

AUTORIDAD INTERJURISDICCIONAL DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS LIMAY,
NEUQUÉN Y NEGRO



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA - DEPARTAMENTO DE ING. CIVIL



Proyecto Integrador Profesional

“Modelación hidrológica, a paso de tiempo de 6 horas, de la cuenca del río
Aluminé utilizando la red hidrometeorológica de telemedición para la
simulación de caudales”



Autores

Jorge Omar Vallejos

Ulloa Navarrete Diego Alberto

Tutor Académico

Ing. Fernando Losano

Marzo 2017

Resumen

Desde el año 1996, la AIC tiene operativo y en funcionamiento un modelo hidrológico de la cuenca del río Collón Cura, de la cual forma parte la subcuenca del río Aluminé. El modelo está diseñado para la simulación y el pronóstico de caudales diarios. Desde ese momento hasta la actualidad las necesidades y exigencias operativas se han incrementado, como así también la información disponible, a través de la expansión de la red hidrometeorológica de telemedición, por lo que es necesaria la implementación de un nuevo modelo hidrológico.

El objetivo del presente proyecto consiste en la modelación hidrológica de la cuenca del río Aluminé a paso de tiempo de seis horas para la simulación de caudales. Se utiliza la herramienta de modelación matemática IHMS/ HBV.

Las metodologías desarrolladas permiten interpretar los fenómenos físicos y reproducirlos mediante las rutinas del modelo.

La creación del modelo hidrológico, con una nueva configuración de subcuencas, y con la utilización de una mayor cantidad de estaciones hidrometeorológicas permiten simular eficazmente los caudales, en los diferentes afluentes de la subcuencas acordes a las necesidades requeridas.

Palabras claves: Aluminé, modelo hidrológico, IHMS/HBV, cuenca, calibración, simulación, caudales.

Abstract

Since 1996, AIC has been operating a hydrological model of the Collón Cura river basin, of which the Aluminé river sub-basin forms part. The model is designed for the simulation and forecast of daily flows. From that moment until the present, the operational needs and requirements have increased, as well as the available information, through the expansion of the hydrometeorological network of telemetry. Therefore, it is necessary to create a new hydrological model.

The objective of the present project is the hydrological modeling of the basin of the Aluminé river at a time of six hours for the simulation of flows. The IHMS/HBV mathematical modeling tool is used.

The developed methodologies enable us to interpret the physical phenomena and to reproduce them through the routines of the model.

The creation of the hydrological model, with a new configuration of sub-basins, with the use of a greater number of hydrometeorological stations enable us to simulate the flows effectively, in the different tributaries of the sub-basins according to the required necessities.

Keywords: Aluminé, hydrological model, IHMS/HBV, basin, calibration, simulation, flows.

Agradecimientos, Reconocimientos, dedicatorias.

Queremos agradecer a nuestras familias y amigos, que nos acompañaron siempre en el transcurso de la carrera.

A nuestro tutor Ing. Fernando Losano por su labor y predisposición en todo momento para llevar adelante este proyecto.

A la Universidad Nacional del Comahue por brindarnos el espacio para poder estudiar lo que nos gusta. A los docentes de la facultad de ingeniería, que con su dedicación y conocimiento aportaron mucho a nuestra formación profesional.

A la Autoridad Interjurisdiccional de las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro por facilitarnos el apoyo técnico y permitirnos utilizar los recursos necesarios para la realización del trabajo. A nuestro compañeros de la Secretaria de Operación y Fiscalización por su cooperación y acompañamiento.

Diego Alberto Ulloa

Jorge Omar Vallejos

Índice General

Resumen.....	I
Abstract	II
Agradecimientos, Reconocimientos, dedicatorias.....	III
Índice General	IV
Índice de Figuras.....	VII
Índice de Tablas.....	XI
1. Introducción y Objetivos.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Objetivo específico.....	2
1.4. Metodologías.....	3
1.5. Plan de actividades.....	4
1.6. Estructura de tesis.....	5
2. Descripción de la cuenca.....	6
2.1. Introducción.....	6
2.2. Delimitación de las subcuencas del Aluminé.....	8
2.3. Características Físicas de las subcuencas.....	8
2.3.1. Morfología de las Subcuencas.....	8
2.3.2. Cobertura del suelo.....	10
3. Datos Hidrometeorológicos.....	12
3.1. Introducción.....	12
3.2. Recopilación de información.....	12
3.3. Validación de Datos.....	13
3.3.1. Datos inconsistentes.....	13
3.3.2. Homogeneidad – Método de Doble masas.....	14
3.3.3. Relleno de datos faltantes:.....	15
3.4. Selección de estaciones.....	16
4. Modelación Hidrológica – Modelo IHMS/HBV.....	19
4.1. Introducción.....	19
4.2. Ecuación de continuidad o balance hidrológico.....	20

4.3.	Datos de entradas al modelo.....	21
4.3.1.	Precipitación.....	21
4.3.2.	Temperatura.	28
4.3.3.	Caudales.	35
4.3.4.	Evapotranspiración.....	37
4.4.	Rutinas del modelo.....	42
4.4.1.	Acumulación / fusión de nieve.....	43
4.4.2.	Humedad del suelo.	46
4.4.3.	Respuesta de la escorrentía.....	47
4.4.4.	Propagación de flujo en el cauce.....	50
4.4.5.	Lagos.	52
5.	Ejecución del modelo.	53
5.1.	Carga del modelo.	53
5.1.1.	Definición del distrito.....	53
5.1.2.	Definición de Subcuencas.	54
5.1.3.	Definición de la configuración de las estaciones.	55
5.1.4.	Definición de las estaciones utilizadas en el modelo.	56
5.1.5.	Selección de las zonas geográficas de las subcuencas.	60
5.1.6.	Definición de la conexión hidrológica entre subcuencas.	61
5.1.7.	Definición de las características de los lagos.	64
5.1.8.	Importación de los datos hidrometeorológicos.....	66
5.2.	Calibración.	66
5.2.1.	Introducción.	66
5.2.2.	Longitud del periodo de datos de calibración.....	66
5.2.3.	Criterios de evaluación.....	68
5.2.4.	Valores de descargas observadas para la calibración del modelo.	72
5.2.5.	Metodología de calibración de parámetros.	74
5.3.	Validación.	88
5.3.1.	Introducción.	88
5.3.2.	Periodo de tiempo de Validación.	88
5.3.3.	Criterio de Evaluación.....	89

5.4.	Test.....	89
5.4.1.	Introducción.	89
5.4.2.	Periodo de tiempo de Test.	89
5.4.3.	Criterio de Evaluación.....	90
6.	Análisis de Resultados.....	91
6.1.	Parámetros de calibración.	91
6.2.	Pesos de las Estaciones.	92
6.3.	Calidad del modelo – Criterio de Moriasi.	93
6.4.	Caudales simulados.....	94
6.5.	Acumulación y fusión de nieve.....	101
7.	Conclusiones.	103
7.1.	Descripción de la cuenca.....	103
7.2.	Datos hidrometeorológicos.	104
7.3.	Modelación hidrológica - Modelo IHMS/HBV.	105
7.4.	Ejecución del modelo.....	106
7.5.	Resultados.	107
7.6.	Comentarios.	107
8.	Bibliografía.....	108
9.	Anexo.	109
9.1.	Elaboración de mapas de precipitación - Interpolación de Kriging.	109
9.1.1.	Conceptos Teóricos.....	109
9.1.2.	Creación de un mapa de precipitaciones con el método de Kriging.	114
9.2.	Estimación del gradiente altitudinal de precipitaciones P _{calt}	125
9.3.	Elaboración de mapas de temperatura del aire.....	128
9.3.1.	Introducción.	128
9.3.2.	Datos.	128
9.3.3.	Método.	129
9.3.4.	Calibración y Validación.....	130
9.3.5.	Resultados.	131
9.4.	Estimación del gradiente altitudinal de Temperatura T _{calt}	144
9.5.	Diagramas de resultados IHMS/HBV.....	148

Índice de Figuras.

Fig 2-1: Mapa de Ubicación.....	6
Fig 2-2: Caudales medios mensuales.	7
Fig 2-3: Delimitación de Subcuencas.....	8
Fig 2-4: Curva hipsométrica de una Subcuenca.....	9
Fig 2-5: Mapa de cobertura de suelos - Clasificación IHMS/HBV.....	11
Fig 3-1: Gráfico de homogeneidad de doble acumulación.....	14
Fig 3-2: Estaciones Hidrometeorológicas seleccionas para el modelo.	17
Fig 3-3: Estaciones de Aforos seleccionadas para el modelo.....	18
Fig 4-1: Eventos hidrológicos	24
Fig 4-2: Mapa de distribución de precipitaciones de un Evento.	25
Fig 4-3: Hidrograma del Evento N°3.	25
Fig 4-4: Distribución de lluvias con relación a la altura.	26
Fig 4-5: Temperaturas en relación a la altura para un evento húmedo.	31
Fig 4-6: Temperaturas en relación a la altura para un periodo seco - mes de Enero.....	32
Fig 4-7: Distribución de temperatura con relación a la altura.	33
Fig 4-8: Estaciones de caudales.	36
Fig 4-9: Esquema de métodos de medición de la Evapotranspiración.	38
Fig 4-10: Evapotranspiración media mensual – Método de Interpolación (mm/día).....	38
Fig 4-11: Evapotranspiración media mensual. Athorn.....	42
Fig 4-12: Esquema de rutinas – modelo HBV.	43
Fig 4-13: Relación de las variables en la rutina de humedad del suelo.....	44
Fig 4-14: Tipo de Precipitación en función de la altura.	44
Fig 4-15: Umbral de temperatura.	46
Fig 4-16: Relación de la humedad del suelo con la precipitación efectiva.	47
Fig 4-17: Relación de la humedad del suelo con la evapotranspiración.	47
Fig 4-18: Rutina de respuesta y propagación de onda.....	48
Fig 4-19: Función de descarga del depósito superior e inferior.	49
Fig 4-20: Función de transformación de cauce.	50
Fig 4-21: Hidrograma de respuesta - Muskingum.....	51
Fig 5-1: Ventana gráfica de información del Software IHMS/HBV.....	54

Fig 5-2: Ventana gráfica carga del modelo	57
Fig 5-3: Carga al modelo de tipos de vegetación por franja altimétrica.....	61
Fig 5-4: Conexión hidrológica entre las subcuencas.....	63
Fig 5-5: Curva de Caudales de Salida Lago Aluminé vs Alturas de Lago.....	65
Fig 5-6: Esquema de formato de archivos utilizados por el software.	66
Fig 5-7: Año 2006 (01-04-2006 al 31-03-2007) - Año Extrahúmedo.....	67
Fig 5-8: Año 2007 (01-04-2007 al 31-03-2008) - Año Seco.	67
Fig 5-9: Gráfico de diferencia acumulada entre la simulación y el caudal observado.	68
Fig 5-10: Gráfico de SNOW.	69
Fig 5-11: Gráfico de caudales calculados y observados.....	69
Fig 5-12: Tipos de cierres IHMS/HBV.	73
Fig 5-13: Calibración de una cuenca.....	73
Fig 5-14: Secuencia de calibración de parámetros IHMS/HBV.	74
Fig 5-15: Parámetro tt	76
Fig 5-16: Parámetro dtm	77
Fig 5-17: Parámetro C _{fmax}	78
Fig 5-18: Parámetro FC.....	80
Fig 5-19: Parámetro Beta.	80
Fig 5-20: Parámetro LP.....	81
Fig 5-21: Parámetro KHQ.....	83
Fig 5-22: Parámetro Alfa.....	84
Fig 5-23: Parámetro Perc.....	85
Fig 5-24: Parámetro K4.....	85
Fig 5-25: Parámetro Maxbas.....	86
Fig 5-26: Parámetro LAG.	87
Fig 5-27: Parámetro DAMP.....	87
Fig 6-1: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2000-2002.....	95
Fig 6-2: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2003-2005.....	96
Fig 6-3: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2006-2008.....	97
Fig 6-4: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2009-2011.....	98
Fig 6-5: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2012-2014.....	99

Fig 6-6: Caudales simulados en Huechahue - Periodo hidrológico 2002.	100
Fig 6-7: SNOW IHMS/HBV Sda. Lago Aluminé vs EAN estaciones AIC año 2001 y 2002..	101
Fig 6-8: SNOW IHMS/HBV Sda. Lago Aluminé vs EAN estaciones AIC año 2006.....	102
Fig 9-1: Cálculo de la diferencia cuadrada entre las ubicaciones asociadas.	110
Fig 9-2: Semivariograma empírico.	111
Fig 9-3: Ajuste del Semivariograma con un modelo esférico y con un modelo exponencial. ..	112
Fig 9-4: Paso 1 – Ingreso de Shape y campo “z”.	115
Fig 9-5: Paso 2 – Selección de tipo de método de Kriging.	116
Fig 9-6: Paso 3 – Selección del Ajuste del Semivariograma.	117
Fig 9-7: Paso 4 - Selección de Pesos.....	118
Fig 9-8: Paso 5 - Análisis de errores.	120
Fig 9-9: Paso 5 - Reporte del método - Mapa de precipitaciones final.	120
Fig 9-10: Mapa de precipitaciones – Evento 1 – Mayo 2001.....	121
Fig 9-11: Mapa de precipitaciones – Evento 3 – Octubre 2002.....	122
Fig 9-12: Mapa de precipitaciones – Evento 7 – Julio 2006.....	123
Fig 9-13: Mapa de precipitaciones – Evento 11 – Octubre 2011.....	124
Fig 9-14: Distribución de lluvias con relación a la altura.	125
Fig 9-15: Prueba de Normalidad - Gráfico P-P plot.....	132
Fig 9-16: Prueba de Normalidad - Histograma.	132
Fig 9-17: Autocorrelación: Prueba de Durbin-Watson - Limites.....	134
Fig 9-18: Relación entre cada variable y la temperatura.....	136
Fig 9-19: Relación lineal entre la temperatura y la altitud.	137
Fig 9-20: Resultado algebra de mapas de temperaturas.	138
Fig 9-21: Mapa de temperatura – Evento 3 – Octubre 2002.....	140
Fig 9-22: Mapa de temperatura – Evento 7 – Julio 2006.....	141
Fig 9-23: Mapa de temperatura – Promedio mensual - Diciembre.....	142
Fig 9-24: Mapa de temperatura – Promedio mensual - Febrero.....	143
Fig 9-25: Distribución de la temperatura con relación a la altura.	144
Fig 9-26: Valores de Tcalt para cada subcuenca.....	147
Fig 9-27: Salida Lago Aluminé - 2000-2003.....	149
Fig 9-28: Salida Lago Aluminé - 2003-2006.....	150

Fig 9-29: Salida Lago Aluminé - 2006-2009.	151
Fig 9-30: Salida Lago Aluminé - 2009-2012.	152
Fig 9-31: Salida Lago Aluminé - 2012-2015.	153
Fig 9-32: Rahue - 2000-2003.	154
Fig 9-33: Rahue - 2003-2006.	155
Fig 9-34: Rahue - 2006-2009.	156
Fig 9-35: Rahue - 2009-2012.	157
Fig 9-36: Rahue - 2012-2015.	158
Fig 9-37: Santa Rosa - 2000-2003.....	159
Fig 9-38: Santa Rosa - 2003-2006.....	160
Fig 9-39: Santa Rosa - 2006-2009.....	161
Fig 9-40: Santa Rosa - 2009-2012.....	162
Fig 9-41: Santa Rosa - 2012-2015.....	163
Fig 9-42: Puente Malleo - 2000-2003.	164
Fig 9-43: Puente Malleo - 2003-2006.	165
Fig 9-44: Puente Malleo - 2006-2009.	166
Fig 9-45: Puente Malleo - 2009-2012.	167
Fig 9-46: Puente Malleo - 2012-2015.	168
Fig 9-47: Huechahue - 2000-2003.	169
Fig 9-48: Huechahue - 2003-2006.	170
Fig 9-49: Huechahue - 2006-2009.	171
Fig 9-50: Huechahue - 2009-2012.	172
Fig 9-51: Huechahue - 2012-2015.	173

Índice de Tablas.

Tabla 2-1: Caudales y Lluvias medias mensuales.	7
Tabla 2-2: Características morfológicas de las Subcuencas.	10
Tabla 3-1: Listado de Estaciones en Base de Datos AIC.	13
Tabla 3-2: Rangos por unidad.	14
Tabla 3-3: Selección de estaciones a utilizar y sus datos hidrometeorológicos.	16
Tabla 4-1: Selección de eventos de lluvias.	24
Tabla 4-2: Valores de P _{calt} para cada subcuenca.	27
Tabla 4-3: Valores de T _{calt} para cada subcuenca.	34
Tabla 4-4: Valores de HQ para cada subcuenca.	37
Tabla 4-5: Temperaturas medias mensuales e índice calórico.	40
Tabla 4-6: Parámetros de cálculo de la Evapotranspiración según Thornthwaite.	41
Tabla 4-7: Valores de Athorn para cada subcuenca.	42
Tabla 5-1: Subcuencas seleccionadas en distrito CC6hs.	55
Tabla 5-2: Carga de estaciones al modelo.	56
Tabla 5-3: Cotas de estaciones sobre el nivel del mar.	58
Tabla 5-4: Atribución de los pesos de precipitación para cada subcuenca.	59
Tabla 5-5: Atribución de los pesos de temperaturas para cada subcuenca.	59
Tabla 5-6: Atribución de los pesos de caudales para cada subcuenca.	60
Tabla 5-7: Parámetros de la fórmula de relación caudal efluente y altura de lagos.	65
Tabla 5-8: Clasificación hidrológica por derrame en periodos de calibración.	67
Tabla 5-9: Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación.	72
Tabla 5-10: Clasificación hidrológica por derrame en periodo de validación.	89
Tabla 5-11: Clasificación hidrológica por derrame en periodo de Test.	90
Tabla 5-12: Interpretación de los parámetros estadísticos.	90
Tabla 6-1: Parámetros de Calibración del modelo por grupos	91
Tabla 6-2: Atribución de los pesos de precipitaciones para cada subcuenca.	92
Tabla 6-3: Atribución de los pesos de temperaturas para cada subcuenca.	92

Tabla 6-4: Estadísticos de calidad del modelo y clasificación de Moriasi.....	93
Tabla 9-1: Datos del Shape de precipitaciones de cada evento.....	114
Tabla 9-2: Valores de P _{calt} por evento para cada subcuenca.....	126
Tabla 9-3: Valores de P _{calt} para cada subcuenca.....	127
Tabla 9-4: Ubicación geográfica de estaciones de temperaturas.....	129
Tabla 9-5: Ubicación geográfica de estaciones de validación de temperaturas.	131
Tabla 9-6: Prueba de Normalidad: Shapiro-Wilk.....	132
Tabla 9-7: Prueba de Homocedasticidad.....	133
Tabla 9-8: Datos de entrada - Test de Durbin-Watson.....	134
Tabla 9-9: Autocorrelación – Resultados Test de Durbin-Watson.....	134
Tabla 9-10: Multicolinealidad - Valores de Tolerancia y FAV.	135
Tabla 9-11: Multicolinealidad - Correlación.....	135
Tabla 9-12: Error de temperaturas en cada estación.....	137
Tabla 9-13: Validación de mapas de temperaturas.....	139
Tabla 9-14: Valores de T _{calt} acumulación para cada subcuenca.....	145
Tabla 9-15: Valores de T _{calt} acumulación para cada subcuenca.....	146
Tabla 9-16: Valores de T _{calt} promedio para cada subcuenca.	146

1. Introducción y Objetivos.

1.1.Introducción.

El año 1996 la Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los Ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC) pone en funcionamiento el “Sistema de Pronósticos Hidrológicos para las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro” aplicando el Modelo hidrológico IHMS/HBV. La estructura de subcuencas y estaciones fueron seleccionadas en base a la información disponible y a las exigencias operativas del momento. El mismo fue actualizado en el año 1997, ajustando la cantidad de estaciones pero sin modificar su estructura. En el año 2005 fue adquirida la versión 5.3. Desde ese momento hasta la actualidad las necesidades y exigencias operativas se han incrementado, como así también la información disponible, por lo tanto es de gran importancia actualizar dicho sistema.

El presente trabajo forma parte de la primera etapa de actualización del sistema de pronósticos para la cuenca del Collón Cura. En el mismo se pretende modelar la cuenca del río Aluminé hasta su desembocadura, y poder simular los caudales. La cuenca del río Aluminé aporta más del 60% de los caudales del río Collón Cura que desembocan al embalse de Piedra del Águila.

Al mismo tiempo, la expansión de la red de estaciones hidrometeorológicas de telemedición, con más de 15 años de recolección y procesamiento de datos, permite plantear una configuración de sub-cuencas a un paso de tiempo de seis horas. La misma será de gran utilidad para poder anticipar eventuales situaciones críticas o de emergencias hídricas, como así también caracterizar hidrológicamente el área de estudio.

Los Caudales.

La escorrentía es el resultado del proceso de transformación de la precipitación sobre la cuenca. En este proceso intervienen además fenómenos hidrometeorológicos como la evapotranspiración, la infiltración, el aporte de las aguas subterráneas y la fusión de la nieve.

El modelo Hidrológico

El modelo HBV es un sistema computarizado para el cálculo hidrológico, desarrollado por el Instituto del Servicio Hidrológico y Meteorológico Sueco (IHMS) en 1971; es un modelo de balance hídrico, determinístico, conceptual, continuo y semidistribuido; que describe los principales procesos de ciclo hidrológico. La estructura flexible del sistema HBV permite que el modelo haga las subdivisiones necesarias con respecto a diferentes zonas de clima, uso del suelo, densidad de la red hidrometeorológica, etc. y ser calibrado con una resolución temporal que permite simular caudales máximos horarios.

En el presente trabajo se plantea su utilización como una herramienta de simulación de caudales a paso de tiempo de seis horas para la cuenca del río Aluminé.

Este modelo conceptual de esorrentía tiene como entrada principal datos de precipitación y temperatura. A través de funciones matemáticas cuantifican los procesos físicos más dominantes, explican permanentemente el agua almacenada en la cuenca y simula los caudales en forma continua, para períodos de tiempo tan largos como las series disponibles de datos de entrada.

La implementación y aplicación de un modelo requiere del conocimiento previo del régimen hidrológico y de las condiciones ambientales de la cuenca.

El modelo calibrado permite simular el comportamiento del proceso hidrológico y predecir los resultados en diferentes condiciones de análisis o alternativas.

1.2.Objetivo general.

Modelar hidrológicamente, a paso de tiempo de seis horas, la cuenca del río Aluminé utilizando la red hidrometeorológica de telemedición para la simulación de caudales.

1.3.Objetivo específico.

- Proponer, definir y caracterizar las subcuencas en que se plantea distribuir el área de la cuenca en función de la disponibilidad de información de las variables de entrada, para ajustar la respuesta del sistema.
- Procesar y validar tanto los datos de entrada (lluvia, temperatura, nivel de lago y evaporación), como los de salida (caudal), para el paso de tiempo de seis horas.

- Construir el modelo hidrológico de la cuenca analizada utilizando la herramienta IHMS/modelo HBV versión 5.3.
- Obtener resultados consistentes y aceptables de caudales calculados en cada uno de los puntos de control (estaciones hidrométricas seleccionadas), mediante la modelación hidrológica a través de la herramienta arriba descripta.

1.4. Metodologías.

Para completar con los objetivos propuestos, el trabajo se desarrollará dentro y fuera del ámbito laboral en la AIC, en la secretaria de operación y fiscalización (SOyF) por lo que se dispondrá de todos los datos, estadísticas y herramientas, utilizadas en el área.

Se hará uso de bibliografía, trabajos y estudios hidrológicos previos y referidos al tema.

Para la modelación hidrológica se utilizará el software IHMS/modelo HBV versión 5.3 adquirido e implementado desde el año 2005 por la AIC.

Se seguirá la siguiente metodología de trabajo para la determinación de las variables y componentes requeridas del modelo IHMS/HBV.

Componentes Físicas.

Utilización del software ArcGIS para la delimitación de subcuencas y caracterización física de las mismas (elevación, cobertura, área).

Variables de Entrada.

Las variables de entrada empleadas en este estudio, serán datos de precipitación (p), temperatura media (t), caudales de río (q) y niveles de lagos (w), a paso de tiempo de 6 horas, recogidas de las estaciones de telemedición seleccionadas dentro del área de estudio.

La selección de estaciones se hará en base a un relevamiento y análisis de la información hidrometeorológica disponible dentro de la base de datos.

Variables de ponderación

Análisis de eventos de lluvias para obtener la ponderación o “peso” que se asigna a cada una de las estaciones de lluvia y temperaturas dentro de las subcuencas.

Una vez obtenidas las variables y componentes que requiere el modelo, se procede a la carga al software IHMS/HBV; se realizarán los procesos de calibración, validación y test; y se obtendrán conclusiones en base a los resultados obtenidos.

Variables de estado - Variables de salida.

Las variables de estado representan las condiciones de agua almacenada en la cuenca en un instante determinado. Estas variables se obtienen como salidas de la simulación del modelo. Las variables de estado son:

sp: # Parte congelada de la capa de nieve (mm).

wc: # Contenido de agua de deshielo de la capa de nieve (mm).

sm: # Humedad del suelo (mm).

uz: Contenido de agua en la zona superior en la rutina de respuesta (mm).

lz: Contenido de agua en zona inferior en la rutina de respuesta (mm).

wcomp. Estado del agua del lago calculada (m).

wstr: Estado del agua del lago observada al comienzo del paso de tiempo (m).

Nota: #: Valores diferentes para distintas zonas.

En una simulación, las condiciones finales de la cuenca (variables de salida) pueden utilizarse como condiciones iniciales de otra simulación.

1.5. Plan de actividades.

Recopilación de información y estudio de antecedentes.

1. Estudio de trabajos anteriores de características similares y del manual de uso del modelo IHMS/HBV.
2. Búsqueda de estaciones de medición hidrometeorológica disponibles en la actualidad por la AIC.
3. Recopilación de toda la información disponible en la base de datos DIMS que posee la AIC, tanto de telemedición como de observadores.
4. Búsqueda de periodos en común de datos en la mayor cantidad de estaciones posibles.

Tareas de desarrollo.

1. Delimitación de sub-cuencas y caracterización física (elevación, cobertura y área). Componentes físicas.
2. Selección de Estaciones y validación de datos (temperatura, lluvia, caudal y evaporación). Variables de entrada.
3. Análisis de eventos de lluvia, determinación de ponderación de las estaciones. Variables de ponderación.
4. Carga de las componentes físicas, variables de estado y variables de entradas del modelo IHMS/HBV.
5. Calibración.
6. Validación.
7. Test.

Resultados finales.

1. Evaluación de los resultados obtenidos de la validación y test.
2. Conclusiones.
3. Redacción del informe final y presentación.

1.6. Estructura de tesis.

El informe de esta tesis cuenta con 8 capítulos organizados de la siguiente manera: en el primer capítulo se hace una introducción y se enuncia el objetivo general, los objetivos particulares, la metodología utilizada para realizarlos y se describen las fases del proyecto. En el segundo capítulo se hace una descripción de la cuenca, área de estudio, las características morfológicas y físicas, y se delimitan las subcuencas. En el tercer capítulo se recopilan, procesan y validan los datos de entradas al modelo, y se seleccionan las estaciones a utilizar. En el cuarto capítulo se explica el modelo hidrológico IHMS/HBV versión 5.3 y sus rutinas. En el quinto capítulo se desarrolla la carga del modelo, y las metodologías de calibración, validación y test. Los resultados obtenidos se exponen en el sexto capítulo mientras que en el séptimo capítulo se explican las conclusiones a las que se llegaron. En el octavo capítulo se presenta la bibliografía utilizada.

2. Descripción de la cuenca.

2.1.Introducción.

El río Aluminé se encuentra ubicado en la provincia del Neuquén, Argentina. Nace en el lago Aluminé y desemboca en el Río Collón Cura, drenando una cuenca de 8399 km².

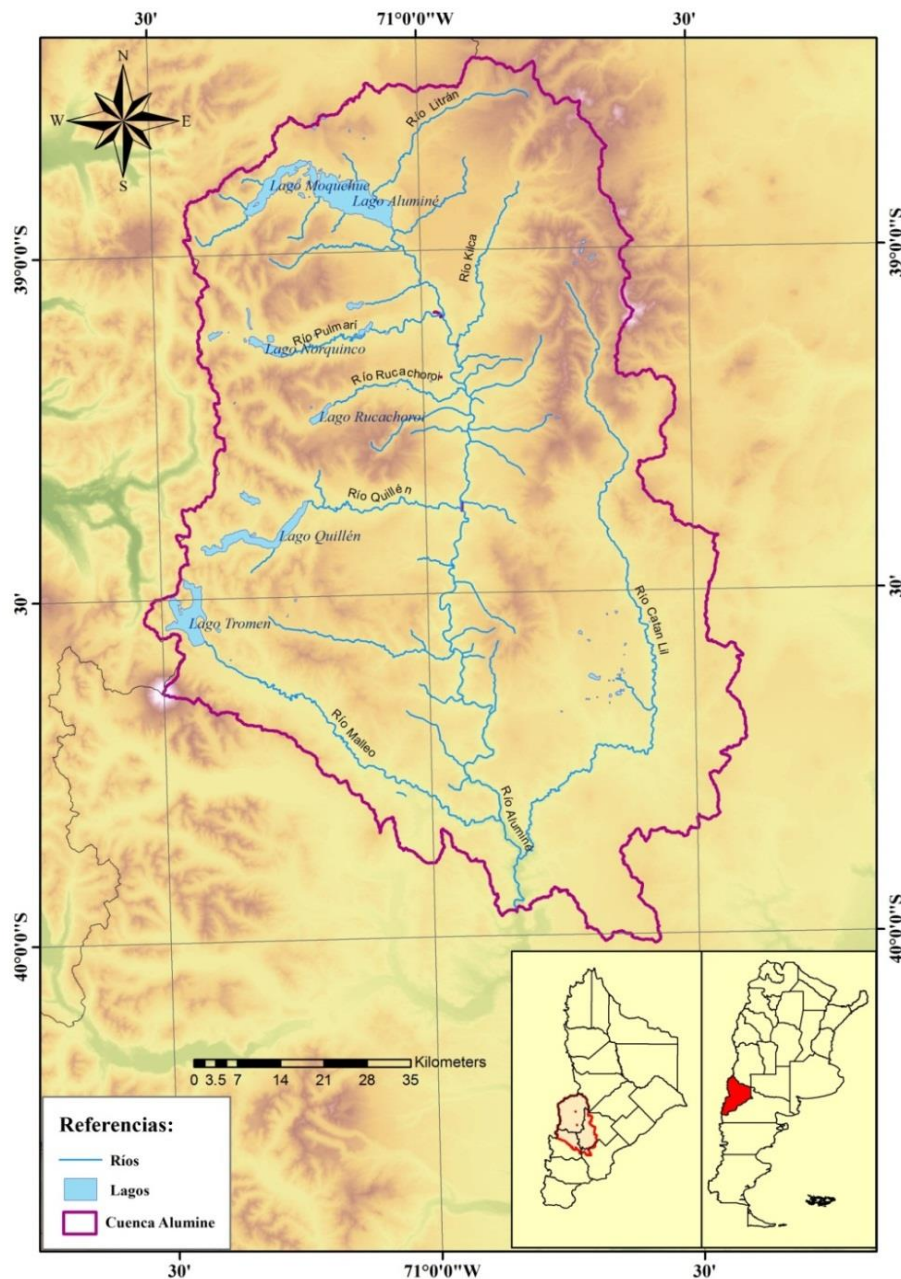


Fig 2-1: Mapa de Ubicación.

El curso principal del río tiene una longitud aproximada de 171 km. Los principales tributarios son el río Pulmarí, Rucachoroi, Quillén, Malleo, Kilka y Catan Lil. Dentro de la cuenca se encuentran numerosos lagos de diferente magnitud, entre los más

importantes podemos nombrar lago Aluminé (58.6km²), lago Moquehue (21.4 km²), lago Ñorquinco (7.1 km²), lago Rucachoroi (4.0 km²), lago Quillén (26.7 km²) y lago Tromen (30.6 km²).

El módulo o caudal medio del río Aluminé en su desembocadura es de aproximadamente 210 m³/seg. La precipitación media anual de la cuenca es de 119 mm. Su escurrimiento responde a un régimen pluvionival. En época invernal, principalmente en el período mayo – agosto, se produce el 60 al 65 % del total de precipitaciones en la cuenca. Por su distribución areal, una parte importante de estas precipitaciones se acumula en la parte alta de la cuenca en forma de nieve. Las precipitaciones pluviales y níveas son retenidas por los lagos, los cuales devuelven los volúmenes de agua embalsados en forma gradual, disminuyendo así la magnitud de las crecidas y aumentando el caudal de los estiajes.

En su hidrograma se observan dos ondas de crecida anual. La primera de ellas ocurre en época invernal (mayo-agosto) y es producida por las precipitaciones que caen en forma de lluvia. La segunda onda de crecida, habitual hacia mediados de la primavera (Octubre – Diciembre), se origina principalmente por la fusión de la nieve acumulada.

Estos datos se pueden observar en la siguiente tabla e hidrograma.

