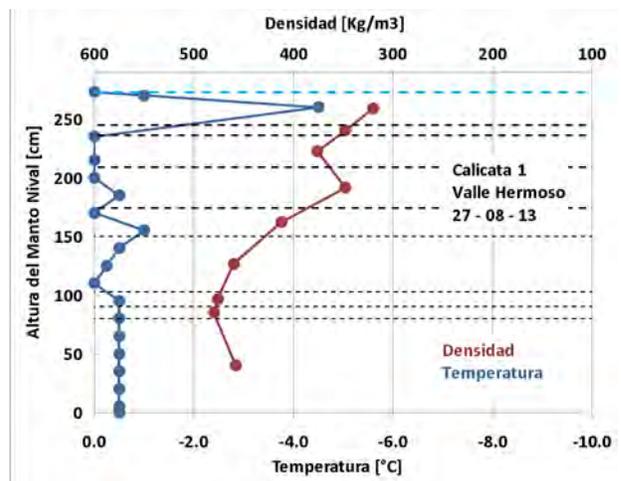
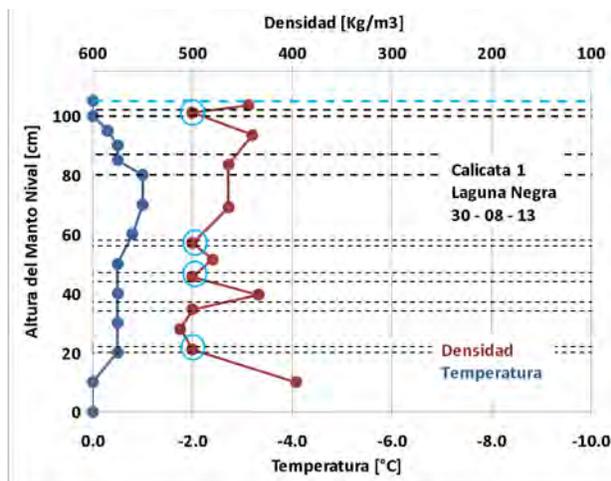
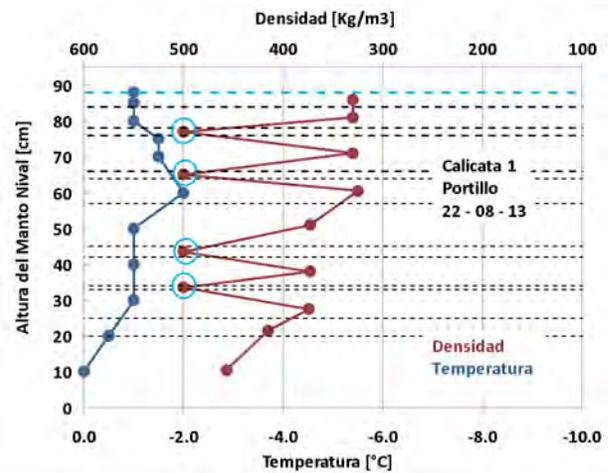
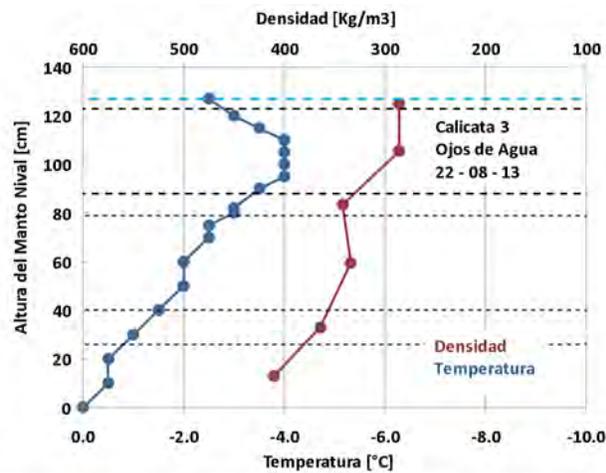


Figura A2.1d.- Perfiles de densidad nival (por estrato) y temperatura nival (graduado) para la cuencas piloto en estudio (círculos celestes representan estratos de hielo). Año 2013. Continuación.

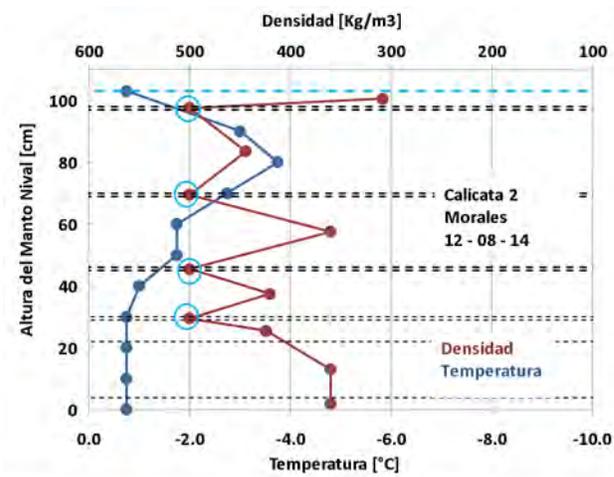
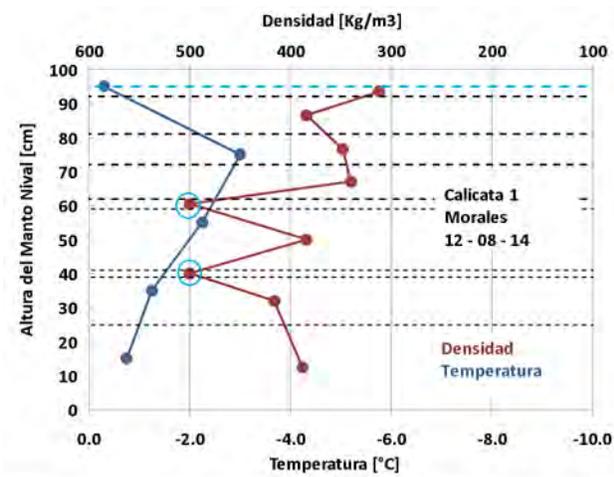
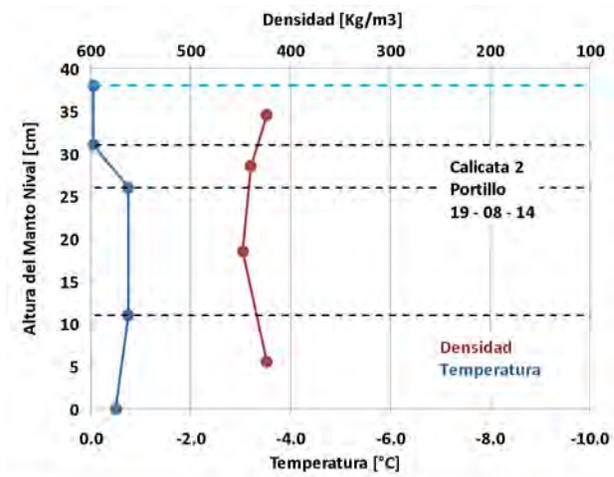
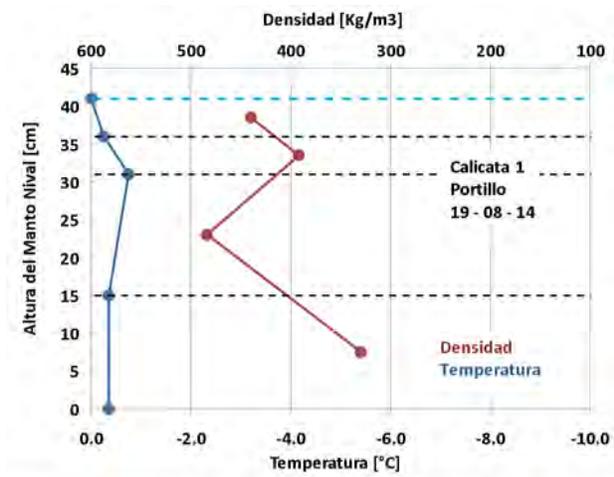
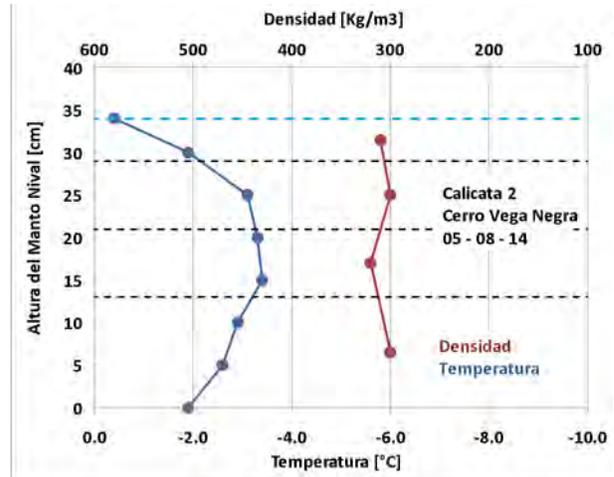
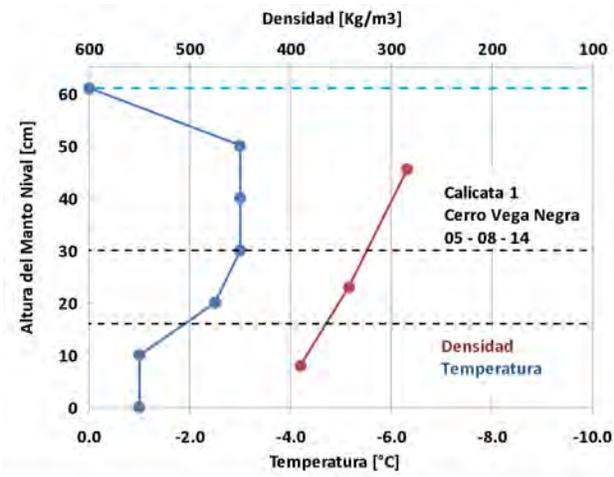


Figura A2.1e.- Perfiles de densidad nival (por estrato) y temperatura nival (graduado) para la cuencas piloto en estudio (cirulos celestes representan estratos de hielo). Año 2014.
Continuación.