Tabla 2-1: Caudales y Lluvias medias mensuales.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Caudales medios (m ³ /s)	83.2	45.0	36.3	45.9	107.9	300.9	385.2	284.4	328.6	372.7	323.8	180.4	209
Lluvias medias (mm)	41.7	37.4	38.1	67.5	149.7	240.2	168.9	163.4	88.6	81.1	62.3	49.6	1189

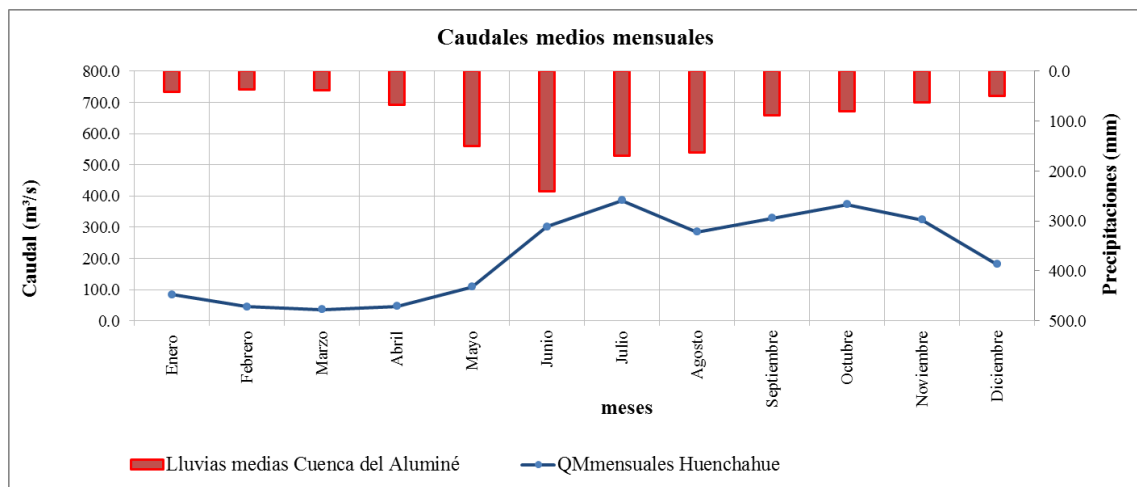


Fig 2-2: Caudales medios mensuales.

2.2. Delimitación de las subcuencas del Aluminé.

Las subcuencas fueron delineadas utilizando las herramientas de ArcGIS, a partir del modelo digital de elevación (DEM) del Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN), cuya resolución espacial es de 45 metros.

Se trazaron las divisorias de agua para las principales corrientes hasta las estaciones limnigráficas existentes (estaciones de aforos), identificando además, los puntos de interés para la generación de caudales.

En total, se obtuvieron 18 subcuencas, las cuales se detallan a continuación.

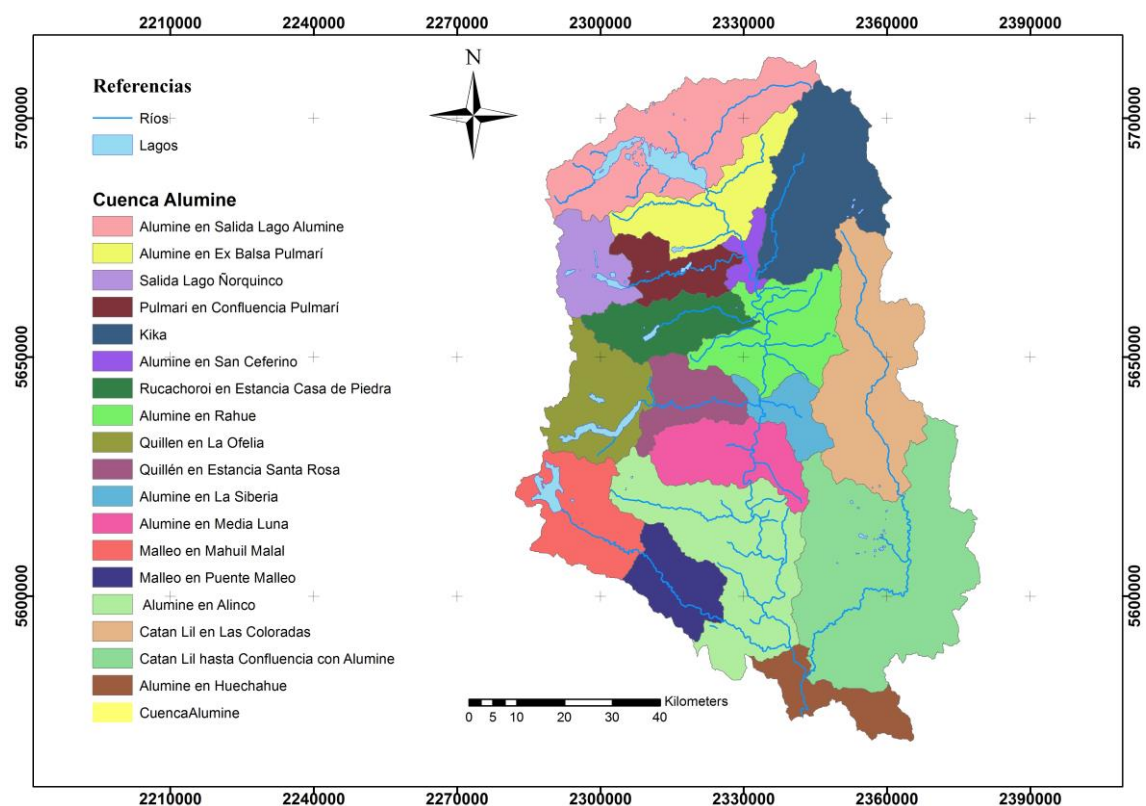


Fig 2-3: Delimitación de Subcuencas.

2.3. Características Físicas de las subcuencas.

Para cada subcuenca identificada anteriormente se determinaron las características físicas: morfología y la cobertura del suelo.

2.3.1. Morfología de las Subcuencas.

Queda definida por los siguientes parámetros:

- **Parámetros de forma:** La forma de una cuenca influye sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación dada. Dentro de los parámetros de forma tenemos: Perímetro y área.
- **Parámetros de Relieve:** La influencia del relieve sobre el hidrograma es aún más evidente dado que la mayor parte de los fenómenos meteorológicos e hidrológicos se presentan en función de la altitud (Ej: acumulación de nieve, escorrentía, etc).

Amplitud de relieve: Diferencia entre la altura máxima menos la altura mínima de la cuenca, que toma el valor de $Amp = h_{max} - h_{min}$

Curva Hipsométrica: Es una curva que indica el porcentaje de superficie de la cuenca que existe por encima de una cota determinada. La construcción de dicha curva se realizó dividiendo la subcuenca en franjas altimétricas de 100 metros, calculando el área en cada una de ellas.

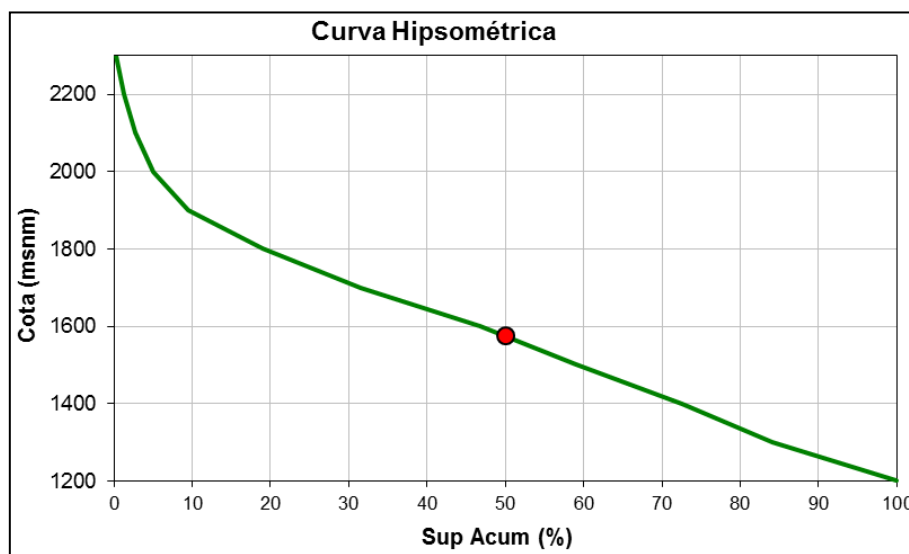


Fig 2-4: Curva hipsométrica de una Subcuenca.

Altura mediana: Es la altura para la cual el 50% de la superficie de la cuenca se encuentra por debajo de la misma.

Tabla 2-2: Características morfológicas de las Subcuencas.

ALUMINE					
Nº	Subcuenca	Area [km ²]	Perimetro [km]	Amplitud [m]	Alt. Mediana [msnm]
1	Aluminé en Salida Lago Aluminé	891.52	233.37	1222	1574
2	Aluminé en Ex Balsa Pulmarí	437.05	178.47	1202	1613
3	Ñorquinco	270.85	109.53	1114	1558
4	Pulmarí en Conf. Pulmarí	239.64	121.50	1201	1377
5	Kilka	728.60	186.75	1612	1760
6	Aluminé en San Ceferino	82.38	87.26	571	1255
7	Rucachoroi en casa de Piedra	327.78	130.59	1320	1644
8	Aluminé en Rahue	502.73	175.00	1554	1442
9	Quillen en La Ofelia	428.72	137.00	1286	1376
10	Quillen en Santa Rosa	262.53	112.16	1337	1351
11	Aluminé en La Siberia	178.55	107.64	1161	1434
12	Aluminé en Media Luna	327.78	138.87	1259	1420
13	Malleo en Mamuil Malal	444.16	140.67	2808	1313
14	Malleo en Puente Malleo	287.68	107.82	1140	1193
15	Aluminé en Alinco	428.72	251.10	1396	1269
16	Catan Lil en Las Coloradas	851.49	238.23	1915	1535
17	Catan Lil en Pto Coifin	1463.66	297.76	1370	1182
18	Aluminé en Huechahue	245.27	148.00	745	1119

2.3.2. Cobertura del suelo.

El modelo IHMS/HBV permite identificar 5 tipos de cobertura de suelos:

- ‘Forest’ caracterizada por la presencia del bosque;
- ‘Field’ caracterizada por la presencia de vegetación arbustiva; (Estepa)
- ‘Glacier’ caracterizada por la presencia de glaciares;
- ‘internal lake’ caracterizada por la presencia de lagos internos a la cuenca;
- ‘outlet lake’ caracterizada por la presencia de lagos ubicados en el punto de cierre de la cuenca.

La división en zonas de vegetación no es muy detallada y esto puede representar un límite del modelo, sobre todo cuando se tienen tipos de vegetación muy diferenciada y difícilmente adaptables a las categorías ‘forest’ y ‘field’. De igual forma en el presente trabajo, la subdivisión efectuada ha sido suficiente y satisfactoria.

Para poder incorporar la información, antes mencionada al modelo IHMS/HBV, se procesó la siguiente base de datos:

A partir del “Shape” de la Subsecretaría del COPADE de la Provincia del Neuquén del año 2002, que contiene la vegetación detallada de toda la provincia; se englobaron dos categorías. Por una parte, con la vegetación de estepa arbustiva, estepa herbácea y suelo desnudo, se creó la capa “Field”; y desde la misma forma con las distintas categorías de bosques, se creó la capa “Forest”. Esta información fue validada por la AIC con

imágenes MODIS 09 (MODIS superficie reflectancia), para lo cual se aplicó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El cálculo de NDVI se hace mediante la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

Es decir, mediante la diferencia entre la reflectancia de las bandas 2 (infrarrojo cercano) y 1 (visible – rojo) dividido por la suma de estas dos bandas de reflectancia.

Para la categoría “Glacier”, se utilizó información de la AIC que se obtuvo de la digitalización de una imagen Spot 7 del 12 de Febrero de 2016. Época en la cual solo queda registro de la masa glaciaria de la región. La superficie cubierta de “glacier” se considera constante en estos últimos 15 años.

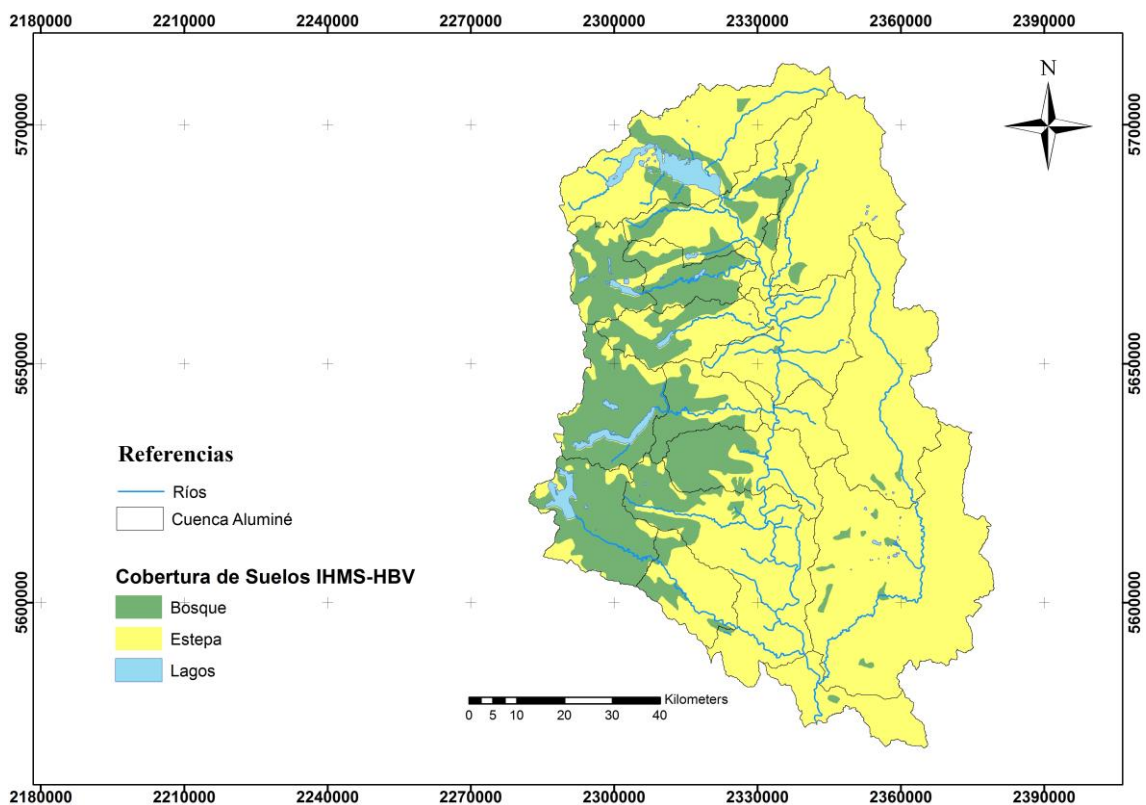


Fig 2-5: Mapa de cobertura de suelos - Clasificación IHMS/HBV.

Para clasificar los lagos internos “Internal Lake” y de cierres de cuencas “Outlet Lake”, se fusionó el “shape” de delimitación de las subcuencas (capítulo 2.2.) y el “shape” de cuerpos de agua del Instituto Geográfico Nacional Argentino (IGN) del año 2013.

3. Datos Hidrometeorológicos.

3.1.Introducción.

Los datos son el elemento clave del modelo. La preparación de un adecuado conjunto de datos de entrada es la base para poder llevar adelante con garantías el proyecto.

Las variables de entrada son: precipitación, temperatura, evaporación y caudal.

En esta modelación se utilizarán datos medidos en las estaciones con influencia en la cuenca analizada, con un paso temporal de 6 horas.

3.2.Recopilación de información.

La AIC cuenta con una importante red de estaciones hidrometeorológicas a lo largo de toda su área de incumbencia. Se tienen estaciones de medición automática y de observadores, de transmisión automática o diferida, y a paso de tiempo diario, 6 horas, 1 hora y 15 minutos. Toda esta información se encuentra disponible en la base de datos DIMS.

En primera instancia se realizó un relevamiento detallado de todas las estaciones hidrometeorológicas de medición y transmisión automática (telemedición) que intervienen en el área de estudio y en zonas aledañas, y en las que se dispusieran series de precipitación, temperatura, caudal y/o evaporación. Para cada una de estas estaciones se determinó su ubicación, altitud, variables medidas, paso de tiempo y el periodo de transmisión.

- **Precipitación:** Se cuentan con 21 estaciones de telemedición que registran datos cada 6 horas, con diferentes periodos de registro de datos.
- **Temperatura:** En este caso se tienen un total de 21. La mayor parte de las estaciones que registran temperatura también registran precipitación.
- **Caudal:** Dentro de la cuenca de estudio hay 18 estaciones de medición de caudales automática, de las cuales 9 tienen transmisión automática y 9 diferidas. Estas últimas serán de gran utilidad para calibrar el modelo en zonas importantes.
- **Evaporación:** No se tiene ninguna estación que registre esta variable.

Tabla 3-1: Listado de Estaciones en Base de Datos AIC.

CUENCA DEL ALUMINE							
Código	Estación	Altura [msnm]	Latitud	Longitud	Precipitación	Temperatura	Caudal
04200.01	Ea. Quemquentreu	716	-40.233333	-70.816667	02/11 - 04/14		
06000.03	Sda Lago Alumine	1156	-38.967722	-71.042139	04/00 - 04/14	05/00 - 04/14	11/82 - 04/14
06000.07	Rahue	865	-39.369944	-70.933056	04/00 - 04/14	05/00 - 04/14	07/83 - 04/14
06000.11	Alinco (La Aida)	689	-39.833333	-70.866667	11/10 - 04/14		10/06 - 04/14
06000.15	Media Luna	798	-39.526306	-70.957306			10/83 - 04/14
06000.19	La Siberia	844	-39.411528	-70.934500			09/78 - 04/14
06000.21	San Ceferino	925	-39.163111	-70.935528			06/84 - 04/14
06000.25	Ex Balsa Pulmari	972	-39.066667	-70.966667			07/83 - 04/14
06000.26	Talhelum	696	-39.783333	-70.833333			09/86 - 04/14
06000.27	Huechahue	668	-39.968000	-70.850833	04/00 - 04/14	05/00 - 04/14	04/98 - 04/14
06100.05	Puente Malleo	767	-39.766667	-71.033333			05/04 - 04/14
06100.06	Ea.Marmul Malal	924	-39.648000	-71.269167	01/00 - 04/14	01/00 - 04/14	01/96 - 04/14
06100.06	Malleo Abajo	754	-39.833333	-70.916667			08/03 - 04/14
06200.03	Santa Rosa	856	-39.370611	-70.963556			07/83 - 04/14
06200.04	La Ofelia	973	-39.371333	-71.189444	04/00 - 04/14	05/00 - 04/14	07/83 - 04/14
06210.07	Añihueraqui	982	-39.427250	-71.421333	04/00 - 04/14	06/00 - 04/14	
06250.02	Nac. A° Malalco	1270	-39.253250	-71.365533	03/00 - 04/14	03/00 - 04/14	
06300.03	Pto Casa de Piedra	847	-39.218639	-70.955667			07/83 - 04/14
06400.02	Sda Lago Ñorquenco	1064	-39.143833	-71.237167		01/00 - 04/14	06/81 - 04/14
06400.03	Conf. Pulmari	972	-39.095778	-70.965500			10/97 - 04/14
06410.01	Lago Ñorquenco	1063	-39.121000	-71.319250	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
06800.04	Batea Mahuida Abajo	1607	-38.831000	-71.204000	02/00 - 04/14	02/00 - 04/14	
06810.01	Cerro Litran	2195	-38.787333	-70.815000		08/11 - 04/14	
06810.03	Litran Abajo	1729	-38.750250	-70.871917	02/00 - 04/14	02/00 - 04/14	
06822.01	Casa Quila 1600	1541	-38.965667	-71.405500	01/00 - 04/14	01/00 - 04/14	
06822.02	Casa Quila 1800	1645	-38.962833	-71.412083	02/00 - 04/14	02/00 - 04/14	
06900.08	Las Coloradas	909	-39.552167	-70.590611	01/00 - 04/14	01/00 - 04/14	01/96 - 04/14
06900.09	Nac. Catan Lil	2131	-39.035000	-70.726250	02/00 - 04/14	02/00 - 04/14	
07000.03	Casa de Lata	852	-39.846667	-71.177833	01/00 - 04/14	01/00 - 04/14	
07100.01	Ea Collunco	879	-39.964667	-71.199000	01/00 - 04/14	01/00 - 04/14	
07200.03	L° Huechulafquen	907	-39.748250	-71.476333	01/00 - 04/14	01/00 - 04/14	
07210.06	Pto Antiao	969	-39.752833	-71.624667	03/00 - 04/14	03/00 - 04/14	
07210.07	Cerro Huicuiña	1586	-39.766000	-71.609333	03/00 - 04/14	03/00 - 04/14	
TOTAL:					21	21	18

3.3. Validación de Datos.

La información disponible debe ser validada como paso previo a su aplicación. Esta validación nos permitirá evaluar la consistencia espacial y temporal de los datos, como así también detectar estaciones con registros erróneos o inconsistentes.

3.3.1. Datos inconsistentes

Se busca detectar valores extremos que estén fuera de rango. Para esto se establecieron límites que se deben cumplir en cada uno de los parámetros. En caso de no cumplir, el dato es clasificado como no válido o sospechoso, y no se utiliza para este proyecto. A continuación se describen dichos límites:

- **Límites rígidos:** Se establecieron los límites más restrictivos desde lo físico e instrumental, para cada uno de los parámetros. Cualquier dato fuera de estos límites es clasificado como no válido.

Tabla 3-2: Rangos por unidad.

CUENCA DEL ALUMINE		
Variable	Unidad	Rango
Temperatura	°C	-35 a +55
Precipitación en 6hs	mm	0 a 150
Variación de caudal en 6hs	m ³ /s	-50 a +200

- **Límites flexibles:** Estos límites se basan en los valores extremos que las distintas variables pueden tomar en la zona donde está ubicada la estación. Además, para adaptarse a las variaciones estacionales, se establecen límites representativos para cada mes. Si el dato no supera este test es calificado como sospechoso y se estudia en detalle.

3.3.2. Homogeneidad – Método de Doble masas

Este método permite detectar heterogeneidad, inconsistencia o la presencia de datos constantes en las mediciones a lo largo del tiempo.

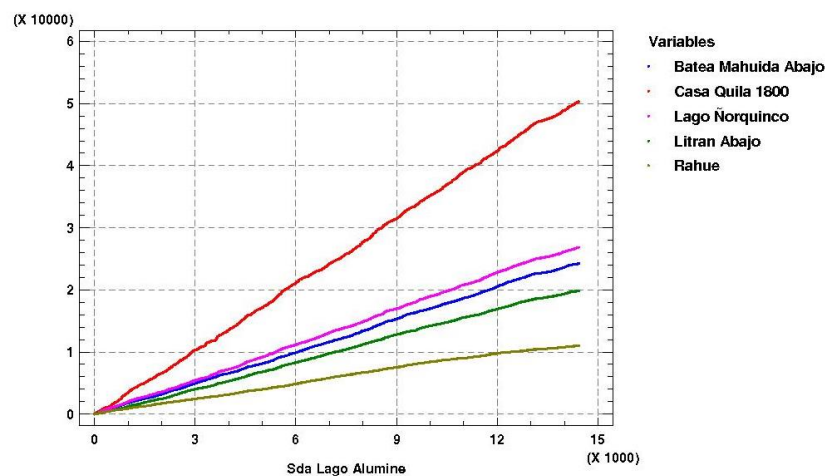


Fig 3-1: Gráfico de homogeneidad de doble acumulación.

Se analizó la consistencia de una serie de valores de algunos de los parámetros medidos en una estación o grupo de estaciones “y”, con base en los datos tomados en otra estación “x”, situada en una zona climática similar. Luego se construyeron diagramas cartesianos, tomando como abscisas los valores acumulados de la serie base (x) y como ordenadas los valores acumulados de las estaciones problema (y), y se observan si se presenta un cambio de pendiente, el cual solo puede deberse a causas diferentes a las meteorológicas. Si todos los puntos aparecen sobre una línea recta, los datos iniciales de la estación problema son válidos sin corrección. En caso de detectarse un cambio de

pendiente, se califica como sospechoso y se estudia en detalle. Luego, es necesario restablecer la homogeneidad bajo las condiciones del tramo más confiable.

3.3.3. Relleno de datos faltantes:

Una vez obtenidas las series de tiempo con datos validados es necesario completar los datos faltantes que tienen dichas series.

Se adoptó el método de Regresión lineal, en el cual se rellena la serie en estudio (Y_i) utilizando los datos de una serie de referencia (X_i) mediante la siguiente ecuación.

$$Y_i = a + b.X_i$$

Donde a y b son constantes de regresión.

Para cada una de las series de estudio se seleccionó 3 estaciones de referencia ordenadas de mayor a menor ajuste. Esto permite obtener un valor de relleno en el caso de que también falte la estación de mayor ajuste.

El criterio de mejor ajuste está en función de los siguientes parámetros estadísticos: el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el sesgo (BIAS) y el coeficiente de correlación R^2 . Dichas medidas de ajuste se calcularon para la serie de datos completa (2000-2015), a fin de medir el ajuste total de la serie.

Cada uno de los parámetros tuvo un análisis particular que se detalla a continuación:

- **Precipitación:** Debido a que los fenómenos de precipitaciones son diferentes en los periodos húmedos (abril-octubre) y secos (noviembre-marzo), se plantean correlaciones diferenciadas para cada uno de ellos. Esto nos permite obtener mejor ajuste en el periodo húmedo, donde el riesgo de crecida por lluvias es más elevado.
- **Temperatura:** Se consideró todo el año hidrológico para hacer las correlaciones. Cabe mencionar que en este caso, es más relevante la similitud en altura que la cercanía geográfica.
- **Caudal:** Se buscó hacer correlaciones entre estaciones ubicadas sobre el mismo cauce de río, teniendo en cuenta el retardo de onda para cada uno de los casos.

3.4. Selección de estaciones.

Con todo el análisis de validación de datos terminado procedemos a seleccionar las estaciones a utilizar en el modelo. Para esto se establecieron los siguientes criterios:

- **Periodo en común:** Se busca el mayor periodo en común en la mayor cantidad de estaciones, que en este caso resultó ser del 1/4/2000 al 31/3/2015. Las estaciones con periodo de registro menor no serán consideradas para el modelo.
- **Cantidad de datos faltantes:** Las estaciones con una gran cantidad de datos faltantes no serán utilizadas en el modelo. A pesar de haber podido completar la serie mediante correlaciones, la calidad de estos datos es menor que la de los datos medidos. Por lo tanto las estaciones con gran cantidad de faltantes son menos confiables.
- **Ubicación de las Estaciones:** Necesitamos abarcar la mayor cantidad del territorio de la cuenca, para poder representar mejor los fenómenos.

En función de estos tres puntos se obtiene el siguiente listado final de estaciones.

Tabla 3-3: Selección de estaciones a utilizar y sus datos hidrometeorológicos.

ESTACIONES - CUENCA ALUMINE - DATOS								
Nº	Código	Estación	Altura [msnm]	Latitud	Longitud	Precipitación	Temperatura	Caudal
1	06000.03	Sda. Lago Aluminé	1156	-38.967722	-71.042139	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	04/04- 04/14
2	06000.07	Rahue	865	-39.369944	-70.933056	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	04/04- 04/14
3	06000.11	Alinco (La Aída)	689	-39.833333	-70.866667			04/04- 04/14
4	06000.15	Media Luna	798	-39.526306	-70.957306			04/04- 04/14
5	06000.19	La Siberia	844	-39.411528	-70.934500			04/04- 04/14
6	06000.21	San Ceferino	925	-39.163111	-70.935528			04/04- 04/14
7	06000.25	Ex Balsa Pulmari	972	-39.066667	-70.966667			04/04- 04/14
8	06000.27	Huechahue	668	-39.968000	-70.850833	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	04/04- 04/14
9	06100.05	Puente Malleo	767	-39.766667	-71.033333			04/04- 04/14
10	06100.06	Ea. Mamuil Malal	924	-39.648000	-71.269167	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	04/04- 04/14
11	06200.03	Santa Rosa	856	-39.370611	-70.963556			04/04- 04/14
12	06200.04	La Ofelia	973	-39.371333	-71.189444	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	04/04- 04/14
13	06210.07	Añihueraqui	982	-39.427250	-71.421333	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
14	06250.02	Nac. A° Malalco	1270	-39.253250	-71.365533	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
15	06300.03	Pto Casa de Piedra	847	-39.218639	-70.955667			04/04- 04/14
16	06400.02	Sda Lago Ñorquinco	1064	-39.143833	-71.237167			04/04- 04/14
17	06400.03	Conf. Pulmari	972	-39.095778	-70.965500			04/04- 04/14
18	06410.01	Lago Ñorquinco	1063	-39.121000	-71.319250	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
19	06800.04	Batea Mahuida Abajo	1607	-38.831000	-71.204000	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
20	06810.03	Litrán Abajo	1729	-38.750250	-70.871917	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
21	06822.02	Casa Quila 1800	1645	-38.962833	-71.412083	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
22	06900.08	Las Coloradas	909	-39.552167	-70.590611	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	04/04- 04/14
23	06900.09	Nac. Catan Lil	2131	-39.035000	-70.726250	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
24	07000.03	Casa de Lata	852	-39.846667	-71.177833	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
25	07100.01	Ea Collunco	879	-39.964667	-71.199000	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
26	07200.03	L° Huechulafquen	907	-39.748250	-71.476333	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
27	07210.06	Pto Antiao	969	-39.752833	-71.624667	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
28	07210.07	Cerro Huicuifa	1586	-39.766000	-71.609333	04/00 - 04/14	04/00 - 04/14	
					TOTAL:	18	18	16

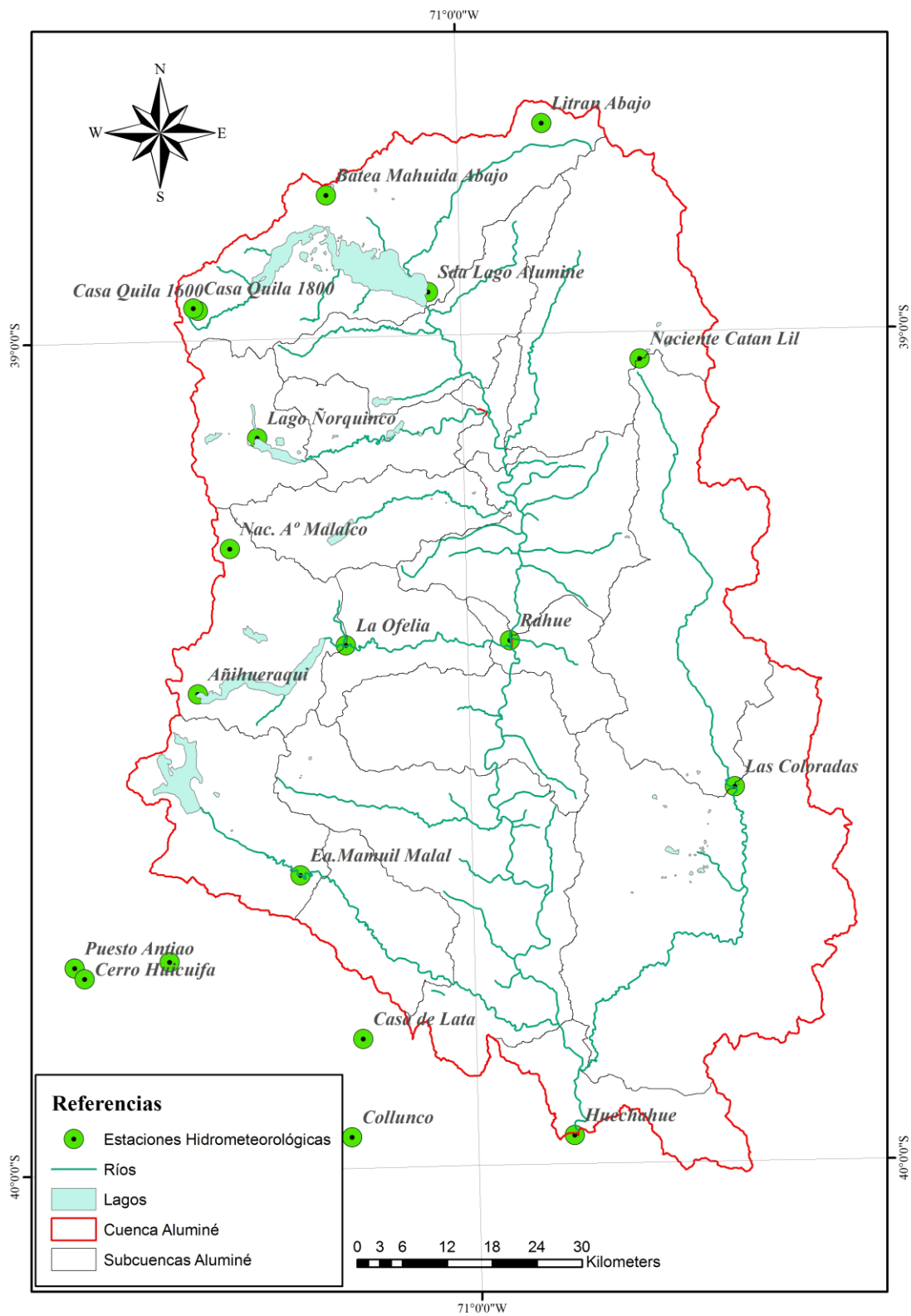


Fig 3-2: Estaciones Hidrometeorológicas seleccionas para el modelo.