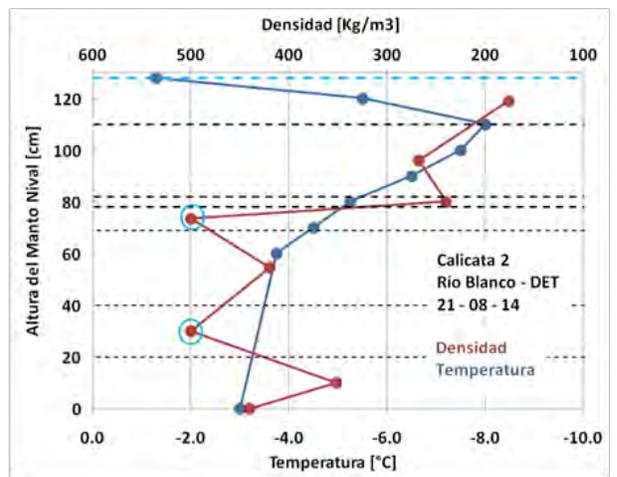
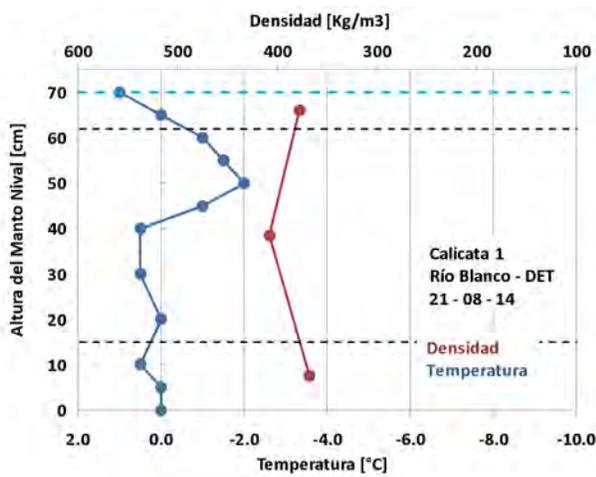
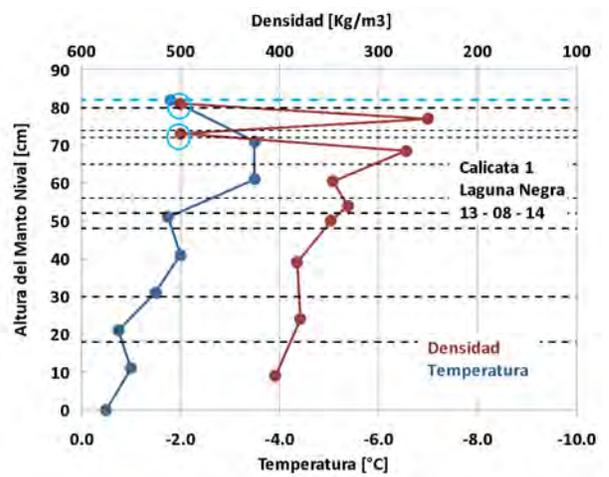
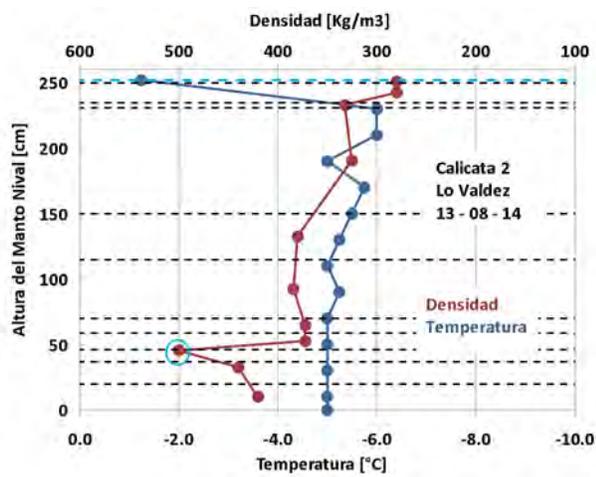
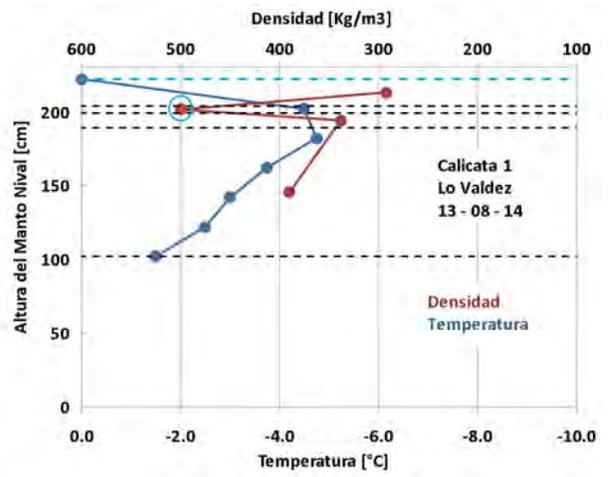
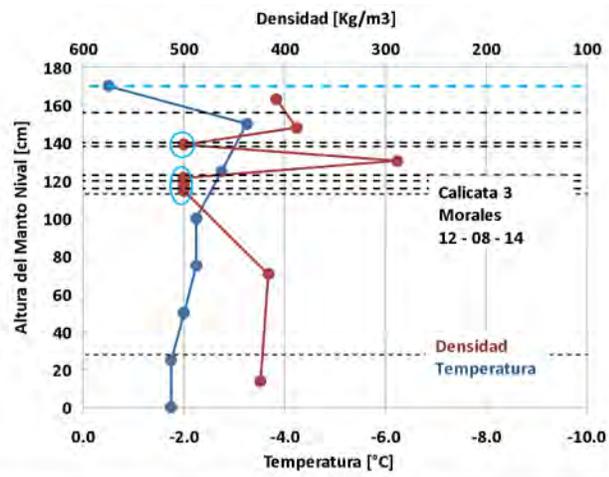


Figura A2.1f.- Perfiles de densidad nival (por estrato) y temperatura nival (graduado) para la cuencas piloto en estudio (círculos celestes representan estratos de hielo). Año 2014. Continuación.

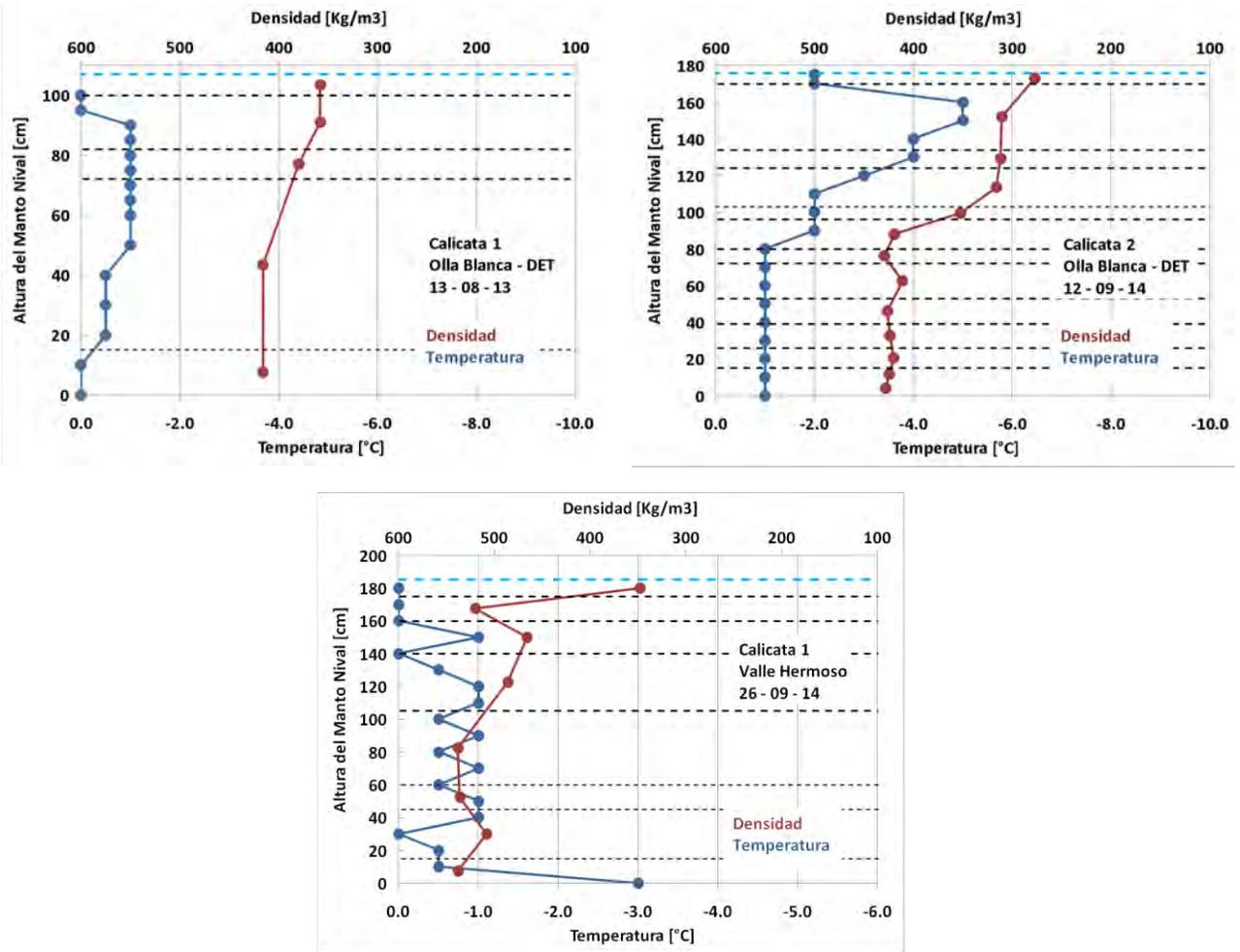
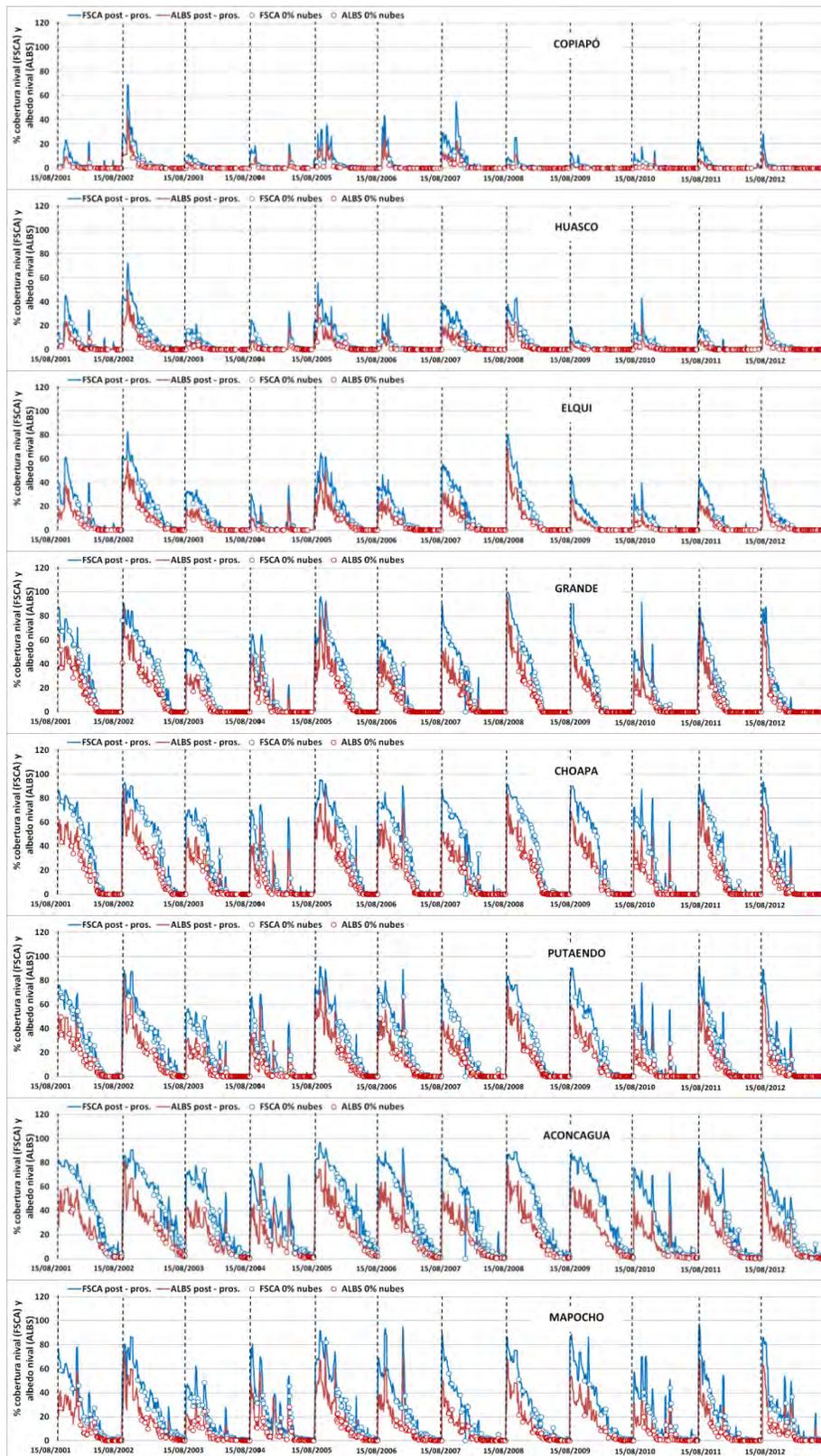