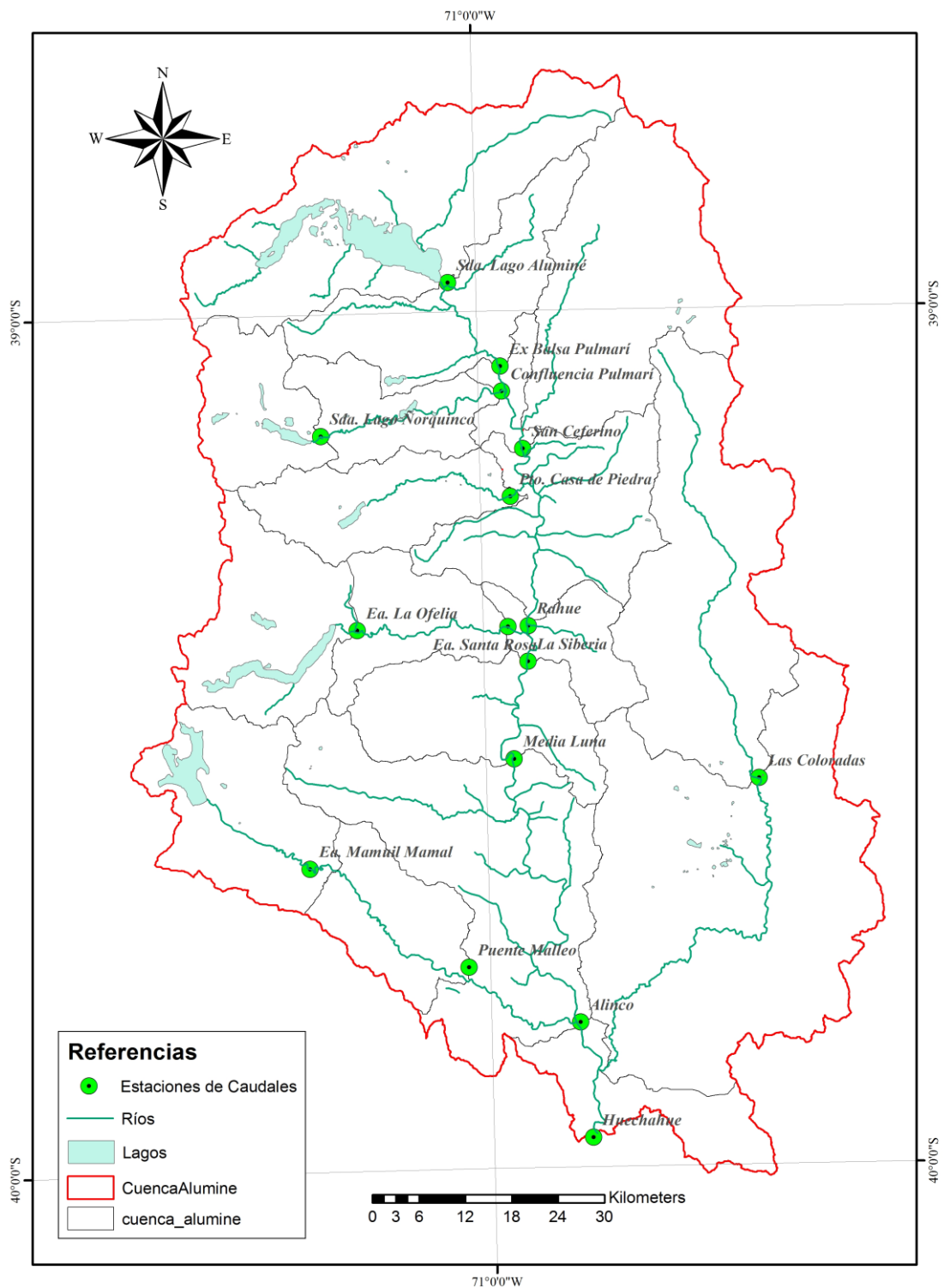


Fig 3-3: Estaciones de Aforos seleccionadas para el modelo.

4. Modelación Hidrológica – Modelo IHMS/HBV.

4.1.Introducción.

El IHMS/HBV fue originalmente desarrollado por el Instituto Hidrológico y Meteorológico Sueco (IHMS) a inicios de los años 70 para asistir en las operaciones de producción hidroeléctrica. Este es un modelo conceptual para el cálculo continuo de caudales.

Es un modelo semidistribuido; dentro de su estructura la unidad hidrológica básica es la subcuenca, que está acompañada por una caracterización de área y elevaciones, y por una clasificación de uso de suelo muy poco detallada. Como se mencionó en capítulos anteriores, en nuestro caso se utilizarán franjas de elevación cada 100m de altitud en las 18 subcuencas de estudio.

El modelo se compone de diferentes rutinas y simula la descarga, en este caso a intervalo de tiempo de 6 horas, basado en series de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial.

La acumulación de nieve y la rutina de deshielo se calculan por el método del Grado-día. En el suelo, la recarga de agua subterránea y la evapotranspiración real se simula con funciones de almacenamiento de agua, y la escorrentía se calcula en función de este almacenamiento. Por último, utiliza la función de ponderación triangular para simular el aporte de salida de la cuenca. Las principales ecuaciones del modelo HBV se detallan a lo largo del presente capítulo.

Este modelo, además de diferenciar el caudal que proviene de lluvia directa o de del deshielo de la nieve, permite diferenciar de la aportación total, que parte proviene del flujo superficial, y del subterráneo.

La implementación del modelo IHMS/HBV (versión 4.5) en la AIC fue en el año 1996 con el objetivo de optimizar la operación de los embalses de la región del Comahue.

Actualmente se aplica el modelo IHMS/HBV como herramienta de apoyo con los siguientes propósitos:

- Operación de embalses: Permite realizar pronóstico a corto, mediano y largo plazo, de caudales diarios entrantes a los embalses de Alicurá, Piedra del Águila

y Barreales. El modelo utiliza información en tiempo real de las estaciones automáticas de la red de monitoreo y de estaciones complementarias.

- Control de la calidad de información de precipitación y caudal: El módulo de análisis estadístico y gráfico permite detectar inconsistencias de datos rápidamente.

Se hará una breve descripción de los procesos teóricos que utiliza el modelo HBV, sus variables, y las metodologías usadas para el cálculo de las mismas.

4.2.Ecuación de continuidad o balance hidrológico.

El balance hidrológico relaciona las variables que intervienen en el ciclo hidrológico: precipitación, evaporación, escurrimiento superficial, almacenamiento superficial y subterráneo y flujo de agua subterránea.

A la hora de establecer el balance se examinan las entradas y salidas en el sistema analizado, es decir, se aplica la ecuación de continuidad sobre el volumen de control delimitado por una superficie de referencia (cuenca) a través de la cual el agua se mueve desde la parte interna a la externa y viceversa. Así, el balance se reduce a la cantidad de agua que queda almacenada:

$$\textit{Entrada} - \textit{Salida} = \textit{Variación del almacenamiento}$$

El modelo IHMS/HBV describe el balance hídrico general como sigue:

$$P - (E + Q) = \frac{d}{dt} [SP + SM + UZ + LZ + \textit{lakes}]$$

Dónde:

- P: Precipitación (Entrada).
- E: Evapotranspiración (Salida).
- Q: Caudal (Salida).
- SP: Paquete de Nieve (Almacenamiento).
- SM: Humedad del suelo (Almacenamiento).
- UZ: Agua en zona subterránea superior (Almacenamiento).
- LZ: Agua en zona subterránea inferior (Almacenamiento).
- Lakes: Volumen de los lagos (Almacenamiento).

4.3. Datos de entradas al modelo.

4.3.1. Precipitación.

Se utilizaron los datos de precipitación de 18 estaciones, con paso temporal de 6 horas (0:00; 6:00; 12:00; 18:00), desde 1/4/2000 hasta 31/3/2015 (15 años).

El primer paso del modelo es calcular la precipitación media areal (P_{md}) para cada subcuenca a partir de los datos puntuales de cada estación. Esto se obtiene como la media ponderada de las estaciones de precipitación con influencia en dicha subcuenca.

$$P_{md} = \sum c_i * P_i$$

Dónde:

- P_{md} : Precipitación media areal de la subcuenca (mm).
- P_i : Precipitación en la estación i (mm).
- C_i : Peso de la estación i

Asociada a esta precipitación media areal, el modelo calcula un valor de altura (h_{md}) con los mismos pesos de las estaciones (C_i) y su correspondiente valor altimétrico (h_i).

$$h_{md} = \sum c_i * h_i$$

Dónde:

- h_{md} : Altura ponderada (m).
- h_i : valor altimétrico de la estación i (msnm).
- C_i : Peso de la estación i

Como puede observarse, el valor de h_{md} depende de las alturas de las estaciones y se toma como punto inicial para el cálculo. No necesariamente corresponde a la altura media de la cuenca. Esto es importante, ya que se debe adoptar un valor de h_{md} que sea posible calcular con las estaciones que influyen en la cuenca

La precipitación media en cada una de las franjas en las que se divide la subcuenca (100m) se obtiene aplicando un gradiente altitudinal (P_{CALT}).

$$P_{md Fi} = P_{md} * (1 + h * P_{calt})$$

$$h = h_{Fi} - h_{md}$$

Dónde:

- $P_{md\ Fi}$: Precipitación media de la franja i (mm).
- P_{calt} : gradiente altimétrico de precipitación (mm/m).
- h_{Fi} : valor altimétrico de la franja i (msnm).

Por último se obtiene la precipitación media corregida de la subcuenca como:

$$P_{md\ cor} = \frac{\sum P_{md\ Fi} * A_{Fi}}{A_{Subcuenca}}$$

Dónde:

- $P_{md\ cor}$: Precipitación corregida por elevación.
- A_{Fi} : Área de la franja i (km²).
- $A_{Subcuenca}$: Área de la subcuenca (km²).

Es de suma importancia poder determinar los coeficientes C_i y P_{CALT} que mejor representen la realidad, ya que son el punto de partida para el modelo. Si las precipitaciones medias no están bien calculadas será muy difícil calibrar el modelo.

El manual de aplicación del IHMS/HBV propone calcular las precipitaciones medias y los pesos C_i utilizando la metodología de Polígonos de Thiessen y ajustarlos manualmente hasta obtener resultados aceptables. La ventaja de este método es que es fácil de entender, pero no tiene en cuenta la orografía y necesita que los valores de C_i sean calibrados.

Dado la importancia que tiene la cordillera de los Andes en el comportamiento del fenómeno, y la posibilidad del uso de herramientas SIG, se diseñó una metodología para el cálculo de C_i y P_{calt} más representativa para el área de estudio. A continuación se listan las actividades que componen esta metodología:

- A. Cálculo de las precipitaciones medias de las subcuencas.
- B. Estimación del gradiente altitudinal P_{calt} .
- C. Cálculo de la precipitación media areal P_{md} .
- D. Cálculo de los pesos c_i de las estaciones.

A- Cálculo de las precipitaciones medias de las subcuencas.

El manual de aplicación del IHMS/HBV propone calcular las precipitaciones medias y los pesos C_i utilizando la metodología de Polígonos de Thiessen. En nuestro caso esto no es posible ya que esta metodología no es representativa en zonas de montaña.

Se adoptó la técnica de interpolación de Kriging, que se basa en el análisis de la estructura geoestadística de la variación de los datos. Es decir, se apoya en el conocimiento del comportamiento de la variable en el espacio. Para esto se utilizó el software ArcGIS (Ver anexo 9.1).

Se utilizaron estaciones de precipitaciones pertenecientes a la cuenca y sus alrededores, con su correspondiente ubicación geográfica y altitud (x,y,z).

Para el estudio del fenómeno de precipitaciones dentro de la cuenca se seleccionaron eventos de tormenta en el periodo 1997-2015. La búsqueda de estos eventos se hizo en función del caudal del río Aluminé en la estación Huechahue. Es decir que se buscaron los máximos caudales en el periodo mencionado, y el evento de precipitación que generó dicho caudal.

Como criterio se estableció que el inicio del evento se produce cuando la estación de Añihueraqui comienza a medir, y el final cuando la estación de Naciente del Catan Lil deja de medir. Esto se debe a que la estación de Añihueraqui se encuentra en la parte baja de la cordillera de Los Andes, en la cuenca del lago Quillen, por donde ingresan los frentes de precipitaciones del oeste. Por el contrario, la estación de Naciente del Catan Lil se encuentra al este de la cuenca, lo cual nos da indicios que el frente de precipitación ya pasó sobre el área de estudio.

Una vez seleccionados los 18 eventos de estudio, se calculó las precipitaciones acumuladas en las estaciones.

Tabla 4-1: Selección de eventos de lluvias.

	Inicio Tormenta	Final Tormenta	Duración Evento	Lluvia Acum Aluminé	Día de max QMD Collón Cura	QMD río Collón Cura	Día de máx Q6hs Huechahue	Q6hs río Alumine - Huechahue	QMD río Alumine - Huechahue	Relacion QMD Huechahue vs QMD CC
Evento 1	19/05/01	14/06/01	26	490	08/06/01	3302	08/06/01 00:00	2510	1956	59%
Evento 2	29/06/01	21/07/01	22	385	08/07/01	1951	08/07/01 06:00	1277	1141	58%
Evento 3	29/09/02	13/10/02	14	296	14/10/02	4171	13/10/02 12:00	2724	2547	61%
Evento 4	09/06/03	27/06/03	18	375	22/06/03	2532	22/06/03 18:00	1933	1522	60%
Evento 5	13/06/04	04/07/04	21	299	02/07/04	2902	02/07/04 06:00	2055	1746	60%
Evento 6	23/06/05	03/07/05	10	200	03/07/05	1773	03/07/05 00:00	1190	1101	62%
Evento 7	06/07/06	26/07/06	20	292	11/07/06	2570	11/07/06 18:00	2403	1928	75%
Evento 8	24/08/08	02/09/08	9	248	01/09/08	2174	01/09/08 18:00	1533	1323	61%
Evento 9	15/05/09	25/05/09	10	172	25/05/09	1814	25/05/09 00:00	1092	1024	56%
Evento 10	09/08/09	29/08/09	20	176	30/08/09	1738	30/08/09 06:00	1117	1037	60%
Evento 11	21/10/09	01/11/09	11	172	01/11/09	1808	01/11/09 12:00	1374	1292	71%
Evento 12	10/06/10	24/06/10	14	221	24/06/10	698	23/06/10 18:00	664	434	62%
Evento 13	16/08/10	29/08/10	13	157	28/08/10	603	28/08/10 18:00	346	346	57%
Evento 14	23/08/97	26/08/97	3	70	26/08/97	2648	26/08/97 18:00	1941	1691	64%
Evento 15	11/06/99	29/06/99	18	269	21/06/99	774	21/06/99 18:00	510	468	61%
Evento 16	04/08/99	13/08/99	9	56	10/08/99	1146	10/08/99 18:00	664	576	50%
Evento 17	31/05/00	05/06/00	5	113	04/06/00	1033	04/06/00 18:00	708	659	64%
Evento 18	19/06/00	07/07/00	18	299	06/07/00	1844	06/07/00 12:00	1168	1072	58%
								Promedio		61%

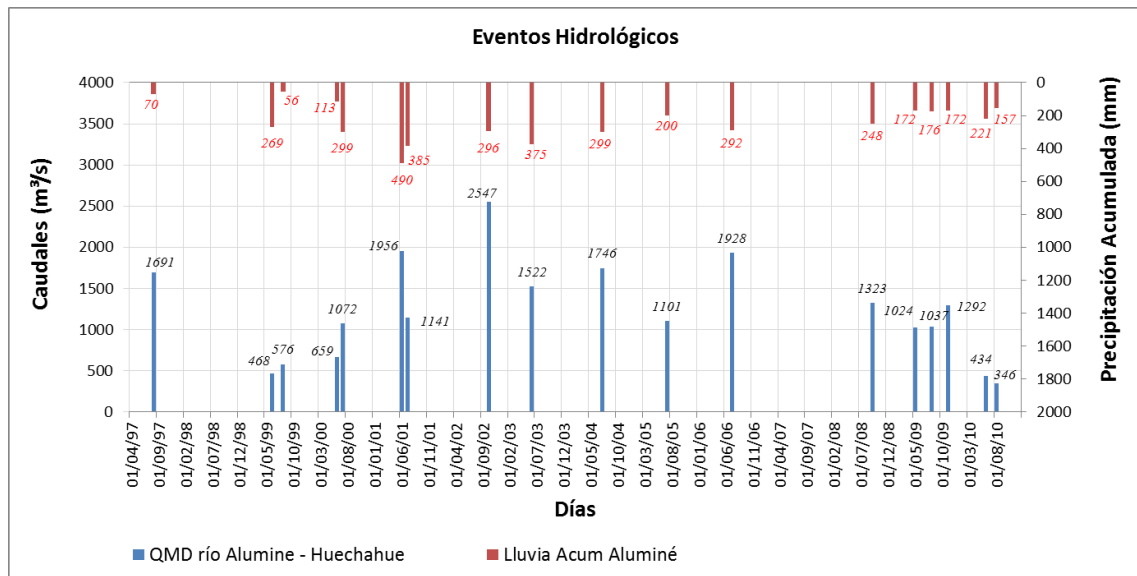


Fig 4-1: Eventos hidrológicos

Luego, para cada evento, se calculó la distribución areal de la precipitación en toda la cuenca y la precipitación media en las subcuencas.

Considerando que el método de interpolación seleccionado es el de mejor ajuste, se define las precipitaciones calculadas como P_{real} . Por lo tanto, esta tiene que ser igual a la precipitación media corregida por elevación que calcula el modelo HBV. Es decir:

$$P_{real} = P_{md\ cor}$$

Dónde:

- P_{real} : Precipitación media de la subcuenca calculada por el método de kriging.
- $P_{md\ cor}$: Precipitación media corregida por elevación, obtenida en el modelo HBV.

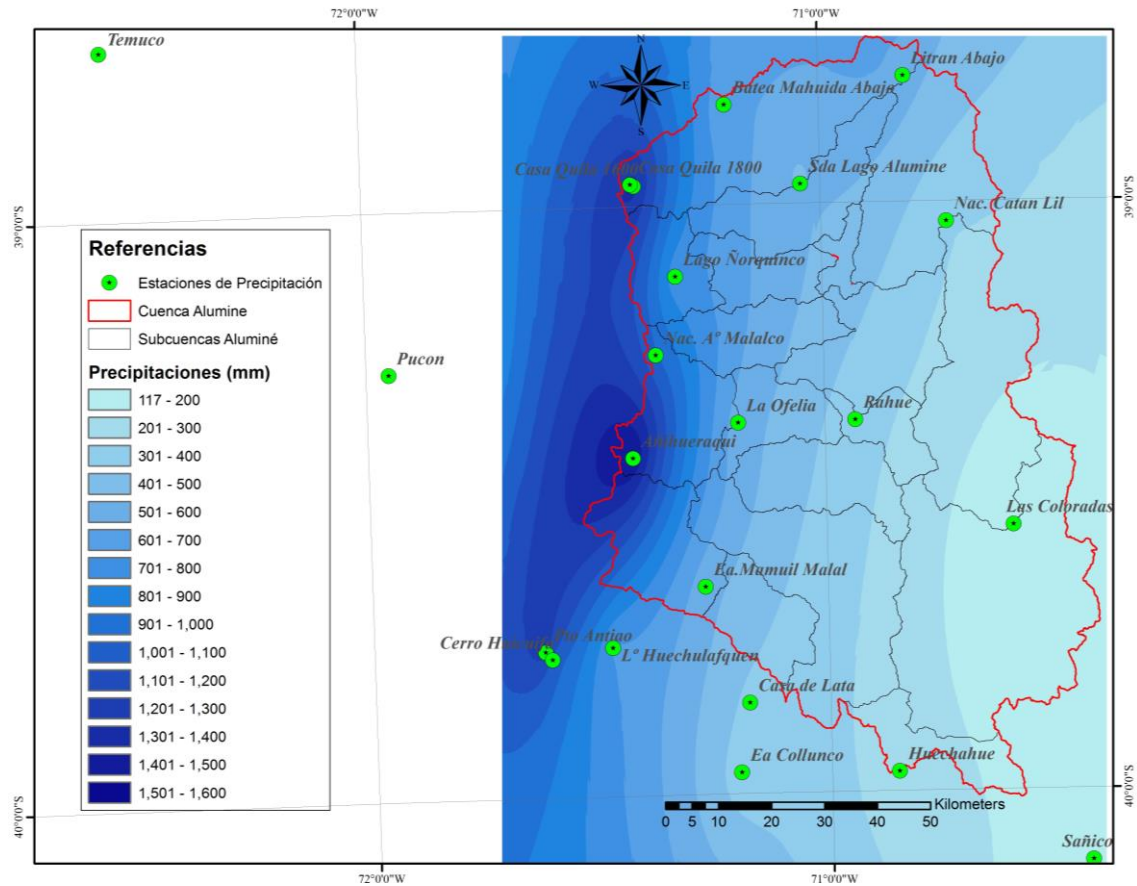


Fig 4-2: Mapa de distribución de precipitaciones de un Evento.

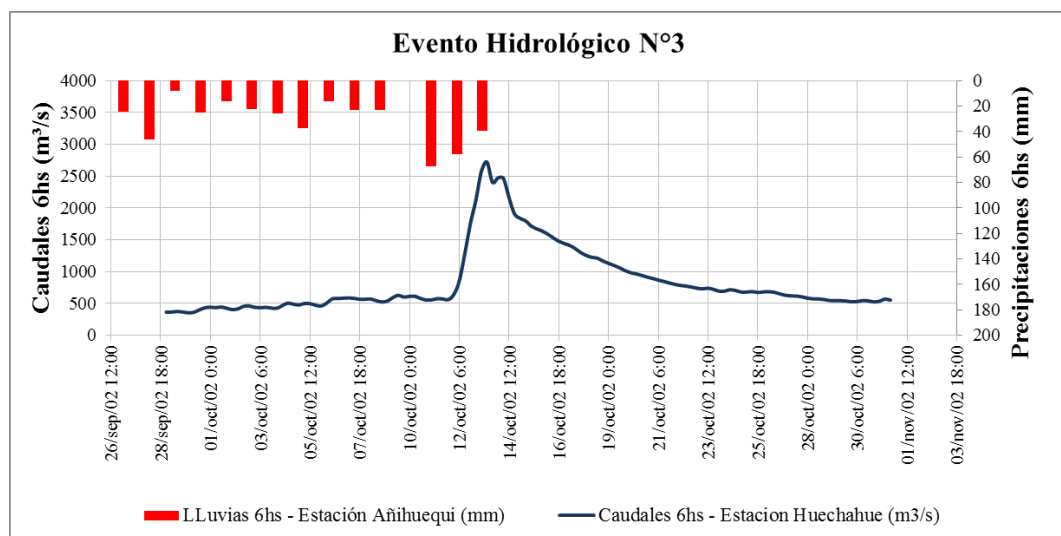


Fig 4-3: Hidrograma del Evento N°3.

B- Estimación del gradiente altitudinal P_{calt} .

Haciendo uso de las herramientas ArcGIS, se calcula la precipitación media por franja de altura (100m) para cada evento de lluvia.

Como puede observarse en la siguiente figura, la distribución de las precipitaciones en función de la altura puede ajustarse mediante una ecuación lineal de la forma:

$$P_{Fi} = a * h_{Fi} + b$$

Dónde:

- P_{Fi} : Precipitación media de la franja i (mm).
- h_{Fi} : valor altimétrico de la franja i (msnm).

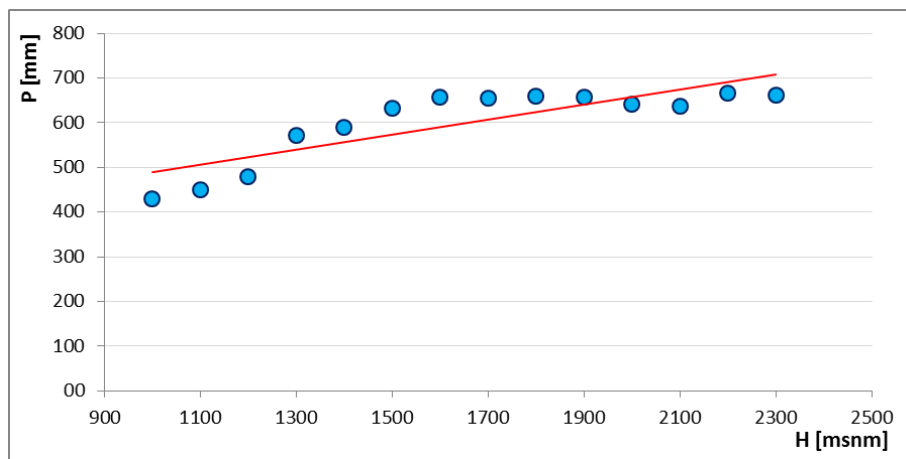


Fig 4-4: Distribución de lluvias con relación a la altura.

Sabiendo además que:

$$P_{md Fi} = P_{md} * (1 + h * P_{calt})$$

$$h = h_{Fi} - h_{md}$$

Se tiene que:

$$P_{calt} = \frac{a}{(b + a * h_{md})}$$

Nota: El desarrollo matemático puede verse en el anexo 9.2.

Como puede verse, el coeficiente P_{calt} está en función del valor de h_{md} adoptado. Por lo tanto es necesario fijar un valor de h_{md} .

Se determinó un valor P_{calt} para cada evento y se adoptó el valor promedio para utilizar en el modelo IHMS/HBV.

Tabla 4-2: Valores de P_{calt} para cada subcuenca.

CUENCA	P_{calt}	Hmd
ALU/LAGO	-0.036	1535
ALU/EXBAL	0.039	1300
ÑORQUINCO	-0.004	1250
PUL/CONF	0.034	1050
KILKA	-0.021	1800
ALU/CEF	0.001	1170
RUCA/PIED	0.040	1100
ALU/RAHUE	-0.016	1230
QUI/OFEL	-0.024	1050
QUI/SROSA	0.012	930
ALU/SIB	-0.018	880
ALU/MLUNA	-0.009	900
MAL/MAMUIL	0.008	960
MAL/PTE	0.040	835
ALU/ALINCO	0.095	860
CATAN/COL	0.022	1220
CATAN/COIF	0.046	945
ALU/HUE	-0.049	800

C- Cálculo de la precipitación media areal (P_{md}).

Con los valores de P_{mdcor} y P_{calt} , obtenidos en los puntos anteriores, y el valor de h_{md} fijado para la subcuenca, se puede determinar P_{md} en todos los eventos de precipitaciones seleccionados:

$$P_{real} = P_{mdcor} = \frac{\sum P_{md Fi} * A_{Fi}}{A_{Subcuenca}}$$

$$P_{real} = P_{mdcor} = \frac{P_{md}}{A_{Subc}} * \sum [1 + (h_{fi} - h_{md}) * P_{calt}] * A_{fi}$$

$$P_{md} = \frac{P_{real} * A_{Subc}}{\sum [1 + (h_{fi} - h_{md}) * P_{calt}] * A_{fi}}$$

D- Cálculo de los pesos C_i de las estaciones.

Por último, solo queda determinar los pesos (C_i) que se le asignarán a las estaciones seleccionadas. Estos coeficientes deben cumplir las siguientes condiciones:

$$(1) \quad 1 = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

$$(2) \quad H_{md} = \sum c_i * H_i = C_1 * H_1 + C_2 * H_2 + C_3 * H_3 + C_4 * H_4$$

$$(3) \quad P_{md} = \sum c_i * P_i = C_1 * P_1 + C_2 * P_2 + C_3 * P_3 + C_4 * P_4$$

Se adopta como criterio tomar 4 estaciones por subcuenca para explicar los fenómenos. Dichas estaciones se seleccionan por cercanía geográfica a la subcuenca de estudio.

Se busca la combinación de pesos (c_i) que cumplan con las condiciones (1) y (2), y que mejor representen los 18 eventos de precipitaciones de la condición (3).

El criterio de mejor ajuste está en función de los siguientes parámetros estadísticos: el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el sesgo (BIAS) y el coeficiente de correlación R. Dichas medidas de ajuste se calcularon comparando los valores P_{md} calculados en el paso anterior y los calculados con los pesos C_i .

El proceso es iterativo, y en cada paso, el variar la altura h_{md} modifica los valores de P_{calt} , P_{md} y C_i . El objetivo consiste en buscar un valor de h_{md} que permita obtener valores de C_i que representen los eventos seleccionados con el mejor ajuste.

La consistencia en los datos y la determinación de los coeficientes C_i y P_{calt} , proporcionan una alta confiabilidad de la variable de entrada al modelo (precipitación). Por ello, los coeficientes no serán modificados en la etapa de calibración.

4.3.2. Temperatura.

Serie de temperatura media del aire, con paso temporal de 6 horas (0:00; 6:00; 12:00; 18:00).

El modelo utiliza la temperatura media areal (T_{media}) para cada subcuenca, que se calcula como la media ponderada de las temperaturas medias de las estaciones, con influencia en la subcuenca.

$$T_{media} = \sum c_i * T_i$$

Dónde:

- T_{media} : Temperatura media areal (°C).
- T_i : Temperatura media en la estación i (°C).
- C_i : Peso de la estación i

Asociada a esta temperatura media areal, el modelo calcula un valor de altura (h_{md}) con los mismos pesos de las estaciones (C_i) y su correspondiente valor altimétrico (h_i).

$$h_{md} = \sum c_i * h_i$$

Dónde:

- h_{md} : Altura media (m).
- h_i : valor altimétrico de la estación i (msnm).
- C_i : Peso de la estación i

El valor de h_{md} depende de las alturas de las estaciones. No necesariamente corresponde a la altura media de la cuenca. Esto es importante, ya que se debe adoptar un valor de h_{md} que sea posible calcular con las estaciones que influyen en la cuenca.

Como ya se mencionó, cada subcuenca se divide en franjas de elevación cada 100 metros. En cada franja, la temperatura media se corregirá con un gradiente altitudinal (T_{calt}). Según la bibliografía varía entre -0.4 y -0.6 °C cada 100 metros.

$$T_{media\ Fi} = T_{media} + (h * T_{calt})$$
$$h = h_{Fi} - h_{md}$$

Dónde:

- $T_{media\ Fi}$: Temperatura media de la franja i (°C).
- T_{media} : Temperatura media de la cuenca (°C).
- T_{calt} : gradiente altimétrico de temperatura (°C/m).
- h_{Fi} : valor altimétrico de la franja i (msnm).
- h_{md} : Altura media (msnm).

Por último se obtiene la temperatura media corregida de la subcuenca como:

$$T_{md\ cor} = \frac{\sum T_{md\ Fi} * A_{Fi}}{A_{Subcuenca}}$$

Dónde:

- $T_{md\ cor}$: Temperatura corregida por elevación.
- A_{Fi} : Área de la franja i (km²).
- $A_{Subcuenca}$: Área de la subcuenca (km²).

Como se dijo para el caso de las precipitaciones, es muy importante poder determinar los coeficientes C_i y T_{calt} que mejor representen la realidad, ya que son el punto de partida para el modelo. Cabe aclarar que las estaciones y las ponderaciones no necesariamente son iguales para precipitación y temperatura dentro de la misma subcuenca, ya que son cálculos similares pero independientes.

Para el cálculo de las temperaturas medias, los pesos C_i y el gradiente T_{calt} se diseñó una metodología similar a la anterior. A continuación se listan las actividades que componen esta metodología:

- Cálculo de las temperaturas medias de las subcuencas.
- Estimación del gradiente altitudinal T_{calt} .
- Cálculo de la temperatura media areal T_{md} .
- Cálculo de los pesos c_i de las estaciones.

Esta secuencia de metodologías se aplica a todas las subcuencas analizadas.

A- Cálculo de las temperaturas medias de las subcuencas.

Se utilizó el método propuesto por Pons (1996) y Ninyerola (2000), que se basa en la técnica de regresión lineal múltiple para la interpolación espacial de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas. Los mapas resultantes son corregidos utilizando los residuales, producto de la regresión lineal múltiple (Ver anexo 9.3).

Se utilizaron estaciones de temperatura dentro de la cuenca y sus alrededores, con su correspondiente ubicación geográfica y altitud (x,y,z).

El análisis de temperatura se puede dividir en dos fenómenos:

1- Acumulación nival: La acumulación de nieve se produce en los meses fríos (marzo – agosto) producto de la precipitación con bajas temperaturas. En este periodo es importante analizar el comportamiento de las temperaturas en los eventos de precipitaciones.

2- Fusión nival: La fusión de nieve se produce en los meses cálidos (septiembre – febrero) producto de las altas temperaturas. A diferencia del anterior, para analizar este fenómeno se estudiaron las temperaturas medias mensuales de los meses cálidos.

En total se consideraron 15 eventos de precipitaciones para la acumulación y 6 meses para la fusión. Para cada uno de ellos, se calculó la distribución areal de la temperatura media en la cuenca con el método mencionado.

Temperaturas promedio en un evento de lluvia.