Figura A2.1g.- Perfiles de densidad nival (por estrato) y temperatura nival (graduado) para la cuencas piloto en estudio (cirulos celestes representan estratos de hielo). Año 2014. Continuación.

8.3. Post – procesamiento de los productos satelitales MODIS.



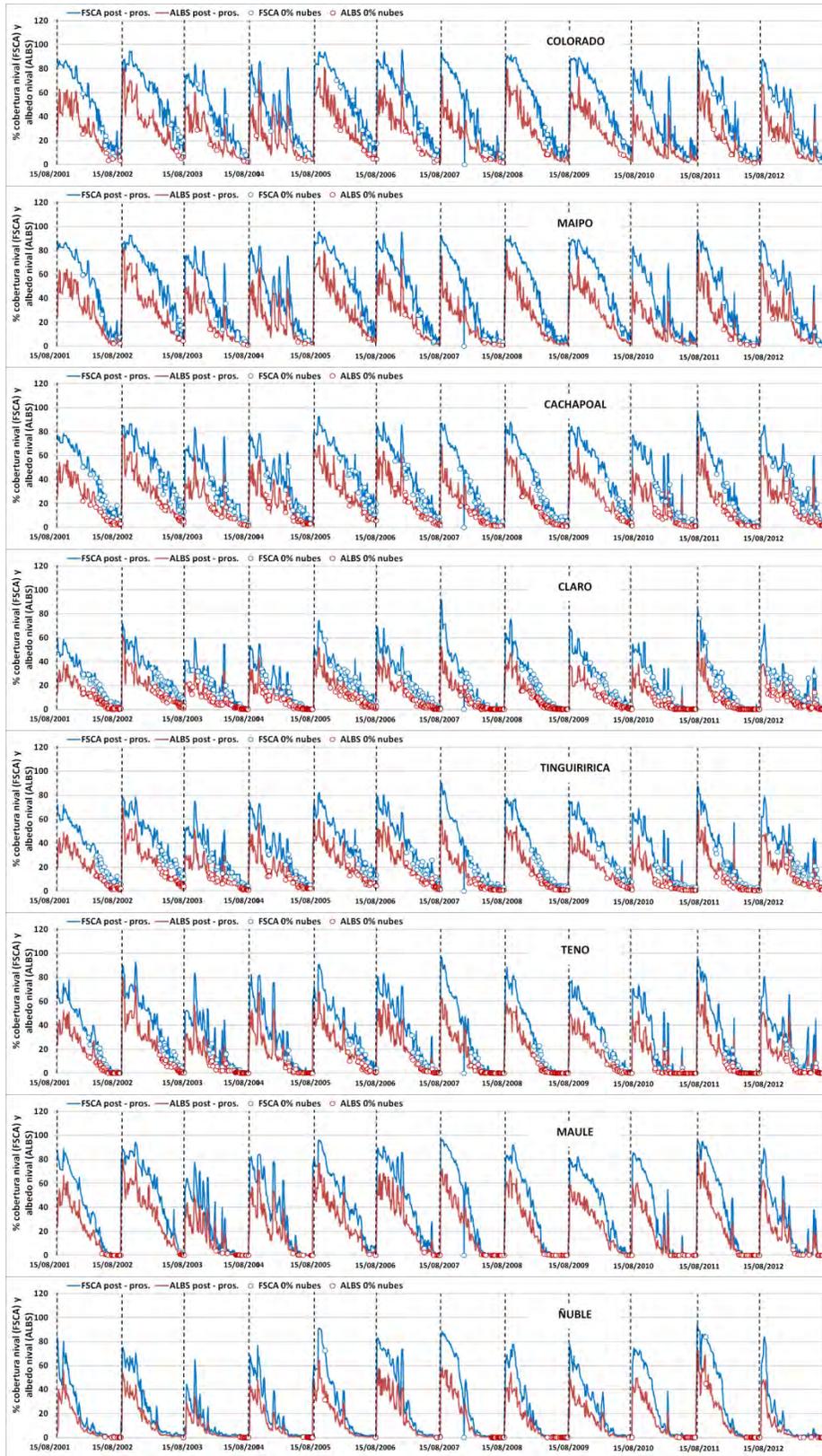
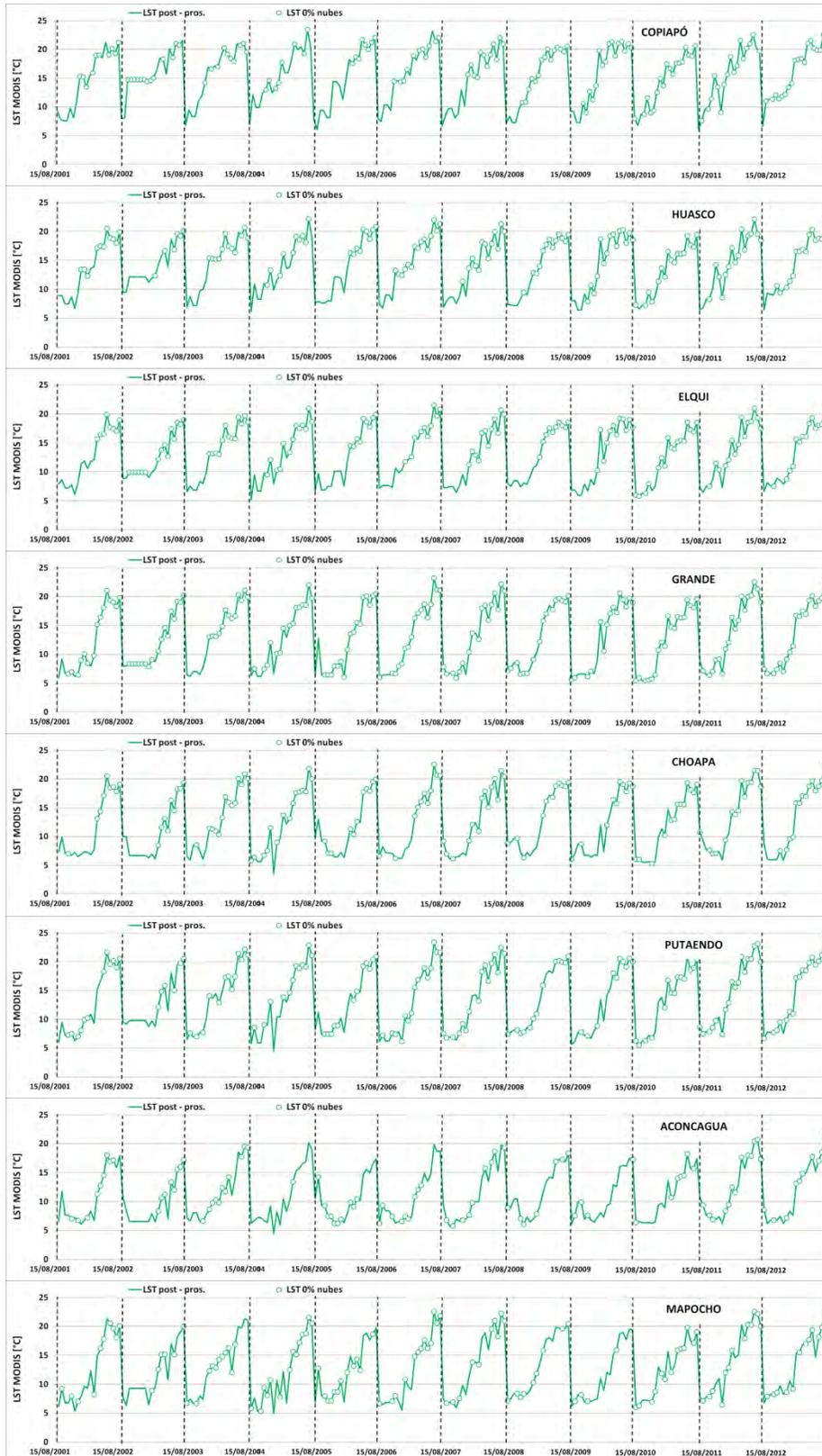


Figura A3.1a (anterior), A3.1b.- Estimación series de tiempo FSCA, ALBS. Continuación.



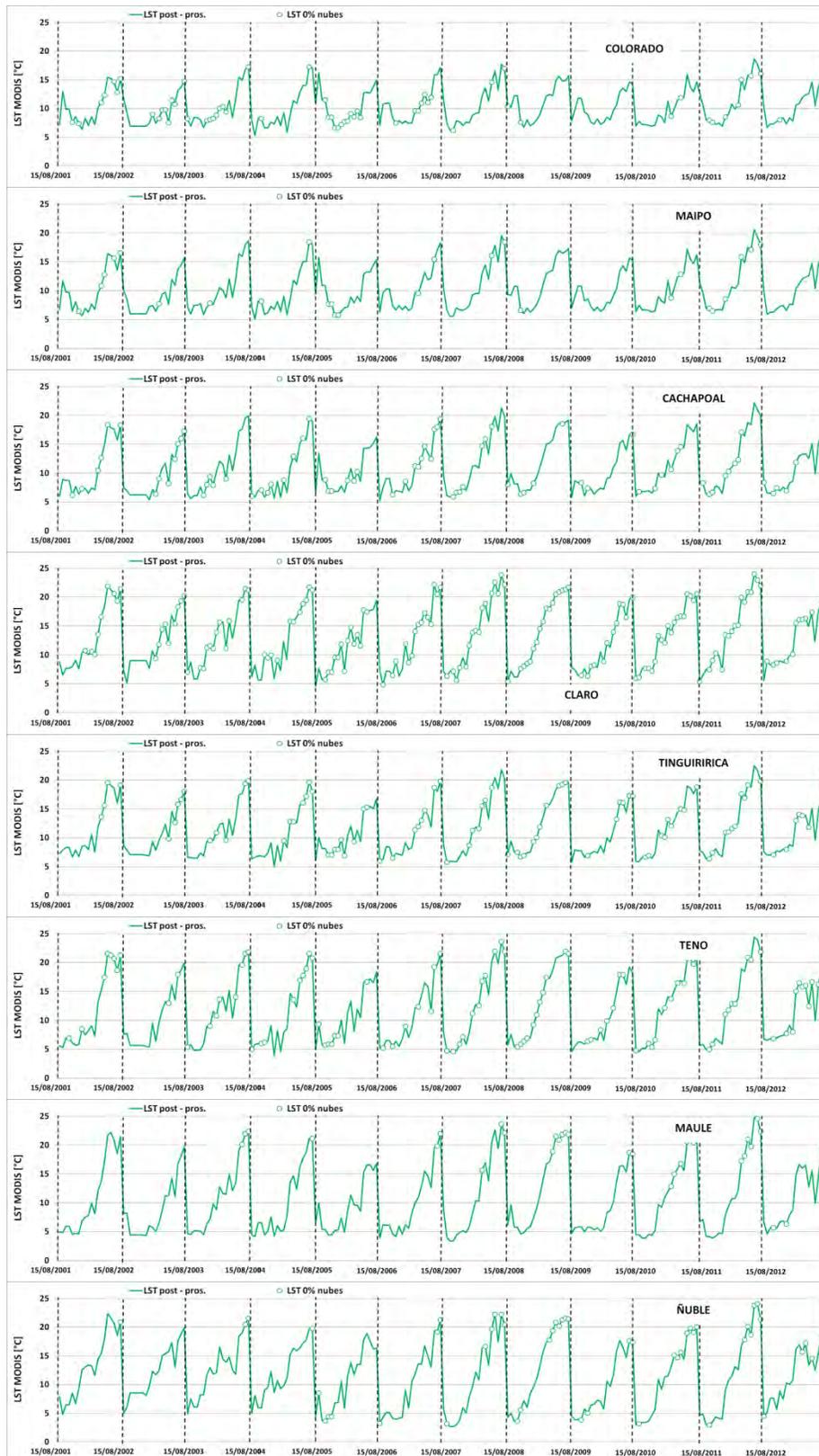


Figura A3.1b (anterior), A3.1d.- Estimación series de tiempo LST. Continuación.

Tabla A3.1.- Coordenadas de las estaciones nivométrica actuales (utilizadas en este estudio) y en discusión.

Snow Pillow	UTM		Elevación [m.s.n.m.]
	Norte	Este	
Portezuelo El Gaucho	6833284	397842	4000
Quebrada Larga	6599752	376125	3500
Cerro Vega Negra	6580076	355129	3600
El Soldado	6458009	357186	3290
Portillo	6365355	396041	3000
Laguna Negra	6274286	397293	2780
Termas del Flaco	6138164	378490	2650
Lo Aguirre	6018203	358258	2000
Alto Mallines	5885079	300864	1770

Tabla A3.2.- Datos para validación del modelo según el esquema de validación 1.

Estaciones Nivométricas	Quebrada Larga	Cerro Vega Negra	El Soldado	Portillo	Laguna Negra	Termas del Flaco	Lo Aguirre	Alto Mallines	Quebrada Larga	Cerro Vega Negra	El Soldado	Portillo	Laguna Negra	Termas del Flaco	Lo Aguirre	Alto Mallines
	SWE observado en cada Snow Pillow [mm]								Modelo Distribuido del SWE [mm]							
2001	293	363	482	1106	352	775	638	453	812	483	929	656	706	1213	833	667