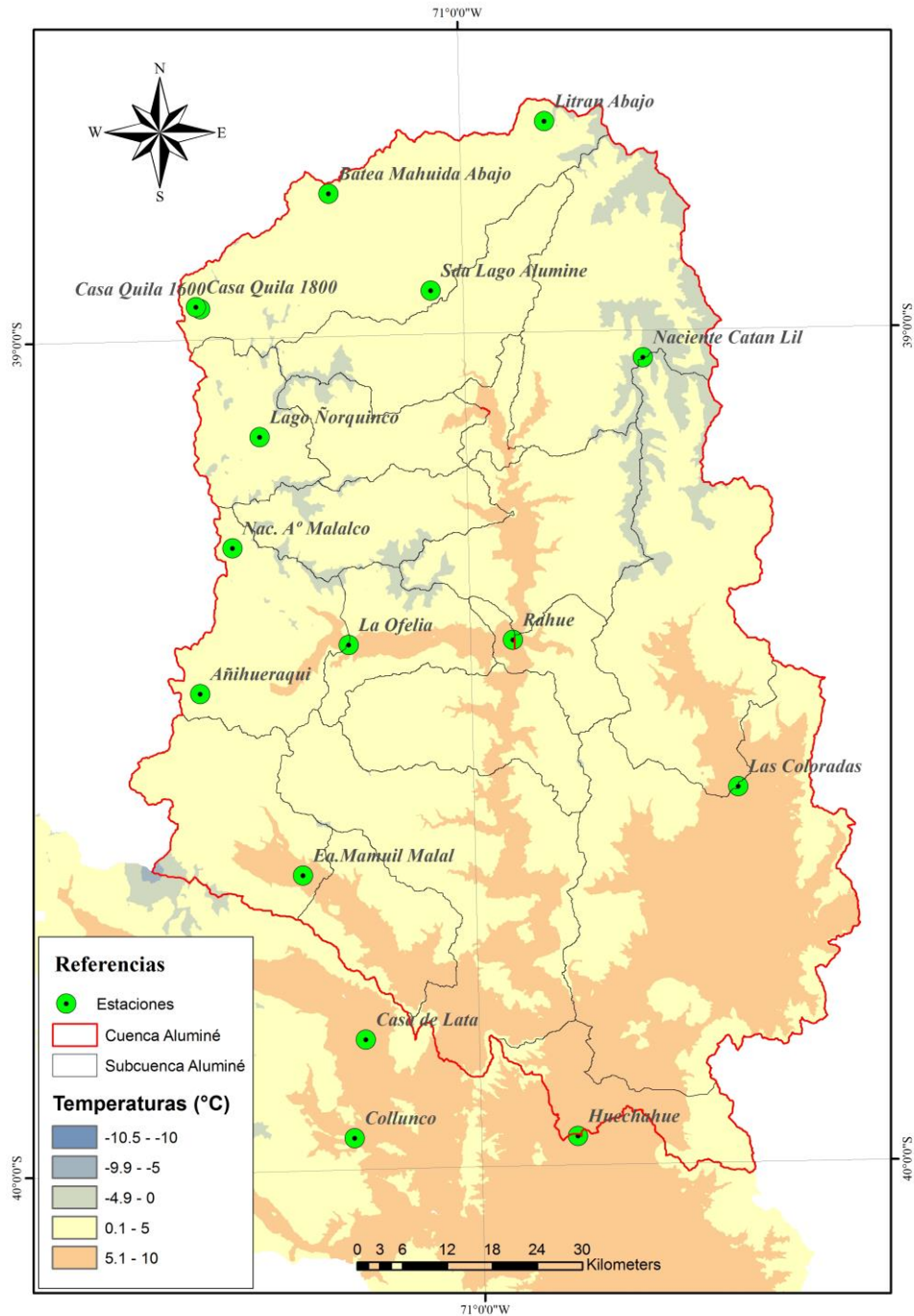


Fig 4-5: Temperaturas en relación a la altura para un evento húmedo.

Temperaturas promedio de un mes de verano

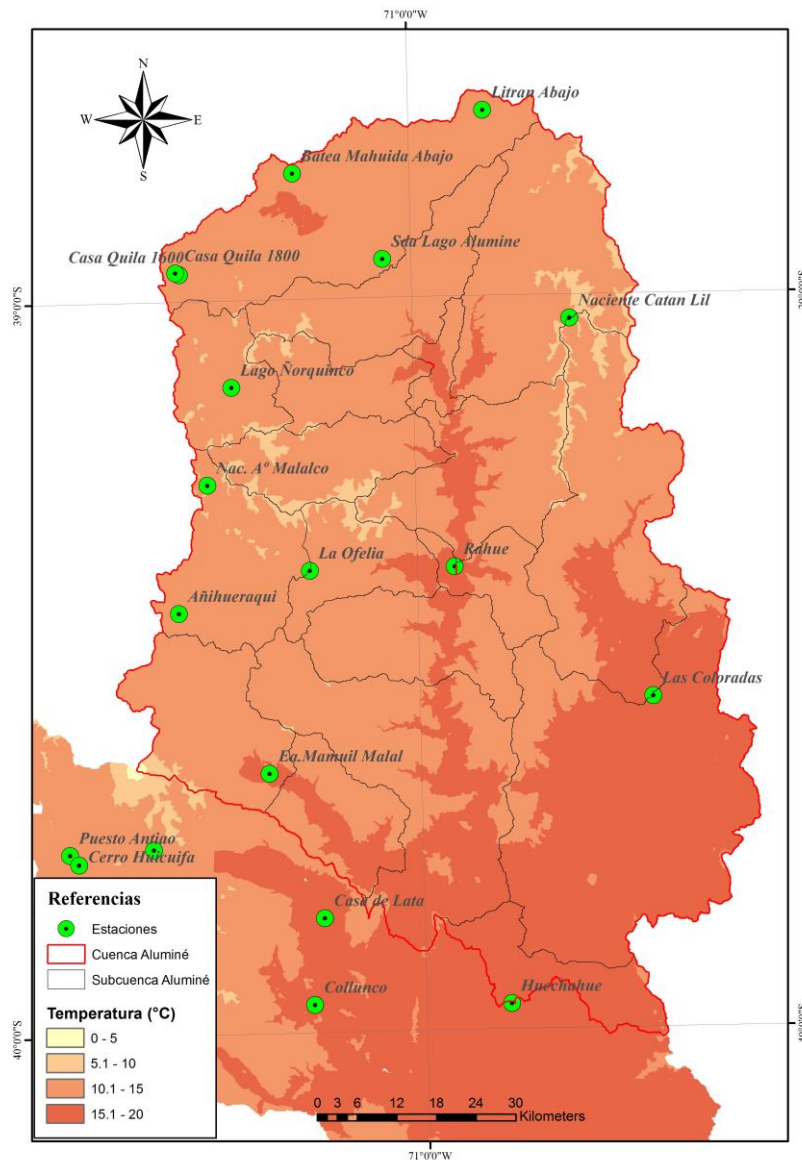


Fig 4-6: Temperaturas en relación a la altura para un periodo seco - mes de Enero.

Considerando que el método de interpolación seleccionado es el de mejor ajuste, se define las temperaturas calculadas como T_{real} . Por lo tanto, esta tiene que ser igual a la temperatura media corregida por elevación que calcula el modelo HBV. Es decir:

$$T_{real} = T_{mdcor}$$

Dónde:

- T_{real} : Temperatura media de la subcuenca calculada por el método de regresión lineal múltiple.
- T_{mdcor} : Temperatura media corregida por elevación, del modelo HBV.

B- Estimación del gradiente altitudinal T_{calt} .

Haciendo uso de las herramientas ArcGIS, se calcula la temperatura media por franja de altura (100m) para cada evento de temperatura.

Como puede observarse en la siguiente figura, la distribución de las temperaturas en función de la altura puede ajustarse mediante una ecuación lineal de la forma:

$$T_{Fi} = a * h_{Fi} + b \quad (1)$$

Dónde:

- T_{Fi} : Temperatura media de la franja i (°C).
- h_{Fi} : valor altimétrico de la franja i (msnm).

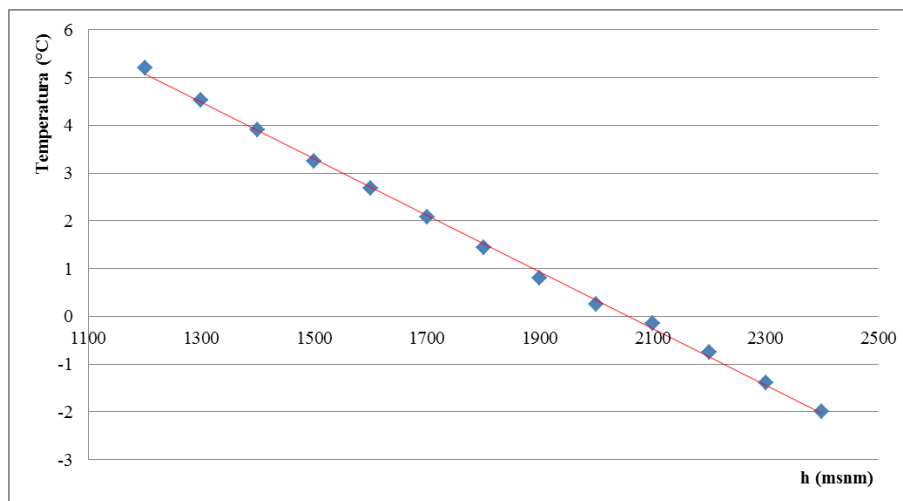


Fig 4-7: Distribución de temperatura con relación a la altura.

Sabiendo además que el modelo IHMS/HBV calcula la temperatura media de la franja i mediante la siguiente formula:

$$T_{md Fi} = T_{md} + (h * T_{calt}) \quad (2)$$

$$h = h_{Fi} - h_{md}$$

Igualando las expresiones (1) y (2), y luego de realizar un desarrollo matemático, se tiene que:

$$T_{calt} = a$$

Nota: El desarrollo matemático puede verse en el anexo 9.4.

Como puede verse, el coeficiente T_{calt} está dado por la pendiente de la línea de tendencia.

Se determinó un valor promedio de T_{calt} para el periodo de acumulación, y otro para el periodo de fusión:

Tabla 4-3: Valores de T_{calt} para cada subcuenca.

CUENCA	ACUMULACIÓN	FUSIÓN	DIFERENCIA
ALU/LAGO	0.472	0.422	0.050
ALU/EXBAL	0.544	0.535	0.009
ÑORQUINCO	0.530	0.528	0.001
PUL/CONF	0.563	0.566	-0.003
KILKA	0.544	0.529	0.015
ALU/CEF	0.544	0.536	0.008
RUCA/PIED	0.569	0.591	-0.022
ALU/RAHUE	0.558	0.552	0.006
QUI/OFEL	0.523	0.514	0.009
QUI/SROSA	0.563	0.570	-0.007
ALU/SIB	0.540	0.540	0.000
ALU/MLUNA	0.531	0.526	0.006
MAL/MAMUIL	0.549	0.554	-0.005
MAL/PTE	0.562	0.574	-0.013
ALU/ALINCO	0.585	0.624	-0.039
CATAN/COL	0.611	0.610	0.001
CATAN/COIF	0.564	0.597	-0.033
ALU/HUE	0.543	0.592	-0.049

Se puede observar, que en ambos periodos el valor del gradiente de temperatura (T_{calt}) tiene valores similares, por lo tanto puede considerarse utilizar un único valor para representar la acumulación y la fusión. Se optó por utilizar el valor de T_{calt} del periodo de acumulación para todas las subcuencas.

C- Cálculo de la temperatura media areal (T_{md}).

Con los valores de T_{mdcor} y T_{calt} , obtenidos en los puntos anteriores, y el valor de h_{md} fijado para la subcuenca, se puede determinar T_{md} en todos los eventos de precipitaciones seleccionados:

$$T_{real} = T_{md\ cor} = \frac{\sum T_{media\ Fi} * A_{Fi}}{A_{Subcuenca}}$$

$$T_{real} = T_{md\ cor} = \frac{1}{A_{Subc}} * \sum [T_{md} + (h_{fi} - h_{md}) * T_{calt}] * A_{fi}$$

$$T_{md} = T_{real} - \frac{1}{A_{Subc}} * \sum [(h_{fi} - h_{md}) * T_{calt} * A_{fi}]$$

D- Cálculo de los pesos c_i de las estaciones.

Por último, sólo queda determinar los pesos (C_i) que se le asignarán a las estaciones seleccionadas. Estos coeficientes deben cumplir las siguientes condiciones:

$$(1) \quad 1 = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

$$(2) \quad H_{md} = \sum c_i * H_i = C_1 * H_1 + C_2 * H_2 + C_3 * H_3 + C_4 * H_4$$

$$(3) \quad T_{md} = \sum c_i * T_i = C_1 * T_1 + C_2 * T_2 + C_3 * T_3 + C_4 * T_4$$

Se adopta como criterio tomar 4 estaciones por subcuenca para explicar los fenómenos. Dichas estaciones se seleccionan por cercanía geográfica a la subcuenca de estudio.

Se busca la combinación de pesos (c_i) que cumplan con las condiciones (1) y (2), y que mejor representen los 21 eventos de temperatura de la condición (3).

El criterio de mejor ajuste está en función de los siguientes parámetros estadísticos: el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el sesgo (BIAS) y el coeficiente de correlación R. Dichas medidas de ajuste se calcularon comparando los valores T_{md} calculados en el paso anterior y los calculados con los pesos c_i .

Todo este proceso es iterativo, ya que variando la altura h_{md} se modificarán los valores de T_{md} y C_i . El objetivo es buscar el valor de h_{md} que permita obtener valores de C_i que representen los eventos seleccionados con el mejor ajuste.

La consistencia en los datos y la determinación de los coeficientes C_i y T_{calt} , proporcionan una alta confiabilidad de la variable de entrada al modelo (temperatura). Por ello, los coeficientes no serán modificados en la etapa de calibración.

4.3.3. Caudales.

Se utilizarán los datos de caudal de 16 estaciones con paso temporal de 6 horas medido en las estaciones de cierres de cada subcuenca, de 0, 6, 12 18. Desde el 01/04/2000 hasta el 31/03/2015.

El modelo utiliza los datos de caudales de las estaciones para comparar con los valores de caudal simulado, y medir el error de la simulación.

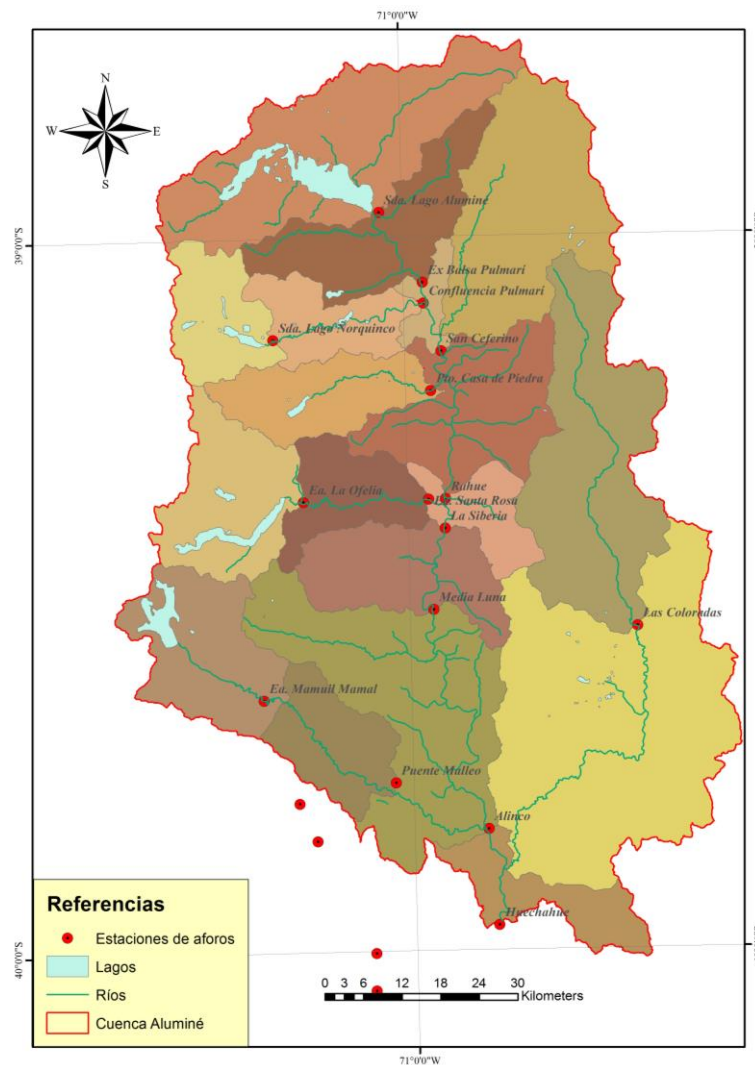


Fig 4-8: Estaciones de caudales.

Relacionada con esta unidad se calculó para cada subcuenca un parámetro de calibración HQ. El parámetro HQ es calculado con alguna de las siguientes ecuaciones:

$$(1) \quad HQ = \frac{\sqrt{MQ * MHQ} * 86.4}{Area}$$

$$(2) \quad HQ = \frac{MHQ * 86.4}{2 * Area}$$

Dónde:

- MQ: Módulo del río (m³/s).
- MHQ: Alto flujo medio (m³/s). Promedio de los caudales máximos anuales.
- Área: Superficie de aporte al punto de cierre analizado (km²).

Se calcularon los parámetros HQ con la ecuación (1) para cada subcuenca, y se resume en la siguiente tabla:

Tabla 4-4: Valores de HQ para cada subcuenca.

Estación de cierre	MQ	MHQ	Área de cálculo	HQ (1)
Sda Lago Alumine	33.28	113.82	891.52	5.97
Rahue	106.96	729.77	3480.58	6.94
Alinco	192.98	1311.62	6486.26	6.70
La Media Luna	152.61	1019.81	4835.21	7.05
La Siberia	136.83	825.66	4435.35	6.55
San Ceferino	80.97	513.89	2650.05	6.65
Ex Balsa Pulmari	46.26	255.77	1328.57	7.07
Huechahue	207.88	1493.34	9046.67	5.32
Puente Malleo	33.39	203.65	731.84	9.74
Ea. Mamuil Malal	25.43	136.77	444.16	11.47
Santa Rosa	34.09	178.01	691.25	9.74
La Ofelia	27.07	154.02	428.73	13.01
Casa de Piedra	11.02	86.73	327.78	8.15
Sda L° Ñorquinco	13.65	73.64	270.85	10.12
Conf. Pulmari	20.38	109.88	510.49	8.01
Las Coloradas	12.55	283.34	851.47	6.05

Para las subcuencas de Kilka y confluencia Catán Lil, no se calculó el parámetro HQ por no tener estaciones de cierre. Para estas cuencas, se adoptó un valor igual al de las Las Coloradas por tener similitudes de área y caudales.

4.3.4. Evapotranspiración.

La evaporación potencial se calcula directamente seleccionando estaciones de evaporación y multiplicando por su correspondiente factor de ponderación (peso).

$$E_{pot} = \sum E_i * C_i$$

Dónde:

- E_{pot} : Evaporación potencial diaria. (mm/día)
- E_i : Valor de evaporación de la estación i (msnm).
- C_i : Peso de la estación i.

Alternativamente en el modelo IHMS/HBV, la evapotranspiración potencial se puede calcular principalmente con dos métodos: Interpolación y Thornthwaite.

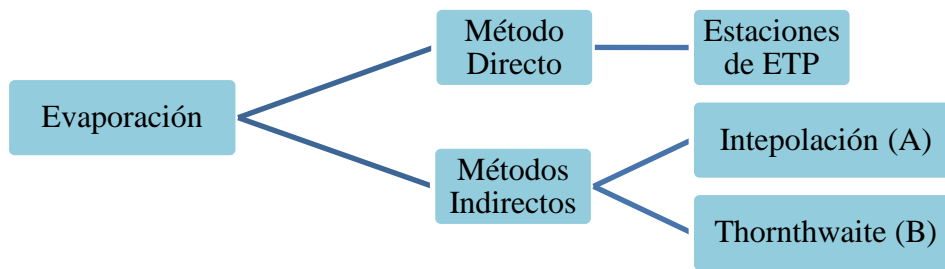


Fig 4-9: Esquema de métodos de medición de la Evapotranspiración.

Como se mencionó en el capítulo 3.4, en la cuenca de estudio no se tienen estaciones que midan directamente la evapotranspiración, por lo tanto se seguirá uno de los métodos indirectos.

Método A

Existen dos métodos de interpolación normal: “CONST” e “INTERP”. Si se utiliza el método “CONST” el valor dado es válido para un día determinado hasta que un nuevo valor se da para otro día. “CONST” se puede utilizar si hay valores mensuales de evapotranspiración. Para el método de INTERP hay una interpolación lineal entre los valores dados. Si se utiliza cualquiera de los dos métodos de interpolación, se introduce un único valor para cada mes. En el presente trabajo no se utilizó este método, por no disponer de información de evapotranspiración medida en forma directa.

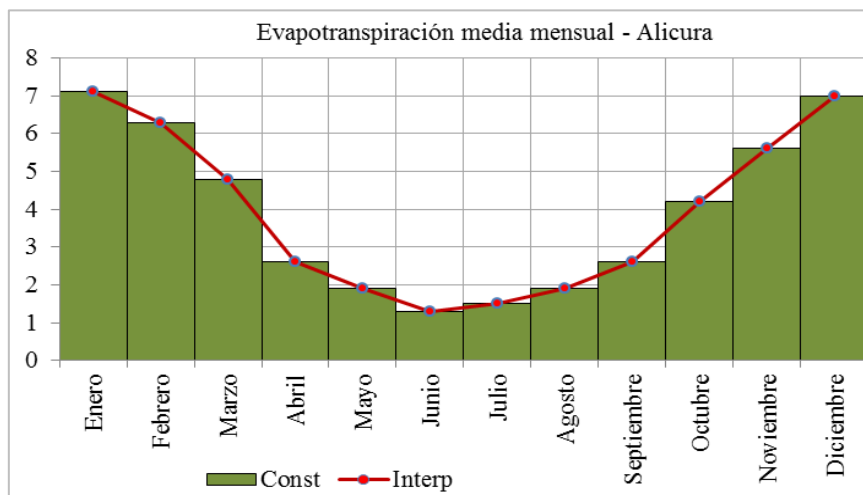


Fig 4-10: Evapotranspiración media mensual – Método de Interpolación (mm/día).

Método B

Ecuación simplificada de Thornthwaite: calcula la evapotranspiración potencial para cada día en función de la temperatura del aire y de un coeficiente de proporcionalidad mensual llamado “Athorn”. La expresión es la siguiente:

$$ETP = Athorn * T$$

Dónde:

- ETP: Evapotranspiración potencial diaria. (mm/día)
- T: Temperatura media diaria. (°C)
- Athorn: Coeficiente de evapotranspiración potencial de Thornthwaite. (mm/C°)

La variación estacional se puede representar afectando al coeficiente Athorn con el parámetro “Stf”. El mismo proporciona un factor de modificación para cada mes del año. Entonces:

- Si Stf = 0, significa que no se utiliza ningún factor.
- Si Stf = 1, se utilizan los siguientes factores: (0,7; 0.7; 0.8; 1.0; 1.3; 1.2; 1.1; 1.0; 0.9; 0.8; 0.7; 0.7), de Enero a Diciembre respectivamente.
- Si Stf = 2, se utilizan: (0.6; 1.9; 2.4; 1.8; 1.4; 1.3; 1.0; 0.9; 0.6; 0.4; 0.2; 0.3).

Estos valores fueron desarrollados para condiciones escandinavas (hemisferio norte) y no se puede suponer que será válido en general, por lo tanto no serán aplicados a este trabajo.

A continuación se desarrolla la metodología diseñada para determinar el Coeficiente de evapotranspiración potencial de Thornthwaite “Athorn” para todas las subcuencas analizadas.

Cálculo del coeficiente de evapotranspiración potencial de Thornthwaite (Athorn) para la estimación de la evapotranspiración potencial diaria.

Para obtener el coeficiente de Athorn, se desarrolló la teoría completa de Thornthwaite con el fin de estimar la evapotranspiración de la cuenca.

La ecuación de Thornthwaite, para el cálculo de la Evapotranspiración potencial mensual (mm), depende de la temperatura mensual (°C), el índice calórico anual (I) y de la latitud del lugar.

$$ETP = 16 \left(\frac{10 * T}{I} \right)^a$$

Dónde:

- ETP: Evapotranspiración en mm sin ajustar.
- I: Índice calórico, constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales i. $I = i_{ene} + i_{feb} + i_{mar} + \dots + i_{dic}$
- i: Es función de la temperatura media normal mensual
- $i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$
- T: Temperatura media mensual (no normal) en °C.
- a: Exponente empírico, función de I.

$$a = 6.75 * 10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 1.792 * 10^{-2} * I + 0.49239$$

Para cada subcuenca, se calcularon las temperaturas medias mensuales, y luego el índice calórico i. Estas temperaturas medias se calcularon utilizando los pesos de las estaciones. Por ejemplo para la subcuenca Salida. Lago Aluminé la tabla resumen es:

Tabla 4-5: Temperaturas medias mensuales e índice calórico.

Mes	Tmed	i
Enero	13.61	4.56
Febrero	13.42	4.46
Marzo	10.80	3.21
Abril	7.02	1.67
Mayo	4.16	0.76
Junio	1.46	0.16
Julio	0.47	0.03
Agosto	0.93	0.08
Septiembre	3.00	0.46
Octubre	5.57	1.18
Noviembre	8.25	2.13
Diciembre	11.26	3.42
	I	22.11
	a	0.86

Para el cálculo de la ETP de un mes determinado será preciso corregir la ETP sin ajustar mediante un coeficiente (L) que tiene en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud. El coeficiente de corrección (L), deberá multiplicar a la ETP sin ajustar para obtener la ETP según Thornthwaite (mm/mes).

$$ETP_{Tho} = ETP * L$$

Dónde:

- ETP: evapotranspiración mensual sin ajustar en mm/mes.
- L: factor de corrección del número de días del mes “D” y la duración astronómica del día “N” (duración media de la luz solar).

$$L = \frac{N}{12} * \frac{D}{30}$$

Tabla 4-6: Parámetros de cálculo de la Evapotranspiración según Thornthwaite.

Mes	ETP	N	D	ETP (mm/mes)	ETP (mm/día)
Enero	76.13	14.50	31	95.1	3.1
Febrero	75.20	13.50	28	79.0	2.8
Marzo	62.44	12.50	31	67.2	2.2
Abril	43.15	11.00	30	39.6	1.3
Mayo	27.55	10.00	31	23.7	0.8
Junio	11.23	9.50	30	8.9	0.3
Julio	4.25	9.75	31	3.6	0.1
Agosto	7.62	10.50	31	6.9	0.2
Septiembre	20.78	11.50	30	19.9	0.7
Octubre	35.34	13.00	31	39.6	1.3
Noviembre	49.52	14.00	30	57.8	1.9
Diciembre	64.70	14.75	31	82.2	2.7

Los valores de N (duración media de la luz solar) para cada mes de cada subcuenca, fueron obtenidos de la base de datos de páginas web de información climática.

Como se mencionó anteriormente, el modelo IHMS/HBV utiliza la ecuación simplificada de Thornthwaite. La expresión es la siguiente:

$$ETP_{IHMS} = Athorn * T$$

Para el cálculo de “Athorn” de cada subcuenca, se considera que la evapotranspiración potencial que calcula el Modelo (teoría simplificada de Thornthwaite) sea igual a la evapotranspiración potencial de Thornthwaite (teoría completa). Resulta así, la siguiente expresión.

$$\sum_1^{12} ETP_{IHMS} = \sum_1^{12} ETP_{Tho} \rightarrow i = meses$$

$$\sum_1^{12} (Athorn * Ti) = \sum_1^{12} ETP_{Tho} \rightarrow i = meses$$

$$Athorn = \frac{\sum_1^{12} ETP_{Tho}}{\sum_1^{12} (Ti)}$$

En conclusión, se determina un valor de Athorn, para que el volumen de agua evaporada a lo largo del año sea igual con ambas teorías. Se consideran que las diferencias de evapotranspiración mes a mes no son significativas.

Gráficamente esta igualdad tiene la siguiente forma:

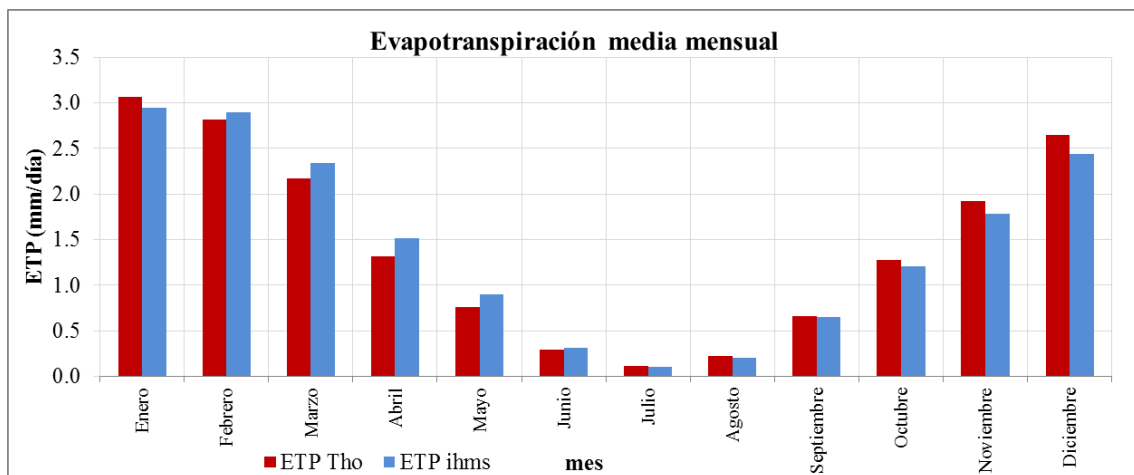


Fig 4-11: Evapotranspiración media mensual. Athorn.

La siguiente tabla resume los valores de Athorn para cada subcuenca.

Tabla 4-7: Valores de Athorn para cada subcuenca.

Subcuenca	ALU/LAGO	ALU/BALSA	ÑORQUINCO	PUL/CONF	KILKA	ALU/CEF	RUCA/PIED	ALU/RAHUE	QUI/OFEL	QUI/SROSA	ALU/SIB	ALU/MLUNA	MAL/MAMUIL	MAL/PTE	ALU/ALINCO	CATAN/COL	CATAN/COIF	ALU/HUE
Athorn	0.22	0.20	0.20	0.20	0.22	0.20	0.20	0.18	0.21	0.19	0.18	0.18	0.21	0.17	0.18	0.20	0.17	0.17

4.4. Rutinas del modelo.

El modelo HBV simula la descarga diaria de una cuenca hidrológica usando como datos de entrada la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial diaria (Bergström, 1992).

El modelo está estructurado en tres rutinas principales:

- Acumulación/fusión de nieve;
- Cómputo del contenido de humedad del suelo;
- Respuesta hidrológica y la propagación del flujo en el río.

La siguiente figura grafica las distintas rutinas y sus parámetros sobre una cuenca.

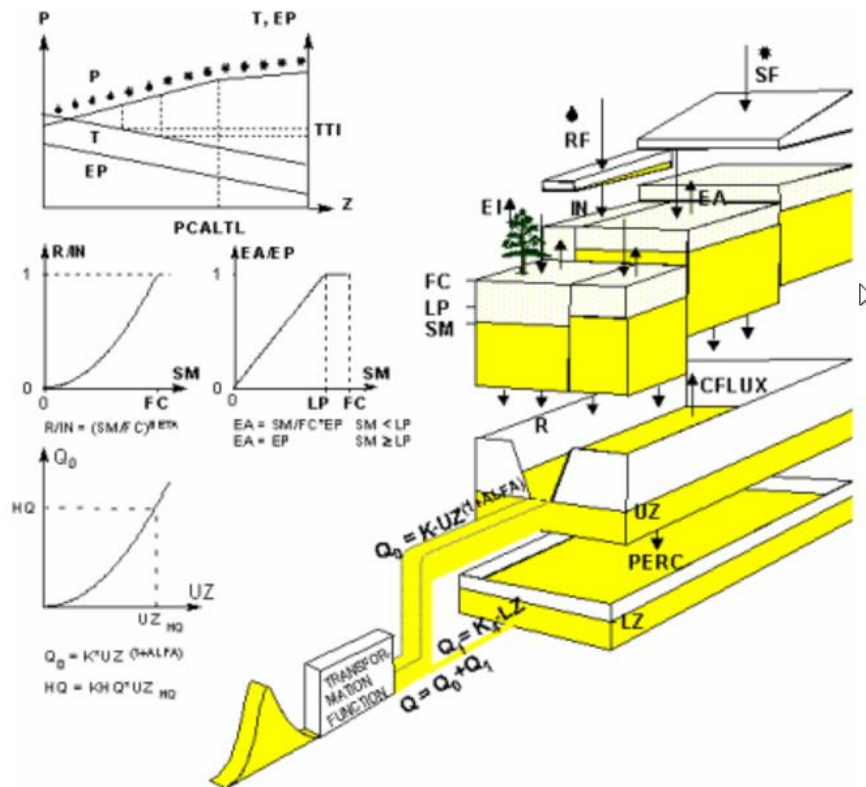


Fig 4-12: Esquema de rutinas – modelo HBV.

4.4.1. Acumulación / fusión de nieve.

El módulo de nieve controla la acumulación y fusión; y trabaja separadamente para cada zona de vegetación y elevación. La precipitación y temperatura en cada franja altimétrica se calcula con los parámetros P_{CALT} y T_{CALT} como se vio en el capítulo anterior.

El gradiente de precipitación, $PCALT$, se aplica para calcular la precipitación en las diferentes franjas de elevación. En nuestro estudio se determinó una metodología para estimar el parámetro $PCALT$ para cada subcuenca. Es posible tener un gradiente diferente para grandes alturas (umbral determinado por el parámetro $PCALTL$) y el gradiente de grandes alturas pueden diferir de los glaciares y otras áreas ($PCALTGL$, $PCALTUP$).

Gráfico que muestra la relación de las variables que involucran la rutina de acumulación y fusión de nieve.

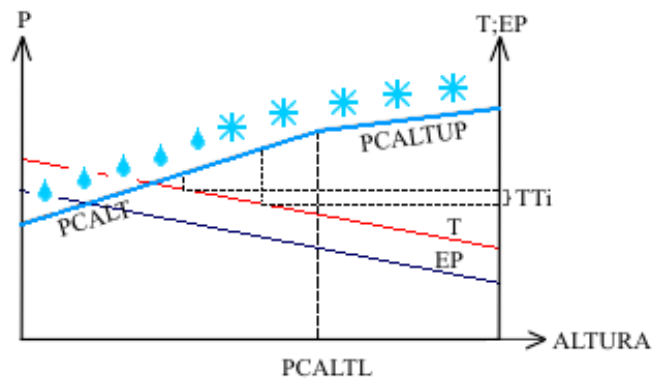


Fig 4-13: Relación de las variables en la rutina de humedad del suelo

Todos los valores de precipitación se multiplican por un factor de corrección general (**PCORR**), el cual puede ser usado para ajustar la precipitación cuando las estaciones no son representativas de la cuenca. Además, existen factores de corrección que se pueden utilizar en caso de lluvias y nevadas: **RF**, **SFCF**.

$$RF = pcorr * rfcf \quad si \rightarrow Ta > TT$$

$$SF = pcorr * sfcf \quad si \rightarrow Ta < TT$$

Dónde:

- RF: cantidad de lluvia.
- SF: cantidad de nieve.
- pcorr: factor de corrección general.
- rfcf: factor de corrección de lluvia.
- sfcf: factor de corrección de nieve.