2002	772	1353	711	1831	1019	881	900	898	1412	1255	1156	1513	1126	1443	990	1288
2003	151	387	540	1029	457	657	246	77	490	174	642	521	483	1041	363	62
2004	177	245	123	485	258	635	503	522	336	150	308	872	588	1021	428	842
2005	468	834	723	1868	1032	1270	1854	1081	880	819	905	1530	1121	1483	1280	712
2006	142	347	485	994	686	971	1122	696	552	409	488	948	595	1108	1060	551
2007	329	553	550	725	374	905	958	897	939	510	514	1258	810	756	843	862
2008	458	863	771	935	539	1054	1077	715	798	852	816	1206	867	866	784	542
2009	189	345	300	975	815	895	1279	749	813	289	670	1023	835	843	967	981
2010	143	349	275	454	395	755	613	1091	447	350	369	882	501	731	628	873
2011	386	351	334	535	557	936	1033	1307	672	255	373	658	553	732	939	943
2012	118	234	222	496	317	639	304	403	496	92	323	696	337	796	393	325
Promedio	302	519	460	953	567	864	877	741	720	470	624	980	710	1003	792	721

8.4. Fotografías de las campañas de terreno (2012 - 2014).



Estero Morales, calicata, 2012.



Estero Morales, vista norte, 2012.



Cerro Vega Negra - ladera norte, 2012.



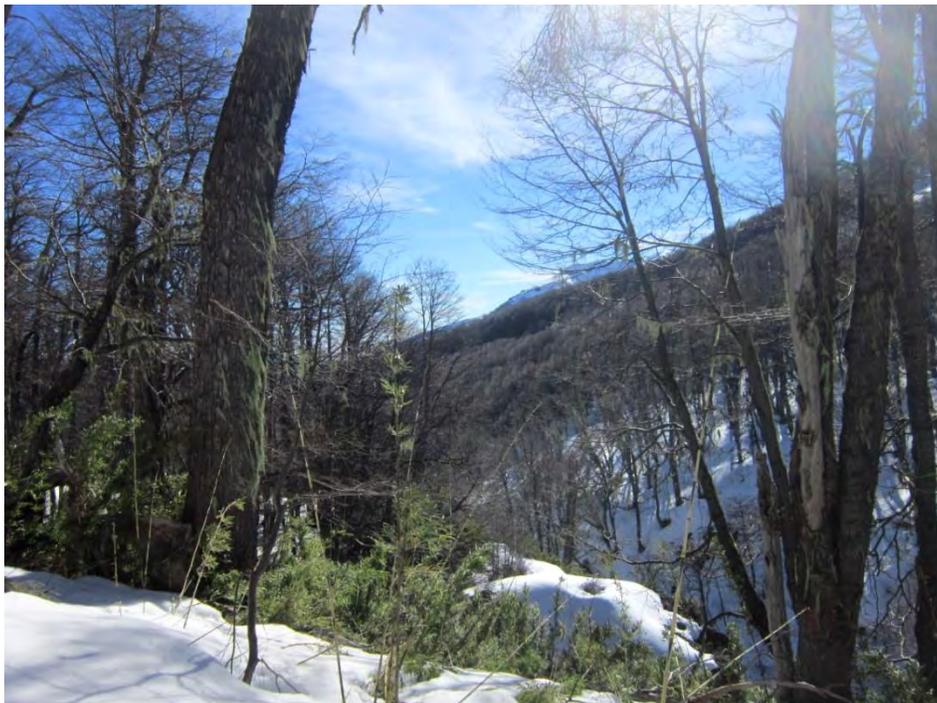
Cerro Vega Negra - grilla y transectas, 2013.