La precipitación es simulada como nieve cuando la temperatura del aire es menor a un valor umbral (**TT**) en C°, y esta se multiplica por un factor de corrección de nieve (**sfcf**

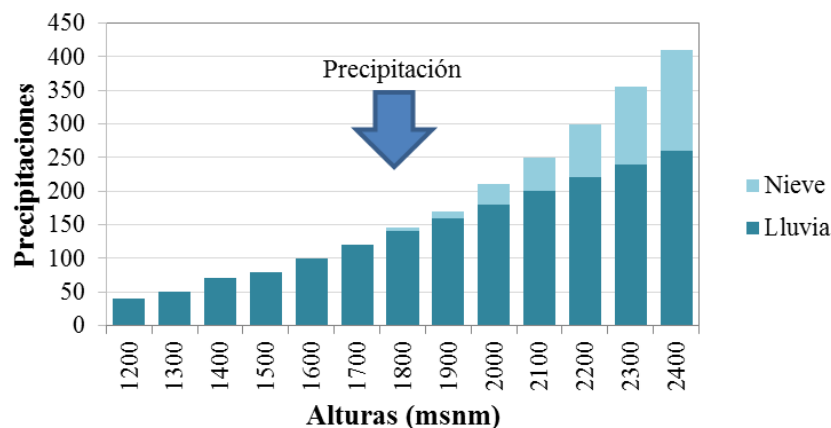


Fig 4-14: Tipo de Precipitación en función de la altura.

La fusión se calcula con el **método del Grado-día**. La misma comienza cuando la temperatura está por encima de la temperatura umbral **TT**, que es cercana a 0°, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Snow Melt} = C_{f_{max}} * (T_a - TT)$$

Dónde:

- Snow Melt: fusión de nieve (mm/día).
- $C_{f_{max}}$: factor de fusión de nieve grados-día (mm/°C al día).
- TT: temperatura umbral (°C).

Si se utiliza el parámetro **fofmax**, entonces se aplicarán diferentes factores de fusión para las zonas boscosas.

La capa de nieve retiene el agua de fusión/precipitación hasta que el aporte sea superior a una cierta porción del equivalente en agua de la capa de nieve (un 10% aproximadamente). Este fenómeno se representa con el factor **WHC** (capacidad hídrica del manto de nieve) y por lo general tiene un valor de 0.1.

Cuando la temperatura cae por debajo de TT, una porción de agua de deshielo puede congelarse nuevamente en la capa de nieve. Esta fracción está representada por el coeficiente Cfr (por lo general tiene un valor de 0,05) y se calcula con la siguiente expresión.

$$\text{Refreezing} = C_{fr} * C_{f_{max}} * (TT - T_a)$$

Dónde:

- Refreezing: recongelamiento del agua de deshielo (mm/día).
- $C_{f_{max}}$: factor de fusión de nieve grados-día (mm/°C al día).
- Cfr: factor de recongelamiento. (0,05)
- TT: temperatura umbral (°C).

Como se mencionó anteriormente, el umbral de temperatura **TT** se utiliza para decidir si la precipitación cae como lluvia o nieve, pero es posible tener diferentes umbrales:

Se utiliza el parámetro **DTTM**, que se suma a **TT**, para obtener la temperatura umbral de la fusión de la nieve (° C). A menudo el valor de DTTM es cero.

Si se utiliza el parámetro TT_{INT} , el umbral se extiende a un intervalo; y dentro de este intervalo la precipitación se supone que es una mezcla de lluvia y nieve, disminuyendo linealmente desde 100% de la nieve en el extremo inferior a 0% en el extremo superior.

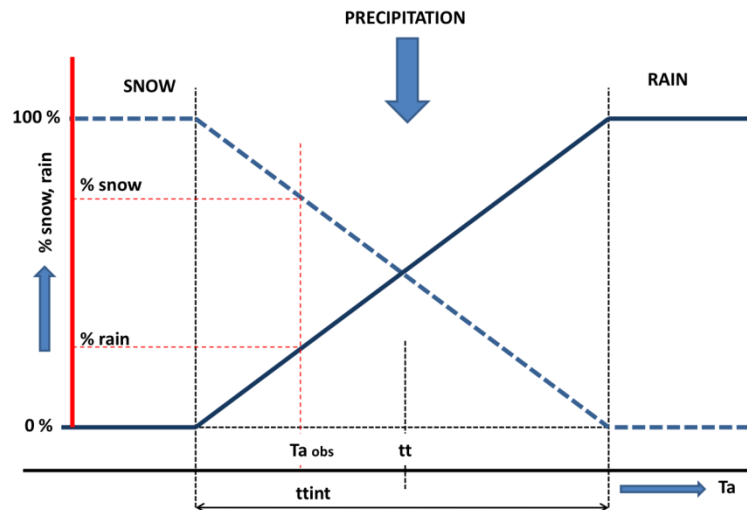


Fig 4-15: Umbral de temperatura.

4.4.2. Humedad del suelo.

El modelo HBV se basa en una modificación de la teoría de tanques, en el cual se asume una distribución estadística del almacenamiento en la cuenca (humedad del suelo).

La rutina de humedad del suelo es la parte fundamental que controla la formación de la escorrentía. Esta rutina se basa en 3 parámetros, BETA, LP y FC.

BETA controla la contribución de respuesta de escorrentía ($\Delta Q/\Delta P$) o el aumento en el almacenamiento de humedad del suelo ($1 - \Delta Q/\Delta P$) de cada milímetro de lluvia o deshielo. La relación $\Delta Q/\Delta P$ se conoce como coeficiente de escorrentía, y ΔQ es a menudo llamado precipitación efectiva.

Con el fin de evitar problemas de no linealidad, la rutina de humedad del suelo es alimentada con precipitación milímetro a milímetro. La rutina da por resultado una pequeña contribución a la escorrentía cuando el suelo está seco (valores de SM bajos) y una contribución apreciable para condiciones de humedad.

FC es el almacenamiento de humedad del suelo máximo en el modelo.

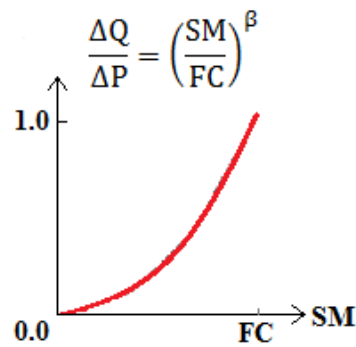


Fig 4-16: Relación de la humedad del suelo con la precipitación efectiva.

$$\Delta Q = \Delta P * \left(\frac{SM}{FC}\right)^\beta$$

La evaporación real (EA) aumenta con el incremento del almacenamiento de la humedad del suelo, de acuerdo a una relación lineal y sobreviene únicamente en lagos sin hielo. $LP*FC$ es un valor de humedad del suelo por encima del cual la evapotranspiración alcanza su valor potencial (ETP). La evapotranspiración real disminuye con el incremento del déficit de humedad del suelo.

El parámetro LP es dado como una fracción del FC.

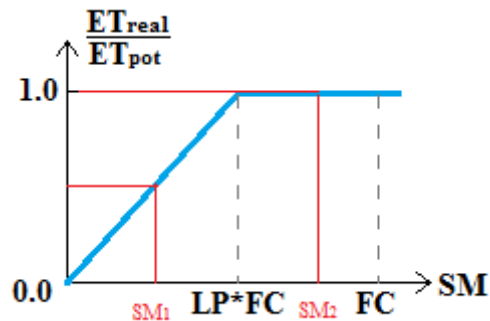


Fig 4-17: Relación de la humedad del suelo con la evapotranspiración.

$$ET_{real} = ET_{pot} * \frac{SM}{(LP * FC)} \quad si \rightarrow SM < (LP * FC)$$

$$ET_{real} = ET_{pot} \quad si \rightarrow SM \geq (LP * FC)$$

4.4.3. Respuesta de la escorrentía.

La rutina de generación de escorrentía es la función de respuesta que transforma el exceso de agua, de la zona de humedad del suelo, en escorrentía. Incorpora también el

efecto de la precipitación (RF) y evaporación directas en lagos (EL), ríos y otras extensiones húmedas. La función consiste en un depósito superior, no lineal, y otro inferior, lineal, que producen los componentes rápido y lento de la escorrentía del hidrograma.

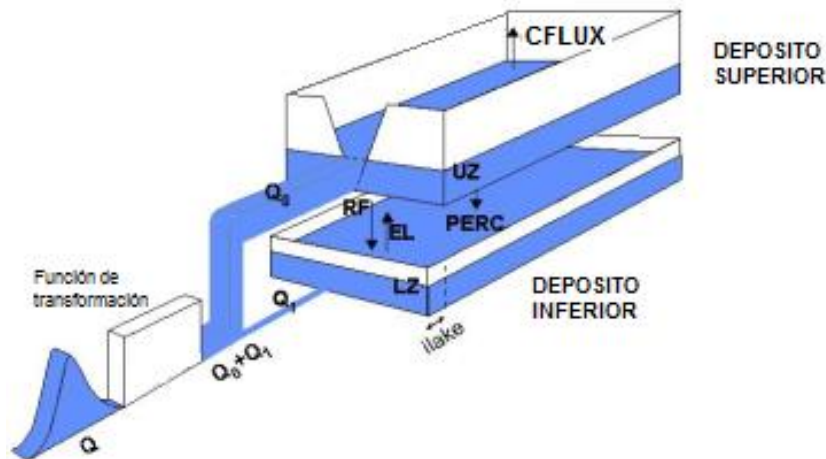


Fig 4-18: Rutina de respuesta y propagación de onda.

La contribución de la zona de la humedad del suelo (la precipitación efectiva), se añadirá al almacenamiento en el depósito superior. Mientras haya agua en el depósito superior, el agua se filtrará al depósito inferior de acuerdo con el parámetro de percolación **PERC**. Si la contribución de la zona de humedad del suelo es superior a la percolación, el depósito superior genera una descarga Q_0 que tendrá una contribución directamente al derrame superficial. El depósito inferior, por otro lado, representa el almacenamiento de agua subterránea de la cuenca, que contribuye al caudal base Q_1 .

La respuesta total de escorrentía estará dada por la suma de los caudales Q_0 y Q_1 .

El caudal de salida desde el depósito superior está descrito por una función exponencial continuamente y afectada por un coeficiente de recesión:

$$Q_0 = K * UZ^{(1+\alpha)}$$

Dónde:

- Q_0 : Caudal de salida del depósito superior.
- K : Coeficiente de recesión.
- UZ : Contenido del depósito superior.
- α : Coeficiente de no linealidad.

Una estimación del coeficiente de recesión se puede realizar con el hidrograma de los datos observados y utilizado como primera aproximación del valor k.

El caudal de salida del depósito inferior se describe por:

$$Q_1 = K4 * LZ$$

Dónde:

- Q_1 : Caudal de salida del depósito inferior.
- $K4$: Coeficiente de recesión del depósito inferior
- LZ : Contenido del depósito inferior

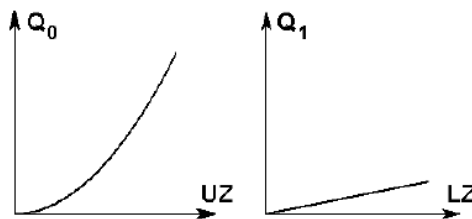


Fig 4-19: Función de descarga del depósito superior e inferior.

El programa utilizará los parámetros **KHQ**, **HQ** y **ALFA** para calcular un valor de k de modo que:

$$HQ = KHQ * UZ_{HQ}$$

HQ es un flujo de alto nivel al que se supone la tasa de recesión KHQ. El valor HQ debe ser seleccionado en la parte superior del rango de datos de caudales observados. Puede ser calculado de dos formas:

$$HQ = \frac{\sqrt{mq * mhq} * 86,4}{\text{Área de la cuenca}[km^2]}; [mm/día]$$
$$HQ = \frac{mhq}{2} * \frac{86,4}{\text{Área de la cuenca}[km^2]}; [mm/día]$$

Dónde:

- mq : es la media de caudales observados durante todo el período y
- mhq : media de los picos anuales.

El parámetro **CFLUX** representa el máximo flujo capilar desde el depósito superior a la rutina de la humedad del suelo. El flujo capilar es función del déficit de humedad del suelo, $SM_{def} = (FC - SM)$, de acuerdo con:

$$\text{Flujo Capilar} = CFLUX * \frac{SM_{def}}{FC}$$

A medida que la humedad del suelo (SM) disminuye, entonces el flujo capilar aumenta. Cuando el suelo está saturado, entonces no hay flujo capilar.

4.4.4. Propagación de flujo en el cauce.

Generación del hidrograma.

El escurrimiento se genera independientemente en cada una de las subcuencas y se encamina a través de una función de transformación, con el fin de obtener una forma adecuada del hidrograma. La función de transformación es un proceso de filtro simple para suavizar el flujo generado, con una distribución triangular de los pesos. La base de tiempo de la función triangular está dada por el parámetro **MAXBAS**, como se muestra en la siguiente figura.

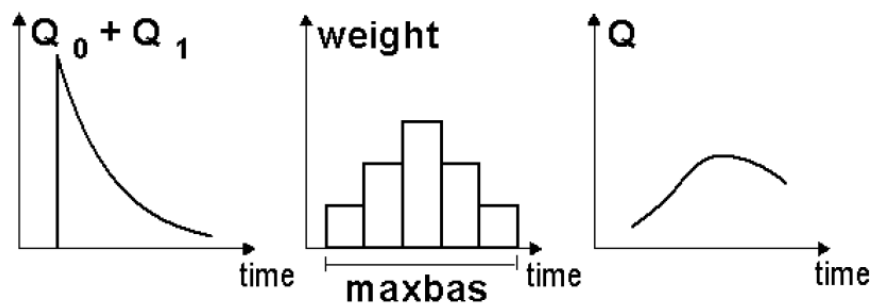


Fig 4-20: Función de transformación de cauce.

Propagación del cauce.

Todos los caudales son dirigidos a través de una secuencia de subcuencas por medio de la rutina de Muskingum. El método se basa en el desarrollo de la ecuación de continuidad de una cuenca, y consiste en calcular el caudal de salida $Q(t)$ en un punto de salida con el hidrograma de entrada $I(t)$. La forma del hidrograma varía a medida que nos desplazamos aguas abajo.

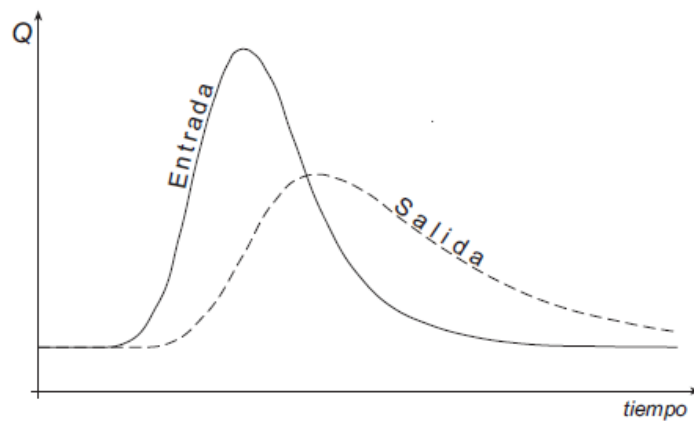


Fig 4-21: Hidrograma de respuesta - Muskingum.

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t)$$

Formula de Muskingum.

$$S = KQ + KX(I - Q)$$

Donde el significado de los parámetros K y X, son el tiempo de propagación de la onda de crecida en el tramo de estudio y un factor de ponderación que señala el grado de atenuación de la onda al pasar por el tramo de río. El valor de X varía entre 0 (máxima atenuación) y 0,5 (Sin atenuación).

El IHMS/HBV calcula la propagación, combinando el método de Muskingum con una función de adicional de desfase (método modificado de Muskingum) que establece enlaces de traslación de caudales entre subcuencas introduciendo los valores del parámetro de retardo (**Lag**), y el parámetro de amortiguación (**Damp**).

El parámetro Lag indica el retraso de la onda expresado en intervalos de tiempo (Ej. Lag=1 representa 6 horas).

Si el parámetro Damp es 0, el flujo de salida de un segmento es igual al flujo de entrada del mismo durante el paso de tiempo anterior. En este caso la forma del hidrograma no cambiara. Si el Damp es distinto de 0, la forma del hidrograma cambiara, ya que el flujo de salida de un segmento dependerá de la entrada durante el mismo paso de tiempo, como así también del flujo de entrada y de salida del paso de tiempo precedente.

4.4.5. Lagos.

La rutina de lagos incorpora el efecto de la precipitación y evaporación directas sobre los lagos. También permite modelizar el flujo de salida de los lagos situados en el punto de desagüe de una subcuenca, lo cual es muy importante para determinar la dinámica de la escorrentía generada.

En los lagos ubicados a la salida de la subcuenca, el flujo entrante se calcula como la suma del flujo local de la subcuenca en estudio y el flujo de otras subcuencas aguas arriba. El almacenamiento en el depósito de agua se calcula según una tabla que relaciona el nivel de agua y el volumen de agua almacenada, o con una tabla de nivel de agua – superficie del lago (km²). Si no se dispone de dicha información, se supone que la superficie del lago es constante con la variación del nivel.

El flujo de salida se calcula a partir de una curva de descarga (expresada como una tabla o una fórmula). Si no se elige ninguna de las dos opciones, el flujo de salida será igual al flujo de entrada.

La precipitación en los lagos será la misma que para una zona no boscosa a la misma altitud y se adicionará al agua del lago, independientemente de las condiciones de hielo. El procedimiento es similar tanto para la lluvia y como para la nieve.

La evaporación de los lagos será igual a la evaporación potencial, pero puede ser modificado por el parámetro **Cevpl** y sólo tendrá lugar cuando no hay hielo. Para decidir si un lago está cubierto de hielo o no, el programa utilizará un cálculo de la temperatura de la superficie del lago, T_L , sobre la base de la temperatura del aire anterior, T_A y el parámetro **Lakedays**:

$$T_L(t) = [1 - k] * T_L(t - 1) + k * T_A(t)$$

Dónde $k = 1/\text{Lakedays}$. Entonces se supone que el lago está cubierto de hielo cuando la temperatura es inferior al valor dado por el parámetro **Ttice** que está cerca de 0. El parámetro **Lakedays** es una medida de lo rápido que la temperatura de la superficie del lago seguirá un cambio en la temperatura del aire.

5. Ejecución del modelo.

5.1. Carga del modelo.

El presente capítulo describe las actividades realizadas para la implementación del modelo HBV en la cuenca de estudio.

En particular las tareas de implementación del modelo se resumen en:

- Definición del distrito.
- Definición de las subcuencas.
- Definición de la configuración de las estaciones.
- Definición de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas en el modelo.
- Selección de las zonas geográficas de las subcuencas.
- Definición de la conexión hidrológica entre las subcuencas.
- Definición de las características de los lagos presentes en las subcuencas.
- Importación de los datos hidrometeorológicos.

Las actividades precedentemente enumeradas constituyen la fase preliminar al ajuste del modelo.

5.1.1. Definición del distrito.

El modelo HBV prevé la selección del área geográfica de trabajo llamada ‘District’ (distrito). Un distrito representa el área geográfica en la cual se realiza una corrida del modelo de simulación HBV.

La definición de un distrito depende además del objetivo de la aplicación. Pues el principal objetivo de la implementación presente es la determinación del volumen escurrido por el río Aluminé en la estación de aforo “Huechahue”. La carga del modelo se realizó con el nombre de distrito **CC6hs**.

El distrito comprende un cierto número de subcuencas debiendo ajustarse el modelo para cada una de ellas.

El distrito seleccionado corresponde, en el ambiente de trabajo del sistema, con un directorio específico dentro del cual están memorizadas todas las informaciones relativas al distrito correspondiente.

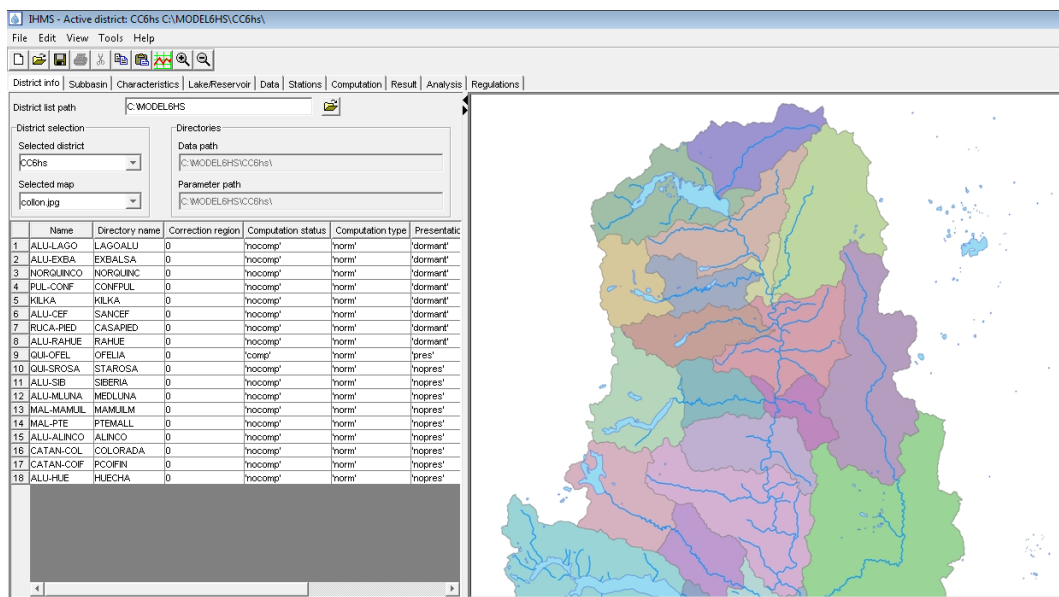


Fig 5-1: Ventana gráfica de información del Software IHMS/HBV.

5.1.2. Definición de Subcuencas.

La segunda etapa seguida en la implementación del modelo, consiste en la definición de las subcuencas que componen al distrito creado.

La siguiente tabla, lista las 18 subcuencas seleccionadas en el distrito definido “CC6hs”. En particular la columna ‘SUBCUENCA’ indica la subcuenca seleccionada, la columna ‘NOMBRE’ indica el nombre atribuido a la subcuenca en el modelo, la columna ‘SUBDIRECTORIO’ indica el subdirectorio en el cual están memorizadas las informaciones relativas a cada una de las subcuencas.

Tabla 5-1: Subcuencas seleccionadas en distrito CC6hs.

DISTRITO COLLON CURA (directorio ... \CC6hs)			
Nº	SUBCUENCA	NOMBRE	SUBDIRECTORIO
1	Aluminé en salida lago Aluminé	ALU/LAGO	..\LAGOALU
2	Aluminé en Ex Balsa Pulmari	ALU/EXBAL	..\EXBALSA
3	Norquinco	NORQUINCO	..\NORQUINC
4	Pulmarí en Conf. Pulmarí	PUL/CONF	..\CONFPUL
5	Kilka	KILKA	..\KILKA
6	Aluminé en San Ceferino	ALU/CEF	..\SANCEF
7	Rucachorio en casa de Piedra	RUCA/PIED	..\CASAPIED
8	Aluminé en Rahue	ALU/RAHUE	..\RAHUE
9	Quillen en La Ofelia	QUI/OFEL	..\OFELIA
10	Quillen en Santa Rosa	QUI/SROSA	..\STAROSA
11	Aluminé en La Siberia	ALU/SIB	..\SIBERIA
12	Aluminé en Media Luna	ALU/MLUNA	..\MEDLUNA
13	Malleo en Mamuil Malal	MAL/MAMUIL	..\MAMUILM
14	Malleo en Puente Malleo	MAL/PTE	..\PTEMALL
15	Aluminé en Alinco	ALU/ALINCO	..\ALINCO
16	Catan Lil en Las Coloradas	CATAN/COL	..\COLORADA
17	Catan Lil en Pto Coifin	CATAN/COIF	..\PCOIFIN
18	Aluminé en Huechahue	ALU/HUE	..\HUECHA

5.1.3. Definición de la configuración de las estaciones.

Después de haber definido la subdivisión del distritos en 18 subcuencas, se han seleccionado las estaciones hidrometeorológicas que operan dentro del distrito y que se utilizarán para el ajuste del modelo. La tabla siguiente muestra las principales características de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas para el distrito. En particular se especifica el nombre de la estación (NOMBRE), el tipo de sensores (TIPO), el código de las estaciones según la codificación vigente por la AIC (CODIGO AIC) y el código de las estaciones utilizado para la implementación del modelo (CODIGO MODELO).

Tabla 5-2: Carga de estaciones al modelo.

DISTRITO COLLON CURA				
Nº	Nombre	Tipo	Código AIC	Código modelo
1	Sda Lago Alumine	p, q, t	06000.03	60003
2	Rahue	p, q, t	06000.07	60007
3	Alinco (La Aida)	q	06000.11	60011
4	La Media Luna	q	06000.15	60015
5	La Siberia	q	06000.19	60019
6	San Ceferino	q	06000.21	60021
7	Ex Balsa Pulmari	q	06000.25	60025
8	Huechahue	p, q, t	06000.27	60027
9	Puente Malleo	q	06100.05	61005
10	Ea.Mamuil Malal	p, q, t	06100.06	61006
11	Santa Rosa	q	06200.03	62003
12	La Ofelia	p, q, t	06200.04	62004
13	Añihuerahui	p, t	06210.07	62107
14	Nac. A° Malalco	p, t	06250.02	62502
15	Pto. Casa de Piedra	q	06300.03	63003
16	Sda L° Ñorquinco	q	06400.02	64002
17	Conf. Pulmari	q	06400.03	64003
18	Lago Ñorquinco	p, t	06410.01	64101
19	Batea Mahuida Abajo	p, t	06800.04	68004
20	Litran Abajo	p, t	06810.03	68103
21	Casa Quila 1800	p, t	06822.02	68222
22	Las Coloradas	p, q, t	06900.08	69008
23	Nac. Catan Lil	p, t	06900.09	69009
24	Casa de Lata	p, t	07000.03	70003
25	Ea Collunco	p, t	07100.01	71001
26	L° Huechulafquen	p, t	07200.03	72003
27	Pto Antiao	p, t	07210.06	72106
28	Cerro Huicuifa	p, t	07210.07	72107
Referencias:		p = sensor pluviométrico	t = sensor termométrico	q = sensor de nivel

5.1.4. Definición de las estaciones utilizadas en el modelo.

La fase sucesiva de la implementación del modelo ha sido la definición de las principales características de las estaciones hidrometeorológicas a ser utilizadas para la calibración del modelo en correspondencia de cada subcuenca definida en el distrito. Por medio del comando ‘STATION → STATION WEIGHTS’ se han determinado:

- A. El nombre de las estaciones.
- B. El tipo de estación.
- C. p: pluviométrica; t: termométrica; q: hidrométrica; w: estación de medida del nivel de los embalses; e: estación de medida de la evaporación;
- D. el código de la estación (el código tiene que ser igual al código definido en la configuración general de las estaciones hidrometeorológicas ‘CODIGO MODELO’).

- E. La cota o elevación de las estaciones sobre el nivel del mar.
- F. El peso para el cálculo de la precipitación media areal, de la temperatura media de la cuenca y de la evaporación media de la cuenca;
- G. El periodo de disponibilidad de datos hidrometeorológicos (Start date – Last date);
- H. Eventuales estaciones substitutivas (Repl) y;
- I. El relativo factor de corrección (Corr).

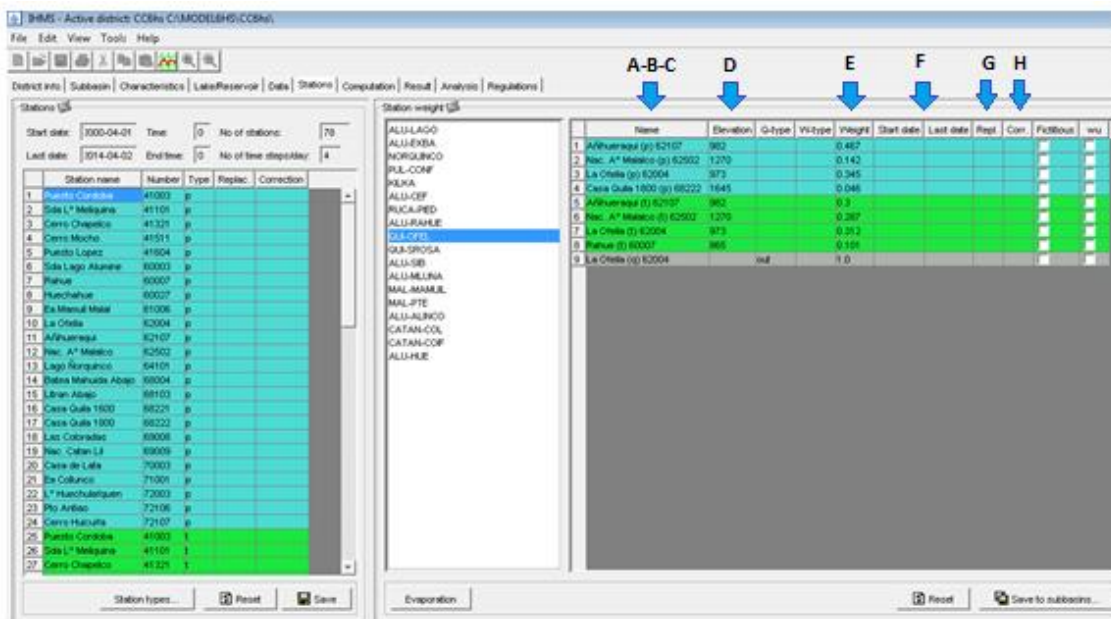


Fig 5-2: Ventana gráfica carga del modelo

Tabla 5-3: Cotas de estaciones sobre el nivel del mar.

DISTRITO COLLON CURA		
Nº	Nombre	msnm
1	Sda Lago Alumine	1156
2	Rahue	865
3	Alinco (La Aida)	689
4	La Media Luna	798
5	La Siberia	844
6	San Ceferino	925
7	Ex Balsa Pulmari	972
8	Huechahue	668
9	Puente Malleo	767
10	Ea.Mamuil Malal	924
11	Santa Rosa	856
12	La Ofelia	973
13	Añihueraqui	982
14	Nac. A° Malalco	1270
15	Casa de Piedra	847
16	Sda L° Ñorquinco	1064
17	Conf. Pulmari	972
18	Lago Ñorquinco	1063
19	Batea Mahuida Abajo	1607
20	Litran Abajo	1729
21	Casa Quila 1800	1645
22	Las Coloradas	909
23	Nac. Catan Lil	2131
24	Casa de Lata	852
25	Ea Collunco	879
26	L° Huechulafquen	907
27	Pto Antiao	969
28	Cerro Huicuiifa	1586

En lo que concierne a los pesos de las estaciones, se han utilizado pesos calculados según la metodología descrita en el capítulo 4.2.2 para las estaciones pluviométricas y termométricas. Se resumen los resultados de los pesos de las estaciones para cada subcuenca en las siguientes tablas.

Tabla 5-4: Atribución de los pesos de precipitación para cada subcuenca.

COLLÓN CURÁ - Precipitación: atribución de los pesos																			
CÓDIGO	ESTACIÓN	SUBCUENCAS																	
		ALU/LAGO	ALU/EXBA	NORQUINCO	PUL/CONF	KILKA	ALU/CEF	RUCA/PIED	ALU/RAHUE	QUI/OFEL	QUI/SROSA	ALU/SIB	ALU/MLUNA	MAL/MAMUIL	MAL/PTE	ALU/ALINCO	CATAN/COL	CATAN/COIF	ALU/HUE
p68103	Litrán Abajo	0.200				0.192													
p68004	Batea Mahuida Ab.	0.431	0.067	0.048															
p68222	Casa Quila 1800	0.143		0.181					0.058										
p60003	Sda Lago Alumine	0.226	0.671		0.412	0.181	0.611	0.592	0.182								0.079		
p69009	Nac. Catan Lil		0.129			0.566	0.089		0.238								0.242	0.067	
p64101	Lago Norquinco		0.133	0.501	0.186			0.084											
p62502	Nac. A° Malalco			0.270				0.037		0.114	0.008								
p62004	La Ofelia				0.262		0.131	0.287	0.097	0.364	0.558	0.035	0.238	0.290					
p60007	Rahue				0.140	0.061	0.169		0.483	0.424	0.737	0.599		0.158	0.148	0.093	0.032		
p62107	Añihueraqui									0.464	0.010		0.235						
p69008	Las Coloradas											0.150	0.022			0.304	0.586	0.714	0.387
p61006	Ea.Mamuil Malal											0.078	0.141	0.295	0.242				
p72003	L° Huechulafquen																		
p72106	Pto Antiao												0.180						
p72107	Cerro Huicufa																		
p70003	Casa de Lata														0.402	0.487			0.122
p60027	Huechahue														0.198	0.061		0.187	0.414
p71001	Ea Collunco																		0.077
	Total de los pesos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 5-5: Atribución de los pesos de temperaturas para cada subcuenca.