Cerro Vega Negra - grilla, snow pillow, 2013.



Valle Hermoso Chillán - transectas a pie, 2013.



Valle Hermoso Chillán - cobertura vegetal, 2013.



Valle Hermoso Chillán - cobertura vegetal, 2013.



Río Blanco DET - calicata, 2013.



Olla Blanca DET - ruta de nieve, 2013.



Río Blanco DET - calicata, 2013.



Río Blanco DET - equipo de calicatas y helicóptero, 2013.



Estero Mardones – medición en esquí, 2013.



Portillo - snow pillow, ladera sur, 2013.



Laguna Negra - snow pillow, 2013.



Cerro Vega Negra (abajo), 2014.



Cerro Vega Negra, grillas, 2014.



Estero Morales, desplazamiento en helicóptero, 2014.



Lo Valdez, ruta transecta longitudinal, 2014.



Laguna Negra, snow pillow, 2014.



Lo Valdez, calicata.

8.5. Glosario de las siglas y términos utilizados en este informe.

SWE :	Equivalente en agua de nieve (generalmente en mm).
VD :	Volumen total de deshielo entre los meses de Septiembre a Marzo (en millones de metros cúbicos - MMm ³).
VD^{PC1} :	Volumen total de deshielo generado solo por la componente principal. Si posee un asterisco estará indicando que es generada tras el cálculo del pronóstico estadístico sobre $PC1_{VD_{cluster\ i}}$ (en MMm ³).
VP : VD	Vector propio para una cuenca en particular de alguna componente del (análisis de componentes principales).
$PC1_{VD_{cluster\ i}}$:	Componente principal del VD característica del i-ésimo cluster. Si posee un asterisco estará indicando que es generada mediante el pronóstico estadístico. Corresponde al predictando.
IPP_{48} :	Predictor Índice de Precipitación Acumulada entre Abril y Agosto (en mm).
Q_8 :	Predictor Caudal Medio Mensual del mes de Agosto (en m ³ /s).
SWE_{PDA} :	Predictor Equivalente en Agua de Nieve publicado en el informe "Pronóstico de Disponibilidad de Agua" - DGA.
SOI_{38} :	Predictor modificado <i>Southern Oscillation Index</i> .
$AICc$:	Estadístico de parsimonia Akaike modificado.
GCV :	Estadístico de eficiencia de validación cruzada generalizado.
R^2 :	Estadístico de eficiencia coeficiente de determinación (lineal).
σ_e :	Estadístico de error típico (en las mismas unidades que el conjunto muestral).
K :	Ganancia de Kalman (derivada del método de actualización "Filtro de Kalman").
$VD^{PC1*}_{escalado}$:	Volumen total de deshielo pronosticado y escalado tras aplicar la actualización vía ganancia de Kalman.
ρ_s, ρ_w :	Densidad de la nieve y del agua respectivamente (Kg/m ³).
H :	Altura del manto nival (espesor) (generalmente en mm).
$ER\%$:	Error relativo porcentual respecto a la medición "verdadera".
MUS :	Parámetro fisio - climático <i>Máximum Upwind Slope Average</i> (en grados/100).

M_p M :	Derretimiento potencial y real (generalmente en mm).
Q_{nsw} , Q_{nlw} :	Flujos de energía radiativa de onda corta y onda larga respectivamente (en $W/m^2/día$).
T_d , T_a , T_s :	Temperatura grado día, del aire superficial y de la superficie del manto nival (generalmente en $°C$).
\bar{a}_r , f_{rnet} :	Parámetro de transferencia turbulenta en la interfaz nieve - aire (promedio). Parámetro de transformación flujo de energía - masa de agua (depende de la calidad térmica del manto nival).
$FSCA$, $ALBS$:	Denominación para el producto distribuido de la cobertura nival fraccional y el albedo nival proveniente del producto MOD10A1.
κ , LAI :	Parámetro del tipo promedio de follaje e índice "Leaf Area Index".
K_{\downarrow} :	Flujo radiativo de onda corta en condición de cielo claro.
H_s :	Horas sol observadas en terreno.
$NDVI$:	Denominación para el producto distribuido del índice "Normalized Difference Vegetation Index" (o simplemente Vegetation Index para efectos de este informe).
L_{\downarrow} :	Componente incidente de la radiación de onda larga.
$e_{a(HR)}$:	Presión de vapor para una humedad relativa dada.
LST :	Denominación para el producto distribuido de la temperatura superficial proveniente del producto MOD11A1.
R_{SWE-VD}^2 :	Denominación del valor de la herramienta de evaluación estadística para la definición de ubicaciones futuras (snow pillow (SP) / scale) en función de la capacidad predictiva del SWE respecto al VD.
SP :	Denominación abreviada de snow pillow. Puede ser usada para denotar cualquier tipo de medición de equivalente en agua de nieve instrumental en una estación nivométrica, por ejemplo, un snow scale.