COLLÓN CURÁ - Temperaturas: atribución de los pesos																			
CÓDIGO	ESTACIÓN	SUBCUENCAS																	
		ALU/LAGO	ALU/BALSA	NORQUINCO	PUL/CONF	KILKA	ALU/CEF	RUCA/PIED	ALU/RAHUE	QUI/OFEL	QUI/SROSA	ALU/SIB	ALU/MLUNA	MAL/MAMUIL	MAL/PTE	ALU/ALINCO	CATAN/COL	CATAN/COIF	ALU/HUE
t68103	Litrán Abajo	0.363	0.285			0.331	0.184												
t68004	Batea Mahuida Abajo	0.089																	
t68222	Casa Quila 1800	0.206	0.255	0.332	0.289														
t60003	Sda Lago Alumine	0.342	0.416	0.156	0.571	0.321	0.570	0.474	0.338								0.120		
t69009	Nac. Catan Lil					0.241											0.053		
t64101	Lago Norquinco		0.044	0.372	0.065		0.049												
t62502	Nac. A° Malalco			0.140	0.075			0.123		0.214									
t62004	La Ofelia							0.123	0.038	0.403	0.462	0.312	0.363						
t60007	Rahue					0.107	0.197	0.280	0.452	0.154	0.269	0.283	0.382			0.319	0.073	0.058	
t62107	Añihueraqui									0.229	0.072			0.130					
t69008	Las Coloradas								0.172		0.197	0.375	0.151			0.246	0.754	0.669	0.206
t61006	Ea.Mamuil Malal											0.030	0.104	0.288	0.184	0.234			
t72003	L° Huechulafquen													0.205	0.115				
t72106	Pto Antiao													0.377					
t72107	Cerro Huicufa																		
t70003	Casa de Lata														0.518	0.201		0.050	0.115
t60027	Huechahue														0.183			0.223	0.626
t71001	Ea Collunco																		0.053
	Total de los pesos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 5-6: Atribución de los pesos de caudales para cada subcuenca.

COLLÓN CURÁ - Caudales: atribución de los pesos																		
CÓDIGO	ESTACIÓN	Subcuencas																
		ALU/LAGO	ALU/BALSA	NORQUINCO	PUL/CONF	KILKA	ALU/CEF	RUCA/PIED	ALU/RAHUE	QUI/OFEL	QUI/SROSA	ALU/SIB	ALU/MLUNA	MAL/MAMUIL	MAL/PTE	ALU/ALINCO	CATAN/COL	CATAN/COIF
06000.03	Sda Lago Aluminé	1.00																
06000.07	Rahue							1.00										
06000.11	Alinco (La Aida)														1.00			
06000.15	La Media Luna											1.00						
06000.19	La Siberia										1.00							
06000.21	San Ceferino						1.00											
06000.25	Ex Balsa Pulmari		1.00															
06000.27	Huechahue																	1.00
06100.05	Puente Malleo													1.00				
06100.06	Ea.Mamul Malal												1.00					
06200.03	Santa Rosa									1.00								
06200.04	La Ofelia								1.00									
06300.03	Casa de Piedra							1.00										
06400.02	Sda L° Norquenco			1.00														
06400.03	Conf. Pulmari				1.00													
06900.08	Las Coloradas																1.00	
	Total de los pesos	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

En lo que respecta a la evapotranspiración media de cada subcuenca, no se tienen estaciones con sensores que midan directamente estos datos, por lo que no hay cargas de este tipo al modelo. La estimación de evapotranspiración diaria es la desarrollada en el capítulo 4.2.2, mediante la fórmula simplificada de Thornthwaite.

5.1.5. Selección de las zonas geográficas de las subcuencas.

Como se mencionó en el capítulo 2.3.1 y 2.3.2, es posible subdividir cada subcuenca individualizada en zonas geográficas en base a la altitud y a la cobertura del suelo. Esta división resulta de fundamental importancia sobre todo para la simulación de los procesos nivales y ha sido determinante para la buena calibración del modelo en estas cuencas donde el desnivel altimétrico es muy acentuado.

El modelo permite determinar hasta un máximo de 50 zonas geográficas, pero cabe subrayar que, si se utilizase una subdivisión tan detallada, esto implicaría un aumento considerable de la complejidad de las operaciones de cálculo, sin mejorar sensiblemente la simulación. Por este motivo, en el presente trabajo se ha preferido definir las zonas geográficas utilizando fajas altimétricas de 100 metros y subdividir cada faja en función de la cobertura del suelo (vegetación, glaciar y lagos). A través del comando ‘CHARACTERISTICS → GEOGRAPHICAL ZONES’ se cargan al modelo los 5 tipos de zonas de vegetación en cada faja altimétrica.

Mapas	Proceso	Carga al modelo																																																																																																												
Mapa de franjas altimétricas	Herramientas de ArcGIS	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Elevation</th> <th>Zone type</th> <th>Area (km²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1000.0</td><td>lake</td><td>24.08</td></tr> <tr><td>2</td><td>1000.0</td><td>forest</td><td>9.46</td></tr> <tr><td>3</td><td>1100.0</td><td>forest</td><td>82.08</td></tr> <tr><td>4</td><td>1200.0</td><td>field</td><td>0.11</td></tr> <tr><td>5</td><td>1200.0</td><td>forest</td><td>60.71</td></tr> <tr><td>6</td><td>1300.0</td><td>field</td><td>0.35</td></tr> <tr><td>7</td><td>1300.0</td><td>forest</td><td>49.63</td></tr> <tr><td>8</td><td>1400.0</td><td>field</td><td>0.97</td></tr> <tr><td>9</td><td>1400.0</td><td>forest</td><td>43.31</td></tr> <tr><td>10</td><td>1500.0</td><td>field</td><td>2.53</td></tr> <tr><td>11</td><td>1500.0</td><td>forest</td><td>42.77</td></tr> <tr><td>12</td><td>1600.0</td><td>field</td><td>4.52</td></tr> <tr><td>13</td><td>1600.0</td><td>forest</td><td>36.14</td></tr> <tr><td>14</td><td>1700.0</td><td>field</td><td>7.33</td></tr> <tr><td>15</td><td>1700.0</td><td>forest</td><td>24.01</td></tr> <tr><td>16</td><td>1800.0</td><td>field</td><td>7.36</td></tr> <tr><td>17</td><td>1800.0</td><td>forest</td><td>12.41</td></tr> <tr><td>18</td><td>1900.0</td><td>field</td><td>5.61</td></tr> <tr><td>19</td><td>1900.0</td><td>forest</td><td>4.96</td></tr> <tr><td>20</td><td>2000.0</td><td>field</td><td>4.89</td></tr> <tr><td>21</td><td>2000.0</td><td>forest</td><td>1.29</td></tr> <tr><td>22</td><td>2100.0</td><td>field</td><td>3.21</td></tr> <tr><td>23</td><td>2100.0</td><td>forest</td><td>0.08</td></tr> <tr><td>24</td><td>2200.0</td><td>field</td><td>0.78</td></tr> <tr><td>25</td><td>2200.0</td><td>forest</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>26</td><td>2300.0</td><td>field</td><td>0.12</td></tr> </tbody> </table>		Elevation	Zone type	Area (km ²)	1	1000.0	lake	24.08	2	1000.0	forest	9.46	3	1100.0	forest	82.08	4	1200.0	field	0.11	5	1200.0	forest	60.71	6	1300.0	field	0.35	7	1300.0	forest	49.63	8	1400.0	field	0.97	9	1400.0	forest	43.31	10	1500.0	field	2.53	11	1500.0	forest	42.77	12	1600.0	field	4.52	13	1600.0	forest	36.14	14	1700.0	field	7.33	15	1700.0	forest	24.01	16	1800.0	field	7.36	17	1800.0	forest	12.41	18	1900.0	field	5.61	19	1900.0	forest	4.96	20	2000.0	field	4.89	21	2000.0	forest	1.29	22	2100.0	field	3.21	23	2100.0	forest	0.08	24	2200.0	field	0.78	25	2200.0	forest	0.01	26	2300.0	field	0.12
			Elevation	Zone type	Area (km ²)																																																																																																									
1	1000.0	lake	24.08																																																																																																											
2	1000.0	forest	9.46																																																																																																											
3	1100.0	forest	82.08																																																																																																											
4	1200.0	field	0.11																																																																																																											
5	1200.0	forest	60.71																																																																																																											
6	1300.0	field	0.35																																																																																																											
7	1300.0	forest	49.63																																																																																																											
8	1400.0	field	0.97																																																																																																											
9	1400.0	forest	43.31																																																																																																											
10	1500.0	field	2.53																																																																																																											
11	1500.0	forest	42.77																																																																																																											
12	1600.0	field	4.52																																																																																																											
13	1600.0	forest	36.14																																																																																																											
14	1700.0	field	7.33																																																																																																											
15	1700.0	forest	24.01																																																																																																											
16	1800.0	field	7.36																																																																																																											
17	1800.0	forest	12.41																																																																																																											
18	1900.0	field	5.61																																																																																																											
19	1900.0	forest	4.96																																																																																																											
20	2000.0	field	4.89																																																																																																											
21	2000.0	forest	1.29																																																																																																											
22	2100.0	field	3.21																																																																																																											
23	2100.0	forest	0.08																																																																																																											
24	2200.0	field	0.78																																																																																																											
25	2200.0	forest	0.01																																																																																																											
26	2300.0	field	0.12																																																																																																											
Mapa de cobertura de suelo																																																																																																														

Fig 5-3: Carga al modelo de tipos de vegetación por franja altimétrica.

5.1.6. Definición de la conexión hidrológica entre subcuencas.

Una vez definidas las características principales de las subcuencas de estudio, se determina el tipo de conexión hidrológica existente entre ellas. Esta operación se ejecuta a través del comando ‘SUBBASIN’ → INFLOW. El comando se utiliza para describir el flujo ingresante a una determinada subcuenca. Dicho flujo puede ser representado por la escorrentía simulada de una cuenca aguas arriba o por el caudal observado en correspondencia de una estación de medida. El modelo permite definir los siguientes tipos de flujo ingresante:

- **IN:** el flujo ingresante a la subcuenca es el caudal total simulado de otra subcuenca aguas arriba;

- **INQREC:** el flujo ingresante es el caudal observado en el punto de cierre de otra subcuenca aguas arriba;
- **NOIN:** no hay contribución de cuencas agua arriba; el modelo usa este tipo de conexión para calcular el caudal local de la cuenca en estudio sustrayendo el caudal observado en el punto de cierre de las cuencas aguas arriba.

Si hay una bifurcación (natural o artificial) a la salida de la subcuenca de aguas arriba, es necesario identificar el tramo principal (Main) y el tramo secundario (Branch). En la subcuenca de aguas abajo, hay que definir cuál de los dos tramos va a ser su flujo ingresante:

- **MAIN:** el flujo ingresante es el caudal simulado del tramo principal de otra subcuenca aguas arriba;
- **BRANCH:** el flujo ingresante es el caudal simulado del tramo secundario de otra subcuenca aguas arriba;

En el siguiente esquema se resumen todas las conexiones definidas entre las subcuencas del Río Aluminé. Además de la conexión entre las subcuencas, el comando ‘SUBBASIN’ → INFLOW permite definir también la propagación de los caudales ingresantes en la subcuenca en cuestión, a través del método de Muskingum (*Lag* y *Damp*) y las pérdidas de transmisión (*Tloss*) que se pueden verificar en la subcuenca.

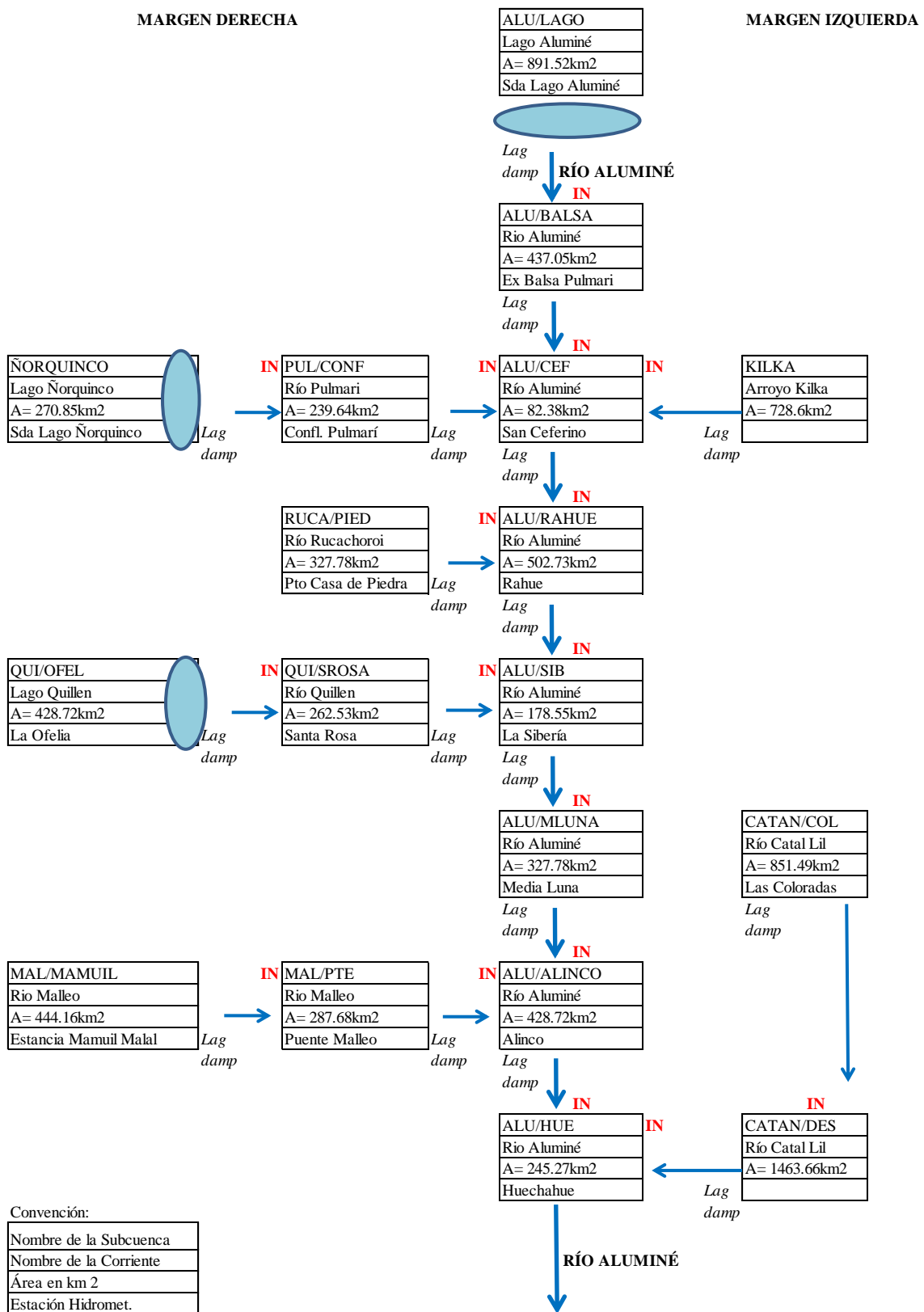


Fig 5-4: Conexión hidrológica entre las subcuencas.

5.1.7. Definición de las características de los lagos.

Las cuencas estudiadas presentan algunos lagos que influyen sobre la simulación del caudal en los puntos de interés. Para tomar en cuenta esta influencia, el modelo hace posible la definición de las principales características de estos lagos y embalses a través de distintos comandos. Como se mencionó en el capítulo 5.1.5, una primera caracterización consiste en la definición de la presencia de lagos internos a la cuenca o en correspondencia del punto de cierre de la misma a través del comando ‘CHARACTERISTICS → GEOGRAPHICAL ZONES’.

El comportamiento de los lagos internos (ilake) sólo está caracterizado por la rutina de lagos, cuyos parámetros se desarrollaron en el capítulo 4.4.5. En el área de estudio contamos con dos lago internos:

- Lago Rucachoroi: subcuencas del Rucachoroi en Casa de Piedra.
- Lago Tromen: subcuenca Malleo en Mamuil Mamal.

En los lagos ubicados en el punto de cierre de la subcuenca (olake), es necesario definir otros comandos que permiten caracterizar con mayor detalle estos lagos definidos como ‘outlet lakes’. Dichos comandos son:

– ‘CHARACTERISTICS → RATING TABLE’: la ‘rating table’ (o tabla de clasificación) explica, mediante una fórmula o estructura de tabla, la relación entre el nivel del lago y el caudal saliente. Si no se define la ‘rating table’, el caudal saliente del lago es considerado igual al caudal de entrada al lago.

Los lagos definidos como ‘outlet lakes’ son:

- Lago Aluminé: subcuenca del Aluminé en Salida Lago Aluminé.
- Lago Ñorquinco: subcuenca Salida Lago Ñorquinco.
- Lago Quillén: subcuenca del Quillén en La Ofelia.

Para cada uno de dichos lagos ha sido definida una fórmula del tipo exponencial:

$$Q = C * (W - W_0)^E$$

Dónde:

- Q = caudal efluente (m³/seg)
- W = nivel del lago (m)

Para definir los parámetros C, W_o y E se buscaron series históricas donde se tenga medición de los niveles de los lagos (W) y el caudal saliente del mismo (Q) de forma simultánea. Luego se ajustó una curva que represente el comportamiento de lago, como puede verse a continuación:

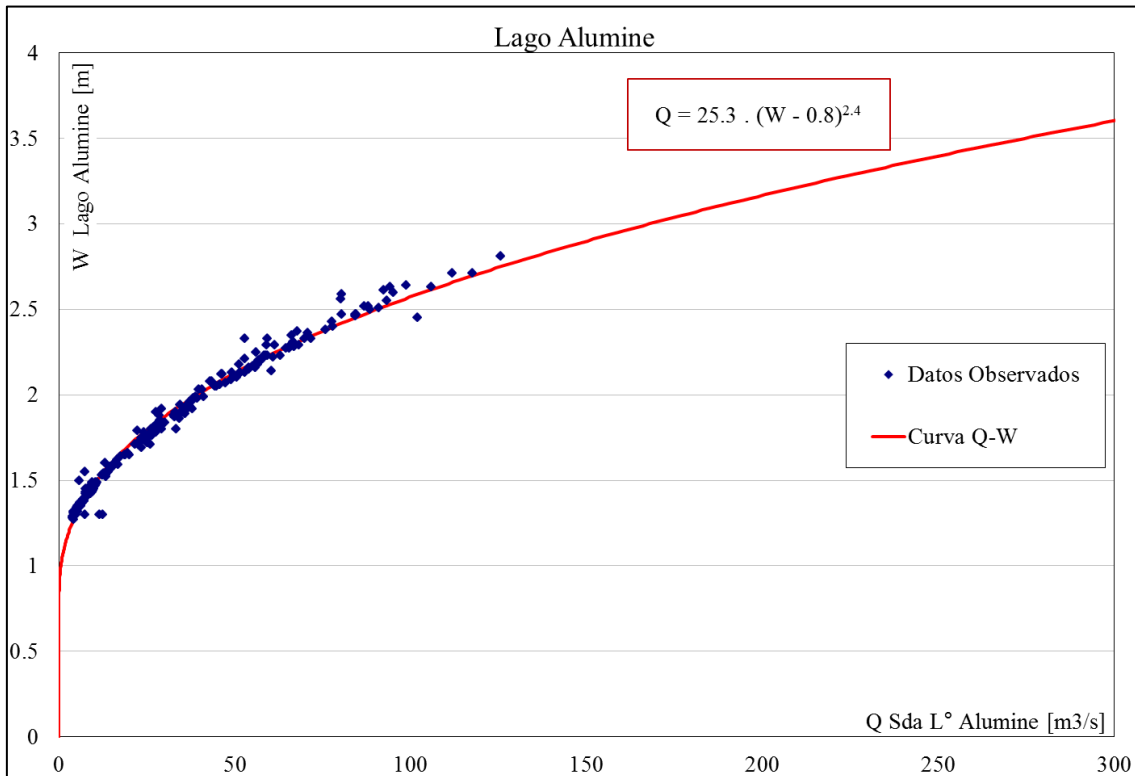


Fig 5-5: Curva de Caudales de Salida Lago Aluminé vs Alturas de Lago.

En la siguiente tabla se resumen los parámetros de las ecuaciones para cada uno de los lagos analizados:

Tabla 5-7: Parámetros de la fórmula de relación caudal efluente y altura de lagos.

Lago	C	W_o	E
Aluminé	25.3	0.80	2.4
Ñorquinco	14.0	0.62	2.1
Quillén	38.0	1.30	1.8

Si los niveles observados están disponibles para el período de simulación, nos debemos asegurar de que se utiliza el mismo sistema de elevación.

5.1.8. Importación de los datos hidrometeorológicos.

Los datos de precipitaciones (p), temperaturas (t), caudales (q) y niveles de lagos (w) se extraen de la base de datos DIMS de la AIC de forma diaria y se compilan en dos archivos de formatos “dat” y “key” para poder ser importados al modelo

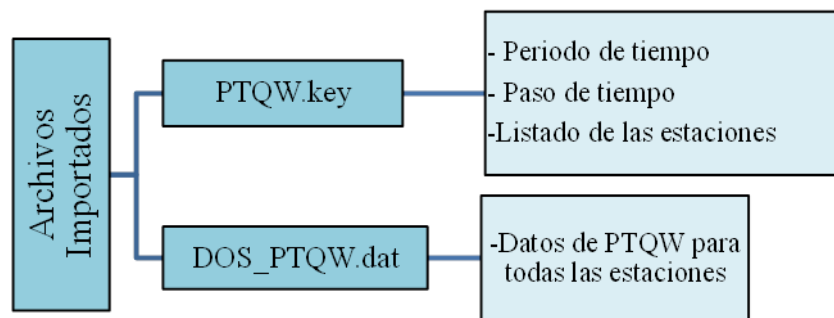


Fig 5-6: Esquema de formato de archivos utilizados por el software.

5.2. Calibración.

5.2.1. Introducción.

Con el término calibración se define el proceso mediante el cual se modifican algunos parámetros del modelo con el fin de hacer coincidir, lo más precisamente posible, la simulación hidrológica realizada por el modelo, y sintetizada en el caudal simulado en la estación de cierre, con el caudal observado en el mismo punto de cierre.

El proceso de calibración es una técnica iterativa de prueba y error manual, durante el cual los valores de parámetros relevantes se cambian hasta que se obtiene un acuerdo aceptable entre los caudales calculados y los observados. (Sten Bergström 1992)

5.2.2. Longitud del periodo de datos de calibración.

No se puede especificar la longitud requerida de los registros necesaria para una calibración del modelo estable para todo tipo de aplicaciones. Lo importante es que el registro incluya una variedad de eventos hidrológicos, para que el efecto de todas las subrutinas del modelo las pueda discernir. Normalmente 5 a 10 años de registros es suficiente cuando el modelo se aplica a regiones frías.

Para el periodo de calibración del modelo, se consideró utilizar una serie de ocho años, periodo 01 Abril 2000 – 31 Marzo 2008. Cada año hidrológico se clasificó según la

probabilidad de excedencia del derrame acumulado en la desembocadura del río Collón Cura. La variabilidad de la clasificación de los años en el periodo seleccionado va desde Seco a Extra Húmedo.

Tabla 5-8: Clasificación hidrológica por derrame en periodos de calibración.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Clasificación Derrame	Medio	Muy Húmedo	Medio/Húmedo	Medio	Medio	Húmedo	Muy Húmedo	Seco

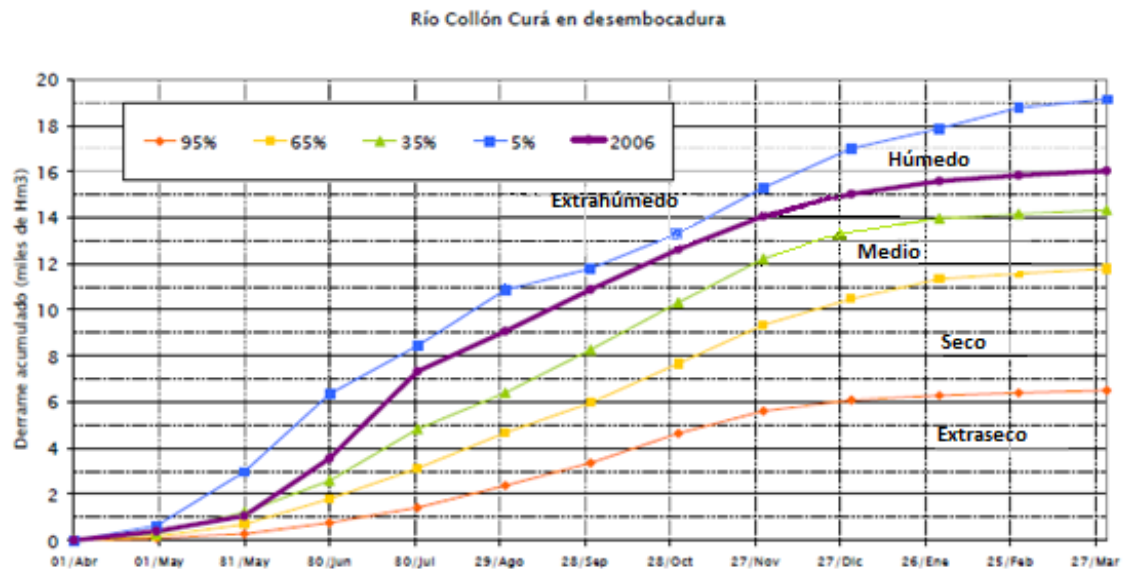


Fig 5-7: Año 2006 (01-04-2006 al 31-03-2007) - Año Extrahúmedo.

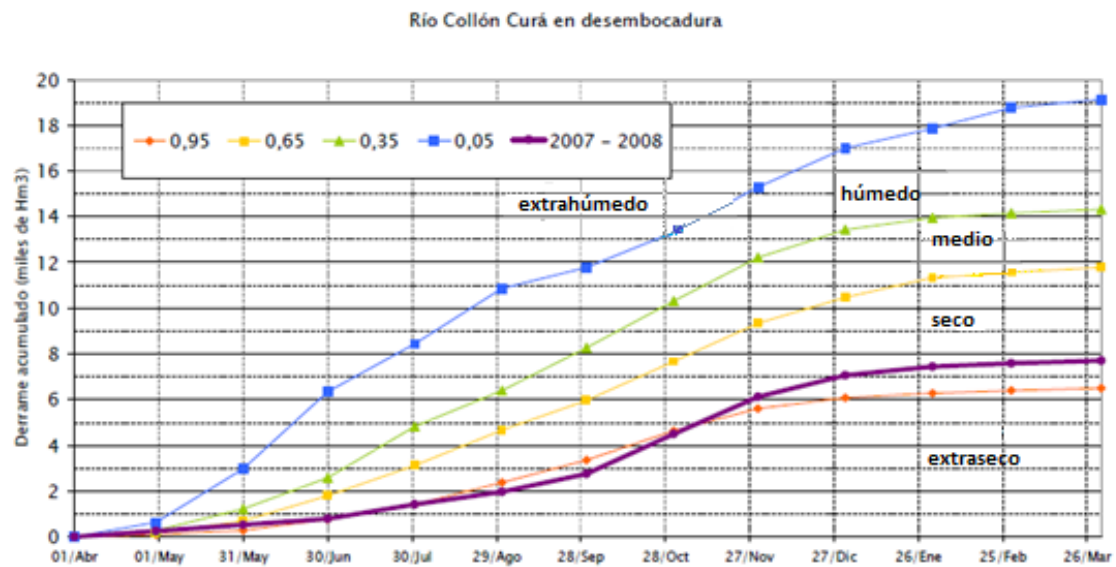


Fig 5-8: Año 2007 (01-04-2007 al 31-03-2008) - Año Seco.

5.2.3. Criterios de evaluación.

Los métodos gráficos y estadísticos son herramientas que permiten evaluar si el modelo es una representación simplificada de la realidad. El criterio para seleccionar los parámetros de calibración, estarán basados en el análisis gráfico (rendimiento del modelo) y en los parámetros estadísticos (desempeño del modelo).

A- Rendimiento del modelo – Criterio Gráfico.

Las técnicas gráficas proporcionan una primera visión general de los resultados y permiten una comparación visual entre los datos simulados y observados.

Para el estudio, se utilizaron tres gráficos de series de tiempo del IHMS.

- Diferencias acumuladas de caudales.
- Nieve acumulada de la simulación.
- Hidrograma de caudales.

Diferencia acumulada entre la simulación y el caudal observado (Acc Diff).

Expresa cuantitativamente la relación entre el volumen del hidrograma observado y el simulado. Se expresa como:

$$m = 100 * \frac{\sum(Q_c - Q_o)}{\sum Q_o}$$

Dónde:

- Q_o : Caudal observado.
- Q_c : Caudal calculado.

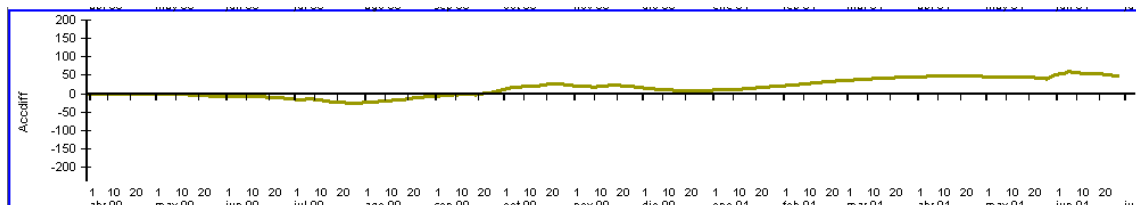


Fig 5-9: Gráfico de diferencia acumulada entre la simulación y el caudal observado.

El gráfico permite identificar, las diferencias de volumen de agua acumulada en el tiempo. Un exceso de agua en la simulación correspondería a valores positivos, mientras que un déficit, a valores negativos. Se pretende que la curva de diferencias acumuladas se mantenga constante a lo largo del tiempo y cercana a cero.

Nieve acumulada de la simulación (Snow).

Expresa gráficamente el contenido total de agua en el paquete de nieve, en unidades de milímetros. Este contenido, resulta de la suma del agua almacenada en el paquete de nieve (SP) y el agua de fusión retenida en el paquete de nieve (WC).

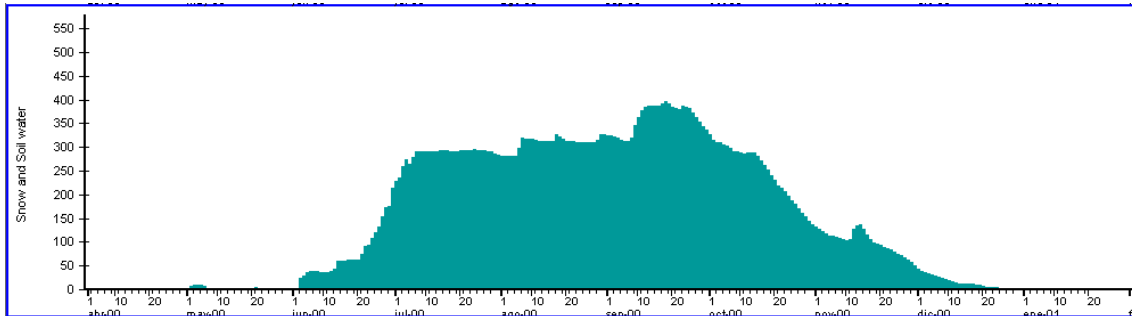


Fig 5-10: Gráfico de SNOW.

El gráfico permite identificar el momento del inicio de la acumulación de nieve, la forma de la curva (acumulación y fusión) y el momento inicial y final del periodo de fusión. Los datos de SNOW se extraen y se comparan o validan con los datos de equivalente en agua de la nieve (EAN) pertenecientes a estaciones de alta montaña en la cuenca analizada o cercana.

Hidrograma de caudales simulados y observados (qc y qo)

Expresa gráficamente la variación en el tiempo del flujo superficial simulado y el observado, en m^3/s .

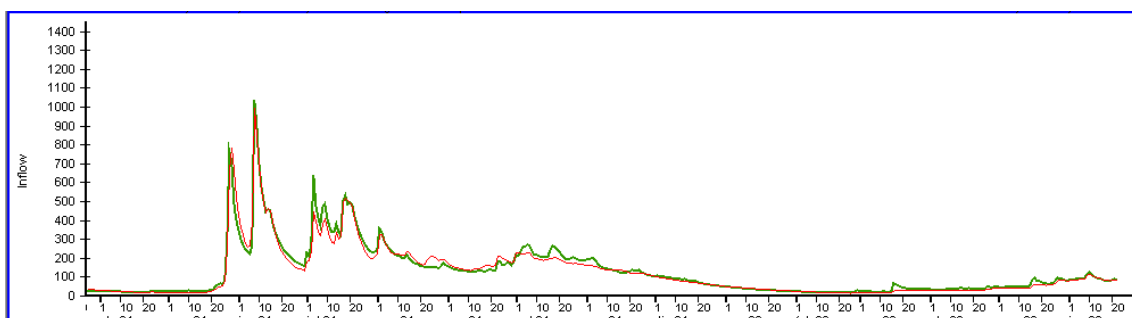


Fig 5-11: Gráfico de caudales calculados y observados.

El gráfico permite visualizar la forma del hidrograma. Analizar distintas partes del hidrograma como ser la magnitud y dinámica de los caudales máximos, la forma de las curvas de recesión y el caudal de base.

B- Desempeño del modelo – Criterio Estadístico.

Además del análisis gráfico, es necesario cuantificar la bondad de ajuste del modelo mediante un criterio estadístico.

El grado de predicción del modelo se juzga comparando los caudales calculados y los correspondientes caudales observados. Para evaluar el desempeño del modelo se adopta el criterio de Moriasi (2007), el cual propone utilizar los siguientes parámetros estadísticos:

Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe - R^2

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en Hidrología. Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación.

$$R^2 = \frac{\sum(\bar{Q}_o - Q_o)^2 - \sum(Q_c - Q_o)^2}{\sum(\bar{Q}_o - Q_o)^2}$$

Dónde:

- Q_o : Caudal observado.
- \bar{Q}_o : Promedio de caudal observado.
- Q_c : Caudal calculado.

La eficiencia de Nash puede variar de -00 a 1. La eficiencia modelo aumenta a medida que se aproxima al valor de 1. Una eficiencia de 1 se corresponde con una combinación perfecta de caudal calculado y observado.

El coeficiente de eficiencia de Nash es sensible a valores extremos altos.

En una simulación, una alta eficiencia de Nash con un buen ajuste de los caudales extremos altos puede tener errores significativos de volumen. Por esta limitación es necesario acompañar su cálculo con otros parámetros estadísticos.

Raíz del error cuadrático medio – RMSE.

La raíz del error cuadrático medio permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. Se formula como

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_c - Q_o)^2}{N}}$$

Dónde:

- Q_o : Caudal observado.
- Q_c : Caudal calculado.

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta el infinito (positivo). El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

El RMSE sirve para sumar la magnitud de los errores de las predicciones en un solo coeficiente. Bajos valores de RMSE indican bajas diferencias de volumen.

Razón RMSE - desviación estándar de las observaciones – RSR.

Es una versión estandarizada del RMSE (Legates & McCabe, 1999); se calcula como el cociente entre el RMSE y la desviación estándar de los datos observados, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$RSR = \frac{RMSE}{Desv_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum(Q_o - Q_c)^2}}{\sqrt{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2}}$$

Dónde:

- RMSE: Raíz de error cuadrático medio.
- $Desv_{Obs}$: Desvío estándar de las observaciones.

El RSR tiene la ventaja de ser un parámetro normalizado, por lo tanto permite comparar los errores resultantes en distintas cuencas con diferentes magnitudes de caudales.

Sesgo Porcentual – PBIAS.

Es la tendencia promedio de los datos simulados de ser mayores o menores que los datos observados. La expresión para el cálculo es la siguiente ecuación:

$$PBIAS = \sum \frac{(Q_c - Q_o)}{N} * 100$$

Dónde:

- Q_o : Caudal observado.
- Q_c : Caudal calculado.

El valor óptimo es de 0,0 PBIAS, y valores bajos indican que la simulación del modelo es satisfactoria. Los valores positivos indican una tendencia del modelo a subestimar, mientras que los valores negativos son indicativos de sobreestimación. Esta prueba se recomienda debido a su capacidad para revelar cualquier mal desempeño del modelo.

Interpretación de los parámetros

No existen normas generales que describan los intervalos de valores que deben tener los parámetros estadísticos, para asegurar un rendimiento aceptable del modelo. Para ello, existen numerosos procedimientos propuestos por diversos autores.

Como se mencionó anteriormente, en el presente trabajo se sigue el criterio de Moriasi (2007) que se detalla en la siguiente tabla. Además, se busca como objetivo, obtener un desempeño del orden de muy bueno o bueno para todas las subcuencas.

Tabla 5-9: Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación.

PBIAS	R ²	RSR	Interpretación Modelo
PBIAS<±10	0,75<R ² <1,0	0,00<RSR<0,50	Muy Bueno
±10<PBIAS<±15	0,65<R ² <0,75	0,50<RSR<0,60	Bueno
±15<PBIAS<±25	0,50<R ² <0,65	0,60<RSR<0,70	Satisfactorio
PBIAS>±17	R ² <0,50	RSR>0,70	No Satisfactorio

5.2.4. Valores de descargas observadas para la calibración del modelo.

Para la calibración se requieren los valores de descarga, es decir el valor de caudal observado para cada paso de tiempo. Q_{obs} .

Para analizar las descargas de cada cuenca, hay que tener en cuenta que se tienen dos tipos de cuencas:

- A. Cuenca hidrográfica con un punto de cierre: Se necesita el caudal medido en el punto de cierre $Q(A)$.
- B. Cuenca hidrográfica con lago en el cierre. Es posible analizar la descarga con dos secuencia de datos, nivel de agua del lago $H.m (L)$ y/o descarga observada a la salida del lago $Q(B)$. El flujo de entrada total al lago será calculado por el programa.

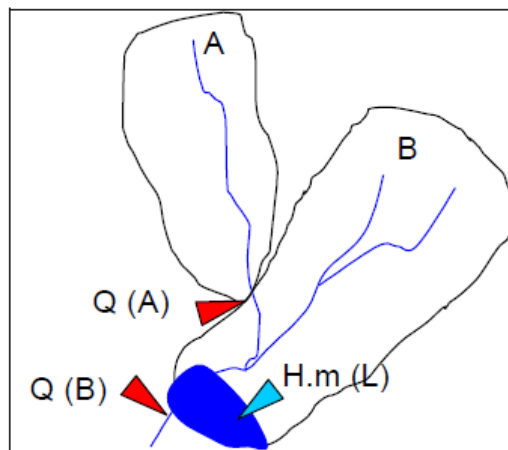


Fig 5-12: Tipos de cierres IHMS/HBV.

En este trabajo se tienen en total 16 cuencas con datos observados: 13 cuencas con punto de cierre y 3 con lago en la desembocadura.

Cabe mencionar que en ninguno de los tres lagos que se encuentran en el cierre de su respectiva subcuenca (lagos Aluminé, Ñorquinco y Quillén) se tienen, en la actualidad, datos medidos del nivel de agua. Por lo tanto, la calibración sólo se hará con las descargas observadas a la salida del lago.

También es posible calibrar una cuenca sin datos observados si se conocen el caudal en un punto de cierre aguas abajo. Por ejemplo, si no se tienen caudales medidos en la cuenca A, es posible calibrar dicha cuenca conociendo los caudales Q (B).

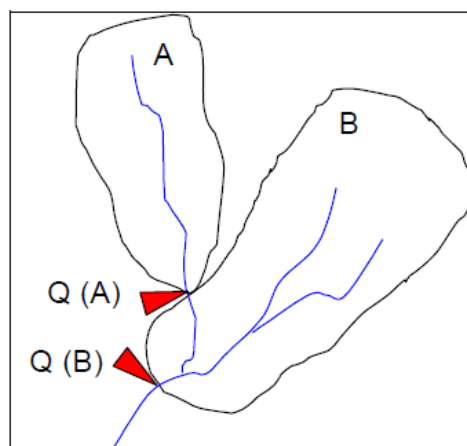


Fig 5-13: Calibración de una cuenca.

En este trabajo se tienen 2 Subcuencas que no tienen estaciones de cierres por lo que tendremos que recurrir a este caso para realizar la calibración. Las subcuencas que no tienen estaciones de cierres son Kilka y desembocadura Catal Lil.

5.2.5. Metodología de calibración de parámetros.

La calibración del modelo va a seguir una secuencia de pasos tal como lo indica el manual IHMS/HBV 2005. Se comenzará calibrando los parámetros de la rutina de volumen y nieve para obtener el ajuste de las crecidas de primavera, luego se continuará con los parámetros de la rutina de suelo para obtener el balance de agua y finalmente se fijará bien la función de respuesta y amortiguación. El método es iterativo y se retroalimenta hasta alcanzar un desempeño del modelo del orden de muy bueno o bueno.

El procedimiento normal para calibrar manualmente es calibrar los parámetros en un cierto orden. Este orden debe ser el siguiente:

1. Parámetros de volumen.
2. Parámetros de nieve.
3. Parámetros del suelo.
4. Parámetros de respuesta.
5. Parámetros de amortiguación.

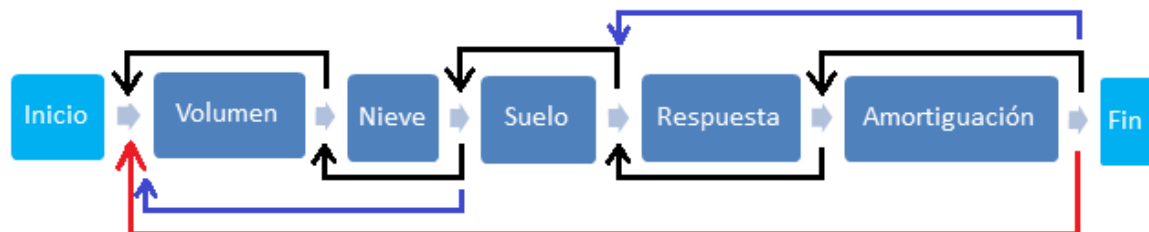


Fig 5-14: Secuencia de calibración de parámetros IHMS/HBV.

Metodología para la calibración

1. Parámetros de Volumen

Se ajustan mediante la observación de la curva que describe la diferencia acumulada. Se calibran los parámetros de volumen que influyen en el volumen total de escorrentía en el siguiente orden:

- **Pcorr.**

Significado: Factor de corrección general de la precipitación. Todos los valores de precipitación de entrada se multiplicarán por este factor.

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 0,8 a 1,2.

Afecta a todo el volumen total. Pcorr=1 y no debe ser calibrado si los datos de entrada de precipitaciones en las estaciones son consistentes y validados.

- **sfcf.**

Significado: Factor de corrección en nevadas.

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 0,8 a 1,4.

Afecta al volumen total de la crecida de primavera. Para zonas boscosa $\text{fosfcf} * \text{sfcf}$.

- **rfcf.**

Significado: Factor de corrección en lluvias.

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 0,9 a 1,3.

Afecta al volumen total del resto del año. Se recomienda que la relación entre (rfcf/sfsc) no sea mayor que 1,5.

2. Parámetros de Nieve.

Se ajustan los parámetros que rigen la acumulación y fusión de nieve:

- **tt.**

Significado: temperatura umbral (°C)

Unidad: °C.

Variabilidad: -2 a +2.

El parámetro tt debe ser estudiado con el fin de llegar el momento en que comienza la acumulación de nieve.

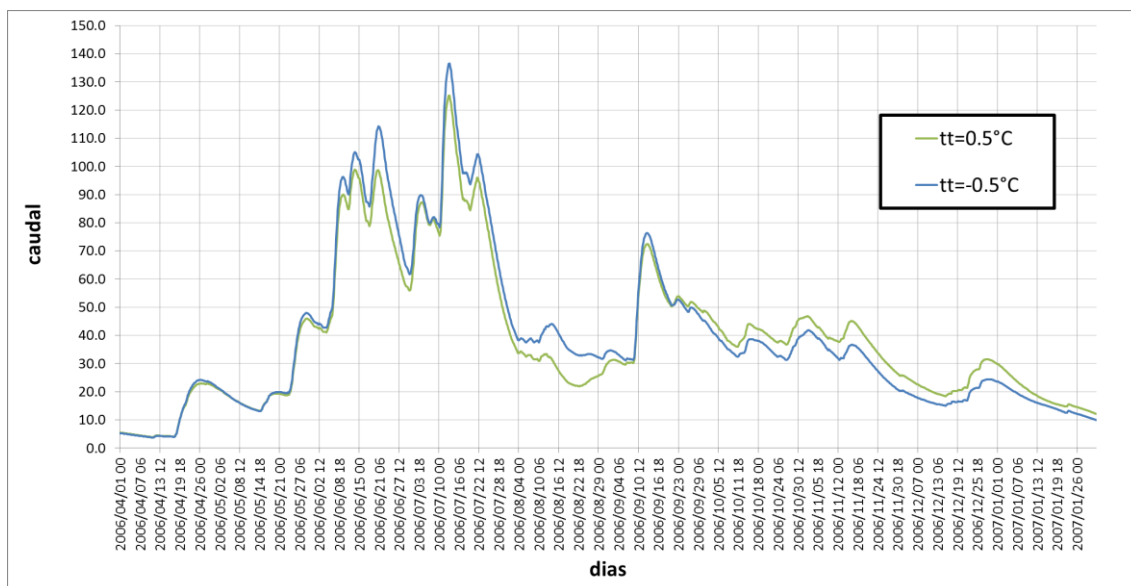


Fig 5-15: Parámetro tt

- **dttm.**

Significado: Valor añadido a tt para alcanzar la temperatura umbral de fusión de nieve. (dttm+tt). Por lo general este valor es cercano a 0°.

Unidad: °C.

Variabilidad: -1 a 1.

El parámetro dttm (por ejemplo, tt + dttm) está calibrado con el fin de obtener el tiempo de la fusión de la nieve en la primavera y durante períodos ocasionales de derretimiento de la nieve durante el invierno. Mientras tt y dttm decide el momento en que comienza el deshielo.

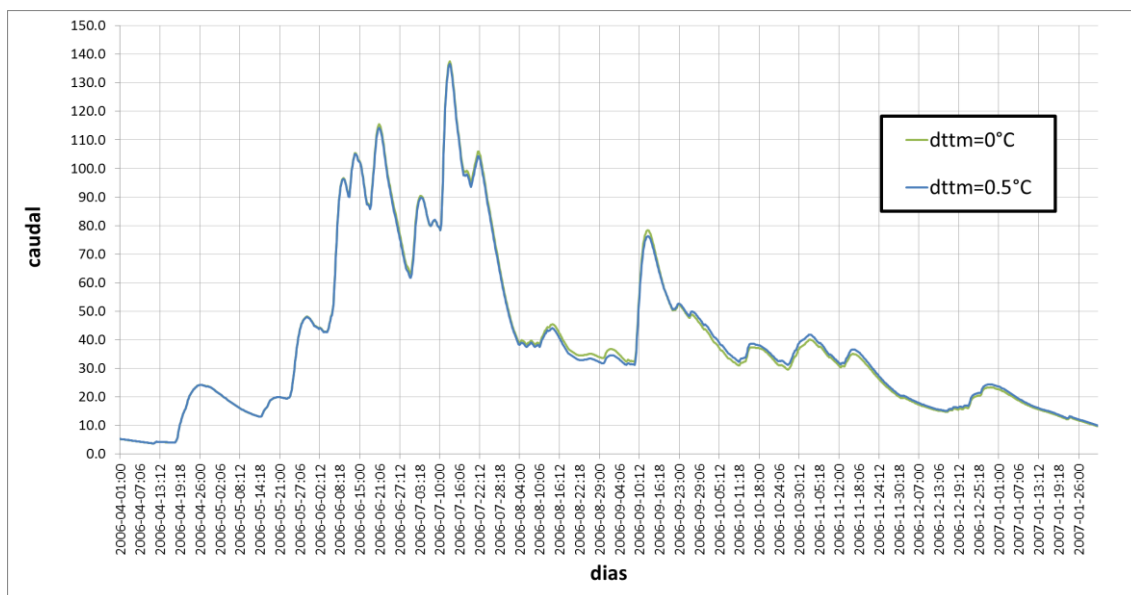


Fig 5-16: Parámetro dttm

- **tti.**

Significado: intervalo de temperatura umbral - una mezcla de lluvia y nieve. tti es en la mitad del intervalo.

Unidad: °C.

Variabilidad: 0 a 2.

- **Cfmax.**

Significado: factor de fusión de nieve grados-día

Unidad: mm/°C al día.

Variabilidad: 1 a 10.

Cfmax es el parámetro que determina la tasa de derretimiento de la nieve. Por lo tanto, la pendiente de la curva de descarga se rige por Cfmax durante los períodos de fusión. Una disminución del valor del parámetro Cfmax determina un alargamiento del período de fusión, y un su aumento, la disminución de tal período.

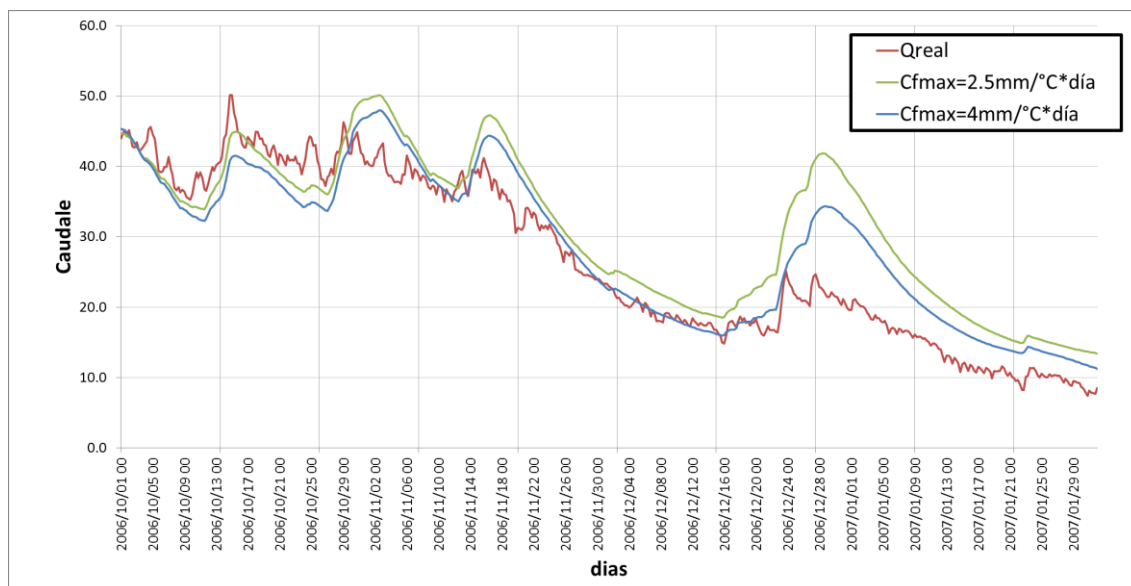


Fig 5-17: Parámetro Cfmax.

- **Focfmax.**

Significado: factor de fusión para las zonas forestales.

Unidad: adimensional.

Variabilidad: 0,5 a 1.

El parámetro Focfmax permite alargar o acortar el período de fusión de las áreas clasificadas como 'bosques'. El parámetro representa un factor que, multiplicado por CFMAX determina el valor del coeficiente de fusión en las zonas caracterizadas por cobertura forestal.

- **Cfr.**

Significado: Factor para volver a congelar el agua en el manto de nieve.

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 0 a 0,1.

Se adopta un coeficiente de recongelamiento de 0.05.

3. Parámetros de Suelo.

La rutina de suelo en el modelo HBV se rige por dos relaciones bastante simples, que se muestran a continuación:

1° - Precipitación efectiva (ΔQ) en función de la humedad del suelo (SM).

El porcentaje de precipitación que contribuye a la descarga aumenta gradualmente a medida que la humedad del suelo (SM) aumenta debido a que una gran parte de la capa alcanza su capacidad de campo (FC).

$$\Delta Q = \Delta P * \left(\frac{SM}{FC}\right)^B$$

2° - Evapotranspiración (ET) en función de La humedad del suelo (SM).

La evapotranspiración real será igual a la evapotranspiración potencial o un valor reducido calculado mediante el parámetro de punto de marchitez del suelo (LP*FC).

$$ET_{real} = ET_{pot} * \frac{SM}{(LP * FC)} \quad si \rightarrow SM < (LP * FC)$$

$$ET_{real} = ET_{pot} \quad si \rightarrow SM \geq (LP * FC)$$

El punto de marchitez es un límite de humedad del suelo por debajo del cual la evapotranspiración real es menor que la potencial con una reducción en el desarrollo de las plantas. La siguiente figura ilustra la relación entre la ET_{real} y (LP*FC) descrita en la ecuación anterior. Obviamente, (LP*FC) ha de tener un valor inferior a FC para que tenga un sentido físico.

Por lo tanto, participan en estos procesos, los parámetros FC, Beta y LP, y se deben calibrar observando principalmente la descarga de verano y otoño. Estos parámetros también influyen en el volumen total. Por ejemplo, si FC es demasiado alto, se puede observar que el nivel de agua del suelo está aumentando durante las tormentas del otoño. Esto se ve como pequeñas jorobas en la curva de la humedad del suelo.

- **FC.**

Significado: almacenamiento de humedad del suelo máximo.

Unidad: mm.

Variabilidad: 50 a 500.

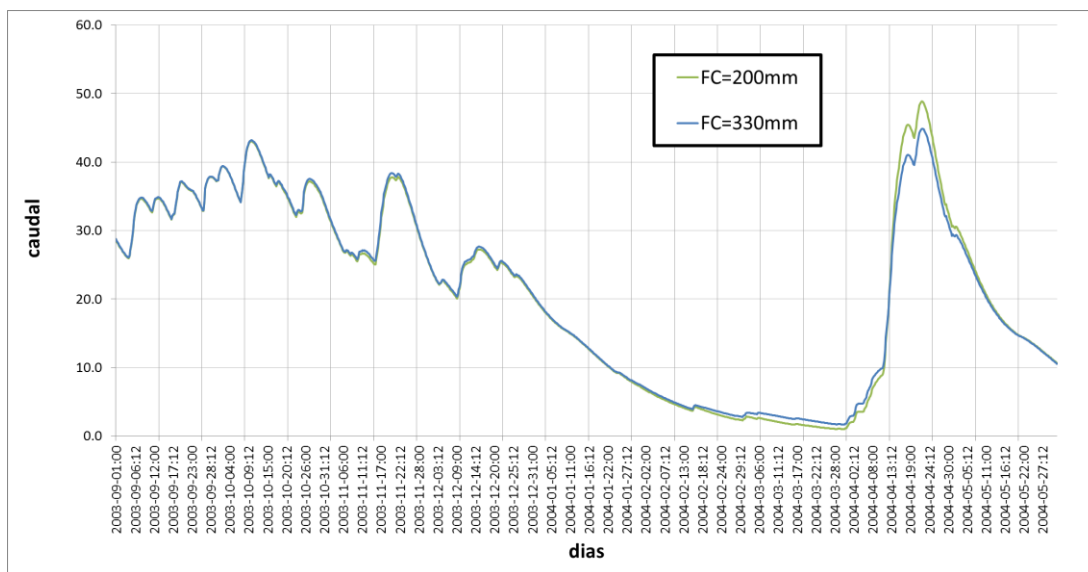


Fig 5-18: Parámetro FC.

- **Beta.**

Significado: coeficiente de forma.

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 1 a 6.

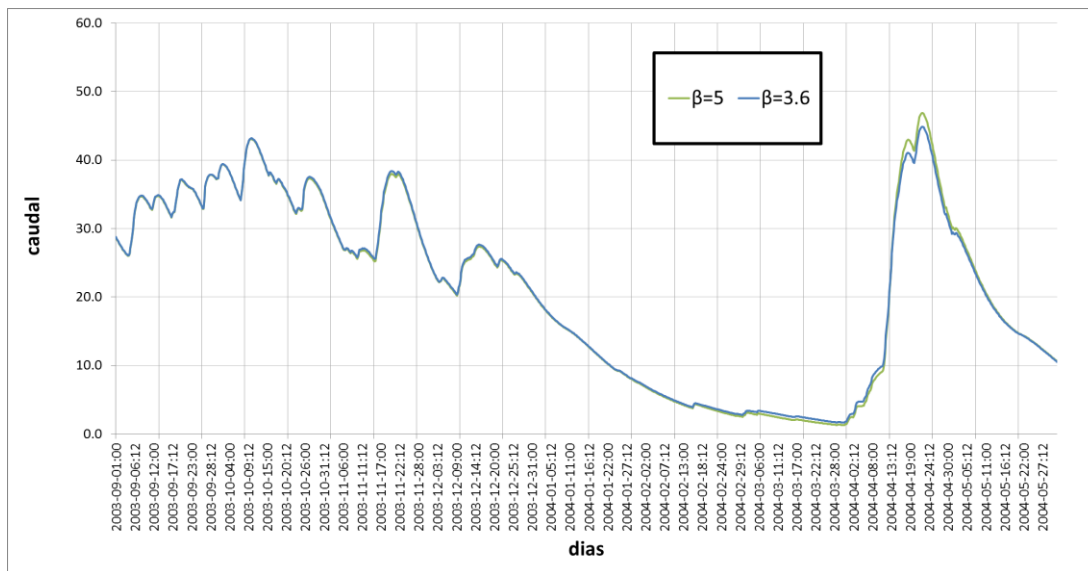


Fig 5-19: Parámetro Beta.

- **LP:**

Significado: umbral para la reducción de la evaporación.

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 0,3 a 1.

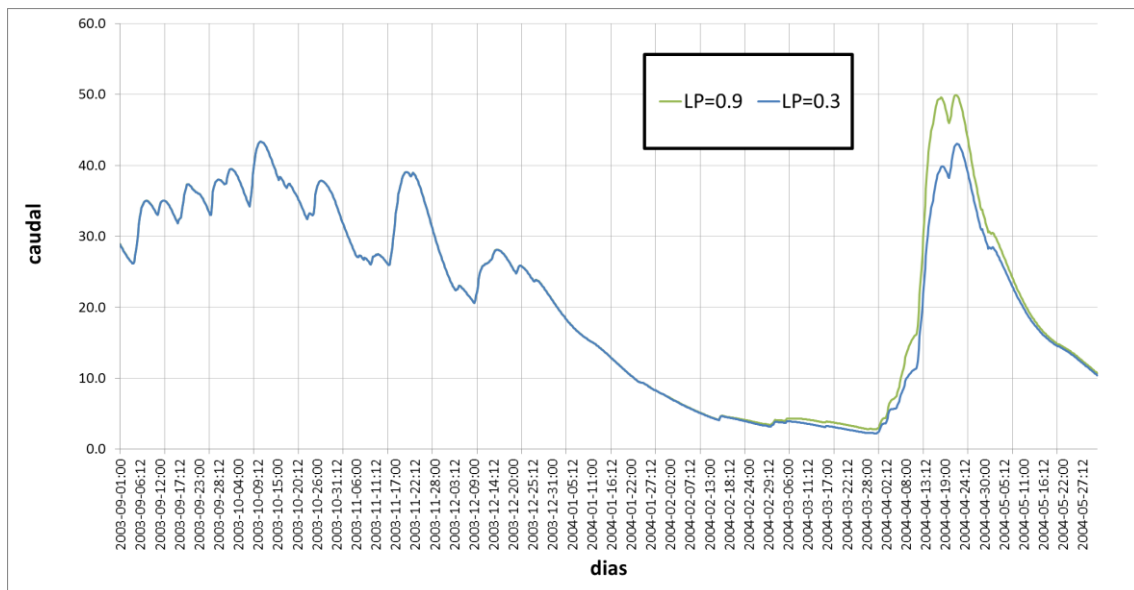


Fig 5-20: Parámetro LP.

- **Cflux**

Significado: Flujo capilar desde el cuadro de respuesta superior a la zona de humedad del suelo

Unidad: mm/día.

Variabilidad: 0 a 2.

El parámetro Cflux, que también pertenece a la rutina de agua del suelo describe el flujo capilar de la caja de respuesta superior a la zona de agua del suelo. Este fenómeno no fue considerado en el trabajo y se indicó un valor de Cflux igual a cero para todos los casos.

La evaporación potencial (ET_{pot}) es calculada por el modelo (si $A_{thorn} > 0$), por una variación simplificada de la ecuación de Thornthwaite:

$$ET_{pot} = A_{thorn} * T \quad \text{si } \rightarrow T > 0^{\circ}$$

$$ET_{pot} = 0 \quad \text{si } \rightarrow T \leq 0^{\circ}$$

- **Athorn**

Significado: Coeficiente evapotranspiración potencial Thornthwaite.

Unidad: mm/°C.

Variabilidad: 0,2 a 0,3.

Athorn debe ser calibrado pero en este trabajo el valor fue calculado para cada subcuenca como se vio en la sección 4.3.4.

La evaporación de los lagos será igual a la evaporación potencial, pero puede ser modificado por los siguientes parámetros:

- **Cevpl**

Significado: Factor de modificación de evaporación en lagos.

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 0.7 a 1.2.

El parámetro Cevpl se utiliza para calcular la evaporación del lago, y multiplica a la evaporación potencial. Solo tiene lugar cuando no halla hielo en la superficie del lago.

- **Ttice**

Significado: Temperatura umbral de congelamiento del lago.

Unidad: °C.

Variabilidad: -5 a 0.

Se supone que el lago está cubierto de hielo cuando la temperatura del agua T_A es inferior al valor dado por el parámetro Ttice.

- **Lakedays**

Significado: Relación temperatura del aire y del agua.

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 30.

El parámetro Lakedays es una medida de lo rápido que la temperatura de la superficie del lago seguirá un cambio en la temperatura del aire. Cuanto más profundo es el lago, el valor es más alto.

4. Parámetros de Respuesta.

Se calibran los parámetros de respuesta, k_4 , Perc, KHQ, HQ y alfa. Estos parámetros distribuyen la descarga calculada en el tiempo y por lo tanto están influyendo en la forma del hidrograma, pero no en el volumen total.

- **Hq.**

Significado: Flujo de alto nivel.

Unidad: mm/día.

Variabilidad: 5 a 13.

Hq no se calibra después de que se ha calculado..

- **KHQ.**

Significado: Coeficiente de recesión para el cuadro de respuesta superior cuando la descarga es HQ.

Unidad: 1/día.

Variabilidad: 0.005 a 2.

Para calibrar KHQ, debe ser estudiado la recesión en caudales altos. Cuanto mayor sea KHQ, los picos serán más altos y la respuesta del hidrograma más dinámica.

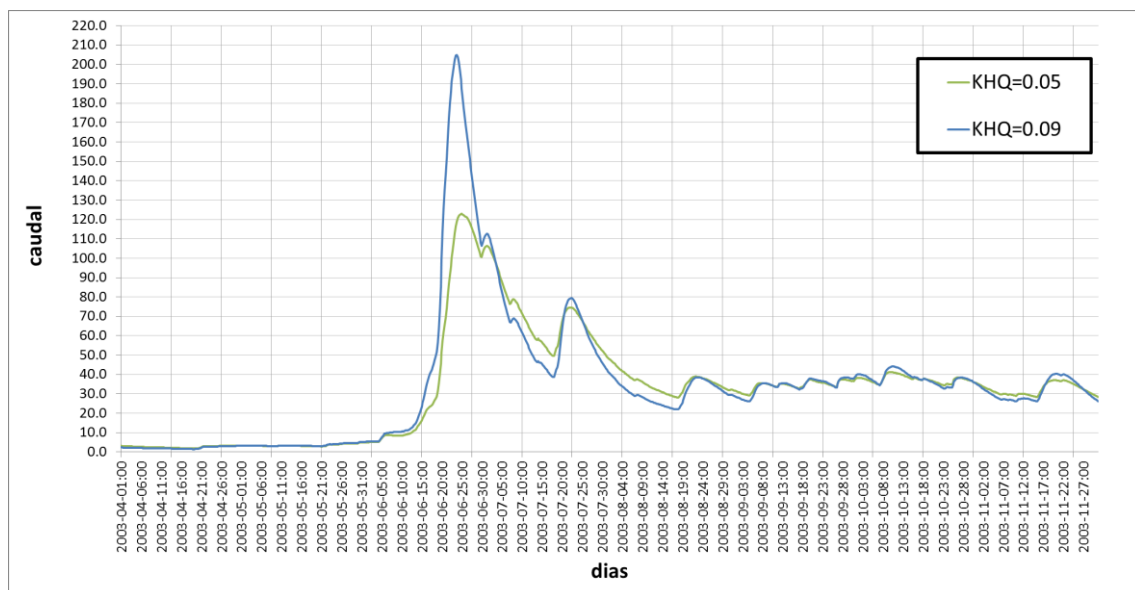


Fig 5-21: Parámetro KHQ.

- **Alfa.**

Significado: Medida de no linealidad de la ecuación de descarga del depósito superior.

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 0,5 a 1,1.

Cuando los caudales de verano, así como la dinámica de los picos se simulan satisfactoriamente, se calibra alfa. Alfa se utiliza con el fin de adaptarse a los picos más altos en el hidrograma. Cuanto más alto sea el alfa más alto serán los picos y más rápida será la recesión.

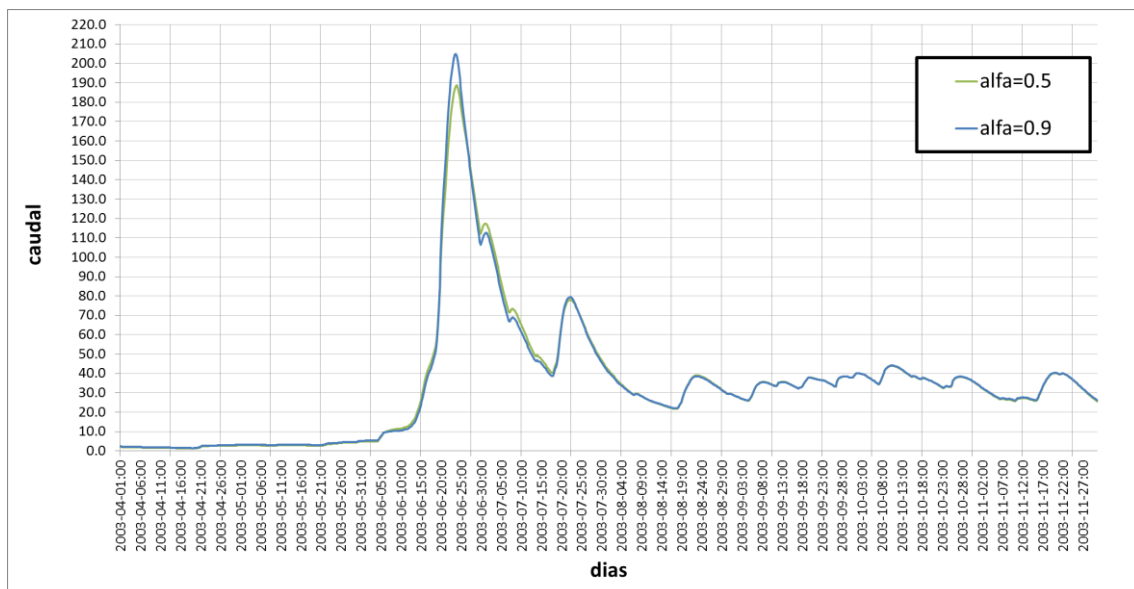


Fig 5-22: Parámetro Alfa.

- **PERC.**

Significado: Percolación desde la parte superior a la caja de respuesta inferior.

Unidad: mm.

Variabilidad: 0 a 4.

El flujo de base se ajusta con PERC y k4. El flujo de base se estudia preferentemente durante los períodos de flujo mínimo en verano. El nivel del flujo de base se ajusta con PERC, un bajo valor de PERC da como resultado un flujo de base bajo. K4 describe la recesión del flujo de base por lo que la pendiente de la misma es correcta. Es importante notificar que al calibrar el flujo de base, es una necesidad para tener una gran escala.

Esto se debe a las diferencias entre el hidrograma observado y calculado son difíciles de ver en estas partes mínimas de flujo.

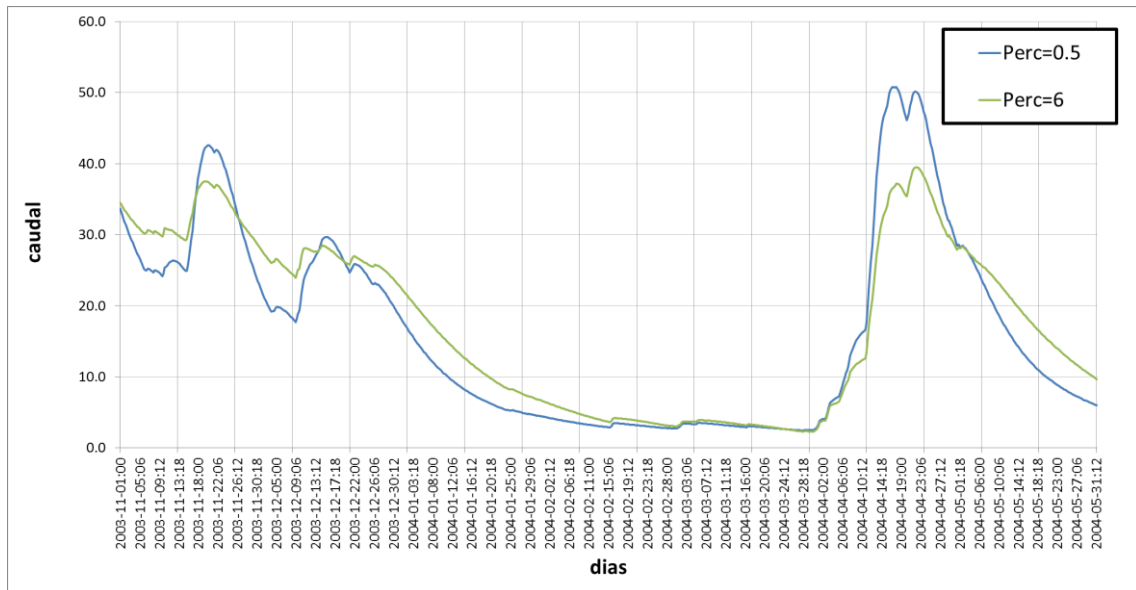


Fig 5-23: Parámetro Perc.

- **k4.**

Significado: Describe la recesión de caudal base.

Unidad: 1/día.

Variabilidad: 0.001 a 0.1.

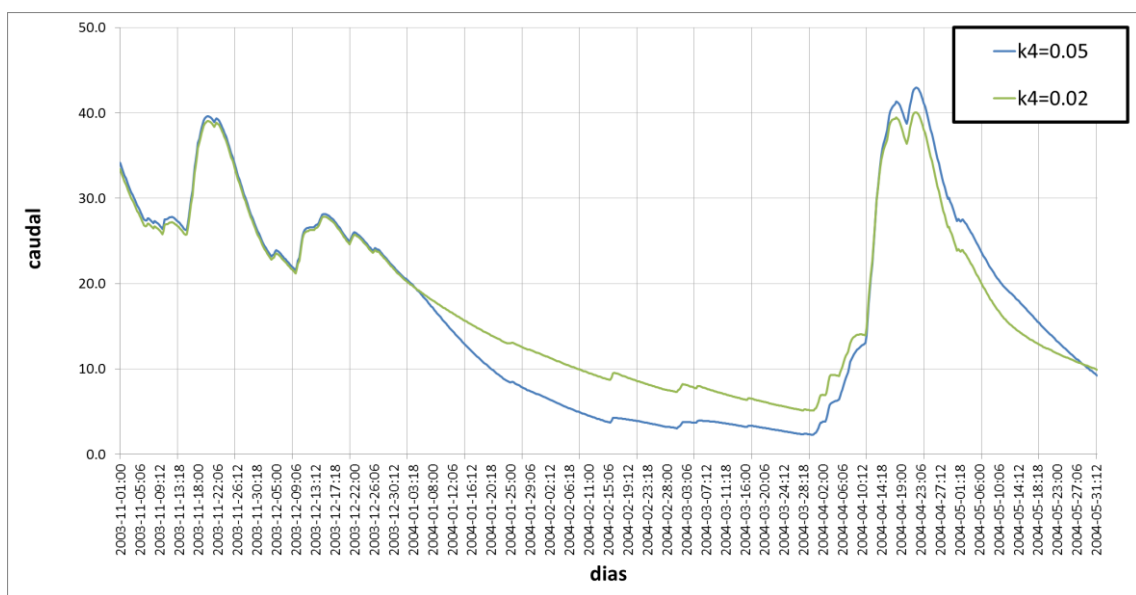


Fig 5-24: Parámetro K4.

5. Parámetros de Amortiguación.

- **Maxbas.**

Significado: Retardo, longitud de la función de peso de transformación.

Unidad: periodos (0=0,25).

Variabilidad: 0 a 7.

Se debe calibrar el parámetro de amortiguación Maxbas. Maxbas describe si la zona responde rápidamente o lentamente. Entre 1 y 7 intervalos. Si Maxbas = 0, el modelo adopta el menor el intervalo, en este caso será de 6 horas (Maxbas=0,25).

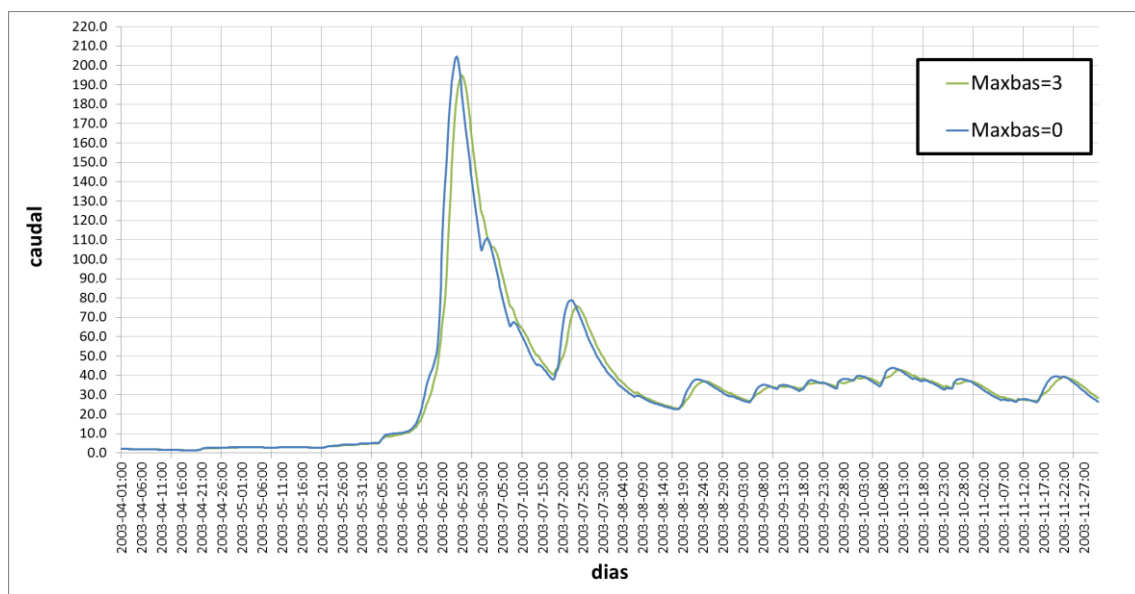


Fig 5-25: Parámetro Maxbas.

- **Lag (retraso) y Damping (amortiguación).**

Lag.

Significado: Retardo, número de retrasos (segmentos) en la propagación de caudales.

Unidad: días.

Variabilidad: 0 a 2. (Se tienen cuencas chicas)

Damp.

Significado: Amortiguación en la propagación de caudales

Unidad: Adimensional.

Variabilidad: 0 a 1.

La traslación entre subcuencas es manejado por el parámetro de retardo (Lag), que establece enlaces entre subcuencas. Si la calibración de Lag no mejora R^2 o no se observan mejoras en el hidrograma cuando es inspeccionado visualmente, entonces no será utilizado en absoluto. Si el Lag es en número entero “n” (días), el cauce de río (segmento) se divide en “n” segmento que está dado por el número de retrasos.

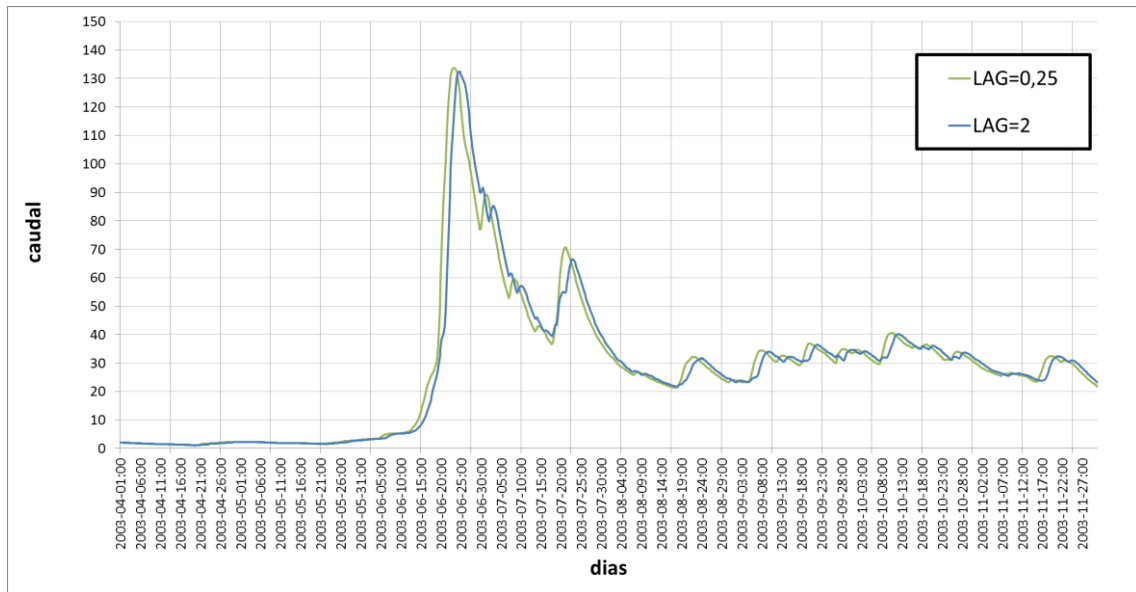


Fig 5-26: Parámetro LAG.

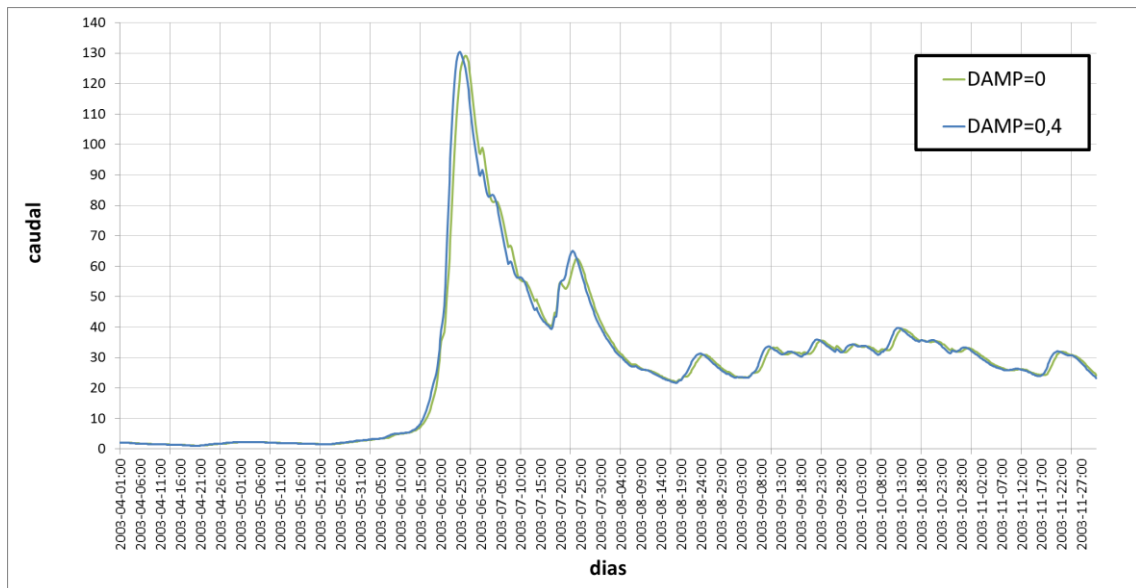


Fig 5-27: Parámetro DAMP.

- **Trloss. (perdidas).**

Significado: Pérdidas de transmisión en la propagación del caudal en los tramos de ríos entre subcuencas.

Unidad: m³/s.

Variabilidad: 0 a 1.

También es posible dar cuenta de las pérdidas de transmisión, es decir, las pérdidas que se producen cuando el agua de una subcuenca de aguas arriba se infiltra en el lecho del río de la subcuenca actual. Las pérdidas de transmisión máximas se dan por el parámetro *trloss* en m³/s. El agua infiltrada pasa a la caja de respuesta menor. Mientras que la caja está vacía, las pérdidas por infiltración son iguales a *trloss*. A medida que el nivel de agua en el cuadro de respuesta aumenta entonces las pérdidas por infiltración disminuyen según una función lineal, hasta que se convierte en cero cuando el nivel es perc/k_4 . En el presente trabajo no se consideran las pérdidas por transmisión.

5.3. Validación.

5.3.1. Introducción.

Debido a que a los resultados del proceso de calibración está condicionado por varios factores (calidad de los datos, función objetivo, y metodología de optimización), se realiza una prueba de validación. El método más usado es probar la ejecución del modelo con una porción de datos no usados en la calibración. Estos datos de comprobación deben contener eventos hidrológicos de la cuenca dentro del rango que se espera proporcionar con el modelo.

El propósito de esta acción es detectar cualquier error que se hubiera producido por imperfecciones de las estimaciones de los parámetros. En este caso se debe revisar críticamente el procedimiento de calibración para verificar si ciertas hipótesis no son adecuadas o válidas.

5.3.2. Periodo de tiempo de Validación.

El periodo de registros o datos para la validación del modelo comprende cuatro años hidrológicos; desde 01 de Abril de 2008 hasta 31 de Marzo del 2012. La longitud de estos registros también dependerá de la cantidad y variabilidad de eventos hidrológicos

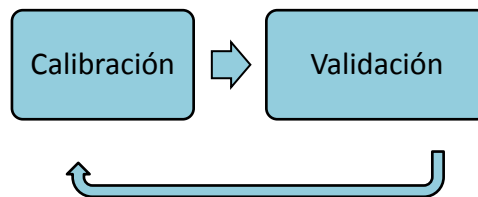
que contengan. Para esto, también cada año hidrológico se clasificó según la probabilidad de excedencia del derrame acumulado en la desembocadura del río Collón Cura. La variabilidad de la clasificación de los años del periodo seleccionado va desde Seco a Húmedo.

Tabla 5-10: Clasificación hidrológica por derrame en periodo de validación.

Año	2008	2009	2010	2011
Clasificación Derrame	Medio	Medio/ Húmedo	Seco	Seco

5.3.3. Criterio de Evaluación.

Como se mencionó anteriormente, en el capítulo de calibración, se adopta el criterio de Moriasi para evaluar el desempeño del modelo. En caso de no alcanzar con el objetivo de un desempeño muy bueno o bueno, se toma la decisión de volver atrás, al proceso de calibración, de manera iterativa hasta alcanzarlo.



5.4. Test.

5.4.1. Introducción.

Una vez calibrado y validado el modelo, se realiza la prueba de test para establecer la precisión final, según el criterio de interpretación de los parámetros estadísticos de Moriasi. La evaluación en esta etapa es única y determina un valor final de la bondad de ajuste del modelo, a diferencia de las etapas anteriores en la que se busca alcanzar un desempeño determinado de manera iterativa.

5.4.2. Periodo de tiempo de Test.

Con el modelo calibrado y validado, se realizó la simulación o test para un período de 15 años desde 01-04-2000 hasta 31-03-2015. En este caso, se incluyeron los periodos de calibración y validación y un periodo final de 3 años desde el 01-04-2012 hasta el 31-03-2015.

También, en esta instancia, cada año hidrológico se clasificó según la probabilidad de excedencia del derrame acumulado en la desembocadura del río Collón Cura. La variabilidad de la clasificación de los años del periodo seleccionado va desde Seco a Muy Húmedo.

Tabla 5-11: Clasificación hidrológica por derrame en periodo de Test.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Clasificación Derrame	Medio	Muy Húmedo	Medio/Húmedo	Medio	Medio	Húmedo	Muy Húmedo	Seco	Medio	Medio/Húmedo	Seco	Seco	Seco	Medio/Seco	Medio/Seco	Medio

5.4.3. Criterio de Evaluación.

El resultado del proceso de test del modelo HBV, se evalúa siguiendo el criterio de Moriasi al igual que en la calibración y validación. Es decir, se determina el desempeño final del modelo según la interpretación del valor de los parámetros estadísticos.



Tabla 5-12: Interpretación de los parámetros estadísticos.

Criterio	Calibración	Validación	Test
PBIAS			
R ²			
RSR			
Interpretación Modelo	MB-B-S-NS	MB-B-S-NS	MB-B-S-NS

Convenciones: Muy Bueno (MB), Bueno (B), Satisfactorio (S), No Satisfactorio (NS).
Fuente: elaboración propia.

6. Análisis de Resultados

6.1. Parámetros de calibración.

Para el modelo fue necesario utilizar 28 parámetros de calibración para representar los procesos físicos en las rutinas y lograr los requerimientos de calidad del modelo.

De los 28 parámetros, cinco (5) fueron calculados en el desarrollo del trabajo, en otros siete (7) se adoptó un valor como se indicó en el capítulo 5.2.5.; resultando así, 16 parámetros de ajuste de calibración.

Todos los parámetros se encuentran dentro del rango de variabilidad sugerido por el manual.

Los parámetros de calibración finales para el proceso de calibración y validación se resumen en la siguiente tabla para cada subcuenca.

- Parámetros calculados (Rojo).
- Parámetros estándar o adaptados (Verde).
- Parámetros ajustados. (Azul).

Tabla 6-1: Parámetros de Calibración del modelo por grupos

tipo	parametros	ALU/LAGO	ALU/EXBAL	NORQUINCO	PUL/CONF	KILKA	ALU/CEF	RUCA/PIED	ALU/RAHUE	QUI/OFEL	QUI/SROSA	ALU/SIB	ALU/MLUNA	MAL/MAMUIL	MAL/PTE	ALU/ALINCO	CATAN/COL	CATAN/COIF	ALU/HUE
1	athorn	0.22	0.20	0.21	0.20	0.22	0.20	0.20	0.18	0.21	0.19	0.18	0.18	0.21	0.17	0.18	0.20	0.17	0.17
2	hq	5.97	7.07	10.12	8.01	6.05	6.65	8.15	6.94	13.01	9.74	6.55	7.05	11.47	9.74	6.70	6.05	5.52	5.52
3	pcalt	-0.036	0.039	-0.004	0.034	-0.021	0.001	0.040	-0.016	-0.024	0.012	-0.018	-0.009	0.008	0.040	0.095	0.022	0.046	-0.049
4	pcorr	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	tcalt	0.470	0.544	0.530	0.563	0.544	0.544	0.569	0.558	0.523	0.563	0.540	0.531	0.549	0.562	0.585	0.611	0.564	0.543
1	cevpl	1.10	1.10				1.10		1.10				1.10						
2	cflux	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
3	cfr	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
4	lakedays	30		30				30		30				30					
5	maxbas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	ttice	-5.00		-5.00				-5.00		-5.00				-5.00					
7	whc	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
1	alfa	0.90	1.30	0.90	0.90	1.20	1.10	0.90	1.00	0.90	0.70	1.00	1.20	0.60	0.90	0.90	1.10	0.90	0.90
2	beta	3.80	4.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.50	3.00	3.50	3.00	4.00	3.50	3.50	3.50	3.00	3.00	3.00	3.00
3	cfmax	2.65	3.70	4.00	5.00	4.00	5.00	3.50	4.00	3.50	4.00	3.50	4.50	4.00	4.50	4.50	2.00	2.00	4.00
4	dtm	0.50	0.20	0.50	0.50	0.50	0.50	0.80	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
5	fc	250	300	400	380	200	300	330	300	400	360	300	350	320	300	360	150	200	300
6	fcfmax	0.80	0.80	0.90	0.90	0.90	1.00	0.90	1.00	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
7	fosfcf	0.80	0.80	0.90	0.90	0.90	1.00	0.90	0.90	0.95	0.95	0.90	0.95	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
8	gmelt													3.50					
9	k4	0.020	0.020	0.035	0.030	0.020	0.020	0.035	0.040	0.023	0.050	0.040	0.030	0.018	0.030	0.040	0.020	0.020	0.030
10	khq	0.07	0.15	0.10	0.10	0.18	0.12	0.09	0.11	0.11	0.07	0.14	0.11	0.06	0.11	0.07	0.15	0.10	0.08
11	lp	0.50	0.60	0.50	0.50	0.40	0.50	0.40	0.50	0.60	0.50	0.40	0.60	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
12	perc	2.50	2.80	2.80	2.80	3.00	3.00	2.70	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.00	3.00	2.00	0.80	1.00
13	rfcf	0.94	1.10	0.85	0.95	0.90	1.00	0.97	1.45	0.93	1.03	0.70	1.35	0.97	1.25	0.80	1.45	0.90	0.95
14	sfcf	0.90	0.95	0.80	0.97	1.00	1.00	0.92	1.20	0.96	1.00	0.70	1.35	0.96	1.20	0.84	1.00	0.90	0.95
15	tt	1.00	1.00	0.40	0.60	0.00	0.50	0.50	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	0.50	1.00	1.00	0.50
16	tti	0.50	0.50	0.30	0.30	0.30	0.40	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.30	0.30	0.30	0.50	0.50	0.50

6.2. Pesos de las Estaciones.

El resultado de los pesos (ci) de las estaciones que determinan las temperaturas y precipitaciones medias de cada subcuenca se resumen a continuación.

Tabla 6-2: Atribución de los pesos de precipitaciones para cada subcuenca.

COLLÓN CURÁ - Precipitación: atribución de los pesos																			
CÓDIGO	ESTACIÓN	SUBCUENCAS															INCIDENCIA [%]		
		ALU/LAGO	ALU/EXBA	ÑORQUINCO	PUL/CONF	KILKA	ALU/CEF	RUCA/PIED	ALU/RAHUE	QUI/OFEL	QUI/SROSA	ALU/SIB	ALU/MLUNA	MAL/MAMUIL	MAL/PTE	ALU/ALINCO		CATAN/COL	CATAN/COIF
p68103	Litrán Abajo	0.200				0.192													2%
p68004	Batea Mahuida Ab.	0.431	0.067	0.048															3%
p68222	Casa Quila 1800	0.143		0.181						0.058									2%
p60003	Sda Lago Alumine	0.226	0.671		0.412	0.181	0.611	0.592	0.182							0.079			16%
p69009	Nac. Catan Lil		0.129			0.566	0.089		0.238							0.242	0.067		7%
p64101	Lago Ñorquinco		0.133	0.501	0.186			0.084											5%
p62502	Nac. A° Malalco			0.270				0.037		0.114	0.008								2%
p62004	La Ofelia				0.262		0.131	0.287	0.097	0.364	0.558	0.035	0.238	0.290					13%
p60007	Rahue				0.140	0.061	0.169		0.483	0.424	0.737	0.599		0.158	0.148	0.093	0.032		17%
p62107	Añihueraqui									0.464	0.010			0.235					4%
p69008	Las Coloradas											0.150	0.022		0.304	0.586	0.714	0.387	12%
p61006	Ea. Mamuil Malal											0.078	0.141	0.295	0.242				4%
p72003	L° Huechulafquen																		0%
p72106	Pto Antiao													0.180					1%
p72107	Cerro Huicuifa																		0%
p70003	Casa de Lata														0.402	0.487		0.122	6%
p60027	Huechahue													0.198	0.061		0.187	0.414	5%
p71001	Ea Collunco																	0.077	0%
	Total de los pesos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100%

Tabla 6-3: Atribución de los pesos de temperaturas para cada subcuenca.

COLLÓN CURÁ - Temperaturas: atribución de los pesos																			
CÓDIGO	ESTACIÓN	SUBCUENCAS															INCIDENCIA [%]		
		ALU/LAGO	ALU/BALSA	ÑORQUINCO	PUL/CONF	KILKA	ALU/CEF	RUCA/PIED	ALU/RAHUE	QUI/OFEL	QUI/SROSA	ALU/SIB	ALU/MLUNA	MAL/MAMUIL	MAL/PTE	ALU/ALINCO		CATAN/COL	CATAN/COIF
t68103	Litrán Abajo	0.363	0.285			0.331	0.184												9%
t68004	Batea Mahuida Ab.	0.089																	0%
t68222	Casa Quila 1800	0.206	0.255	0.332	0.289														1%
t60003	Sda Lago Alumine	0.342	0.416	0.156	0.571	0.321	0.570	0.474	0.338							0.120			15%
t69009	Nac. Catan Lil					0.241										0.053			2%
t64101	Lago Ñorquinco		0.044	0.372	0.065		0.049												4%
t62502	Nac. A° Malalco			0.140	0.075				0.123	0.214									3%
t62004	La Ofelia							0.123	0.038	0.403	0.462	0.312	0.363						13%
t60007	Rahue					0.107	0.197	0.280	0.452	0.154	0.269	0.283	0.382		0.319	0.073	0.058		14%
t62107	Añihueraqui									0.229	0.072			0.130					3%
t69008	Las Coloradas								0.172	0.197	0.375	0.151			0.246	0.754	0.669	0.206	17%
t61006	Ea. Mamuil Malal											0.030	0.104	0.288	0.184	0.234			7%
t72003	L° Huechulafquen													0.205	0.115				0%
t72106	Pto Antiao													0.377					0%
t72107	Cerro Huicuifa																		0%
t70003	Casa de Lata														0.518	0.201		0.050	1%
t60027	Huechahue														0.183			0.223	3%
t71001	Ea Collunco																	0.053	1%
	Total de los pesos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100%

Del análisis de incidencia se deduce que las estaciones más representativas para el cálculo de precipitaciones y temperaturas son: Salida Lago Aluminé, La Ofelia, Rahue y Las Coloradas. Entre las cuatro suman una incidencia del 58% en las precipitaciones y 60% en las temperaturas.

Por este motivo, resulta fundamental asegurar el buen funcionamiento de las mismas y la consistencia de los datos para mantener la calidad del modelo.

6.3. Calidad del modelo – Criterio de Moriasi.

Se obtuvieron los siguientes niveles de desempeño para el proceso de calibración, validación y test de cada subcuenca siguiendo la interpretación de los parámetros estadísticos del criterio de Moriasi. Se resumen a continuación:

Tabla 6-4: Estadísticos de calidad del modelo y clasificación de Moriasi.

N°	Subcuencas	Calibración			Validación			Test		
		PBIAS	R ²	RSR	PBIAS	R ²	RSR	PBIAS	R ²	RSR
1	Aluminé en Sda. Lago Aluminé	-0.33	0.951	0.22	0.10	0.930	0.27	-0.45	0.943	0.24
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
2	Aluminé en Ex Balsa Pulmarí	-0.27	0.931	0.26	3.46	0.922	0.28	0.72	0.930	0.26
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
3	Ñorquinco	0.28	0.920	0.28	3.23	0.911	0.30	0.57	0.922	0.28
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
4	Pulmarí en Conf. Pulmarí	0.57	0.944	0.24	1.24	0.920	0.28	1.51	0.940	0.24
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
6	Aluminé en San Ceferino	-2.89	0.934	0.26	4.69	0.926	0.27	-0.30	0.933	0.26
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
7	Rucachoroi en casa de Piedra	4.01	0.872	0.36	-0.43	0.876	0.35	0.06	0.876	0.35
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
8	Aluminé en Rahue	0.86	0.946	0.23	3.68	0.932	0.26	0.54	0.943	0.24
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
9	Quillen en La Ofelia	0.85	0.926	0.27	-2.93	0.931	0.26	-0.32	0.932	0.26
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
10	Quillen en Santa Rosa	2.86	0.942	0.24	-6.63	0.907	0.31	-0.13	0.937	0.25
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
11	Aluminé en La Siberia	-0.57	0.949	0.22	-5.05	0.924	0.28	-3.29	0.945	0.23
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
12	Aluminé en Media Luna	1.04	0.949	0.23	0.81	0.935	0.25	0.42	0.948	0.23
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
13	Malleo en Mamuil Malal	2.22	0.951	0.22	-4.57	0.920	0.28	-0.24	0.945	0.24
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
14	Malleo en Puente Malleo	3.17	0.926	0.27	-4.31	0.908	0.30	-0.60	0.922	0.28
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
15	Aluminé en Alinco	-0.33	0.943	0.24	0.61	0.946	0.23	-1.24	0.946	0.23
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
16	Catan Lil en Las Coloradas	-2.03	0.671	0.57	4.57	0.712	0.54	0.52	0.690	0.56
		MB	B	B	MB	B	B	MB	B	B
18	Aluminé en Huechahue	-1.85	0.941	0.24	-1.61	0.935	0.26	-2.63	0.941	0.24
		MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB

Parámetros estadísticos: PBIAS (sesgo porcentual); R² (índice de Nash y Sutcliffe); RSR (razón de RSME y la desviación estándar de las observaciones).

Interpretación del modelo: MB (Muy Bueno); B (Bueno); S (Satisfactorio); NS (No Satisfactorio).

6.4.Caudales simulados.

Una vez obtenidos los valores definitivos de los distintos parámetros de calibración, después de un proceso iterativo en que se alcanza una mayor aproximación entre los hidrogramas observados y calculados, se grafican para toda la serie de estudio, los caudales simulados de todas las subcuencas. Ver anexo 9.6.

A continuación se grafican los caudales calculados en la estación de aforo de Huechahue, cierre de la cuenca del río Aluminé, en el cual puede observarse la similitud con los caudales observados.

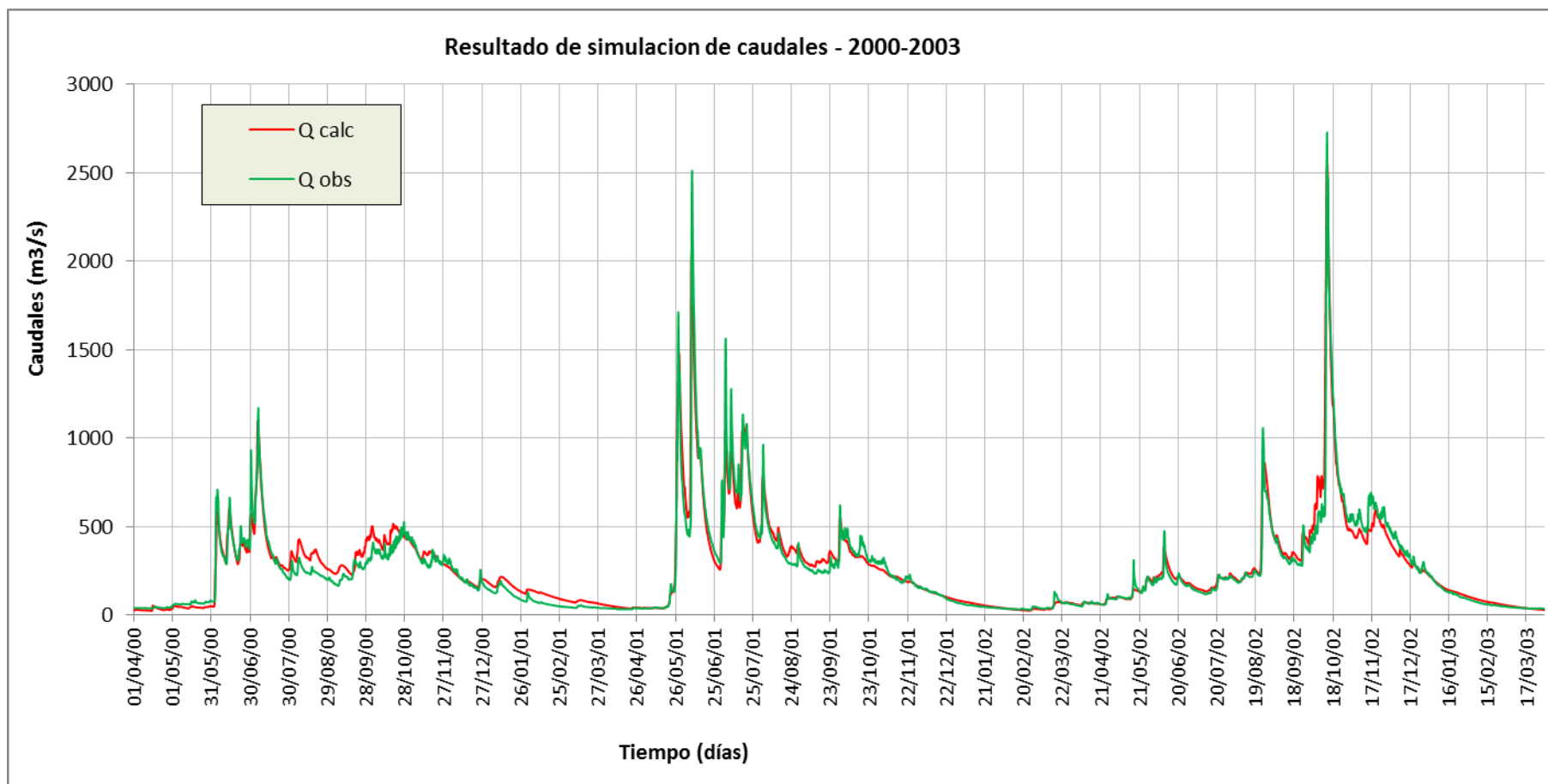


Fig 6-1: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2000-2002.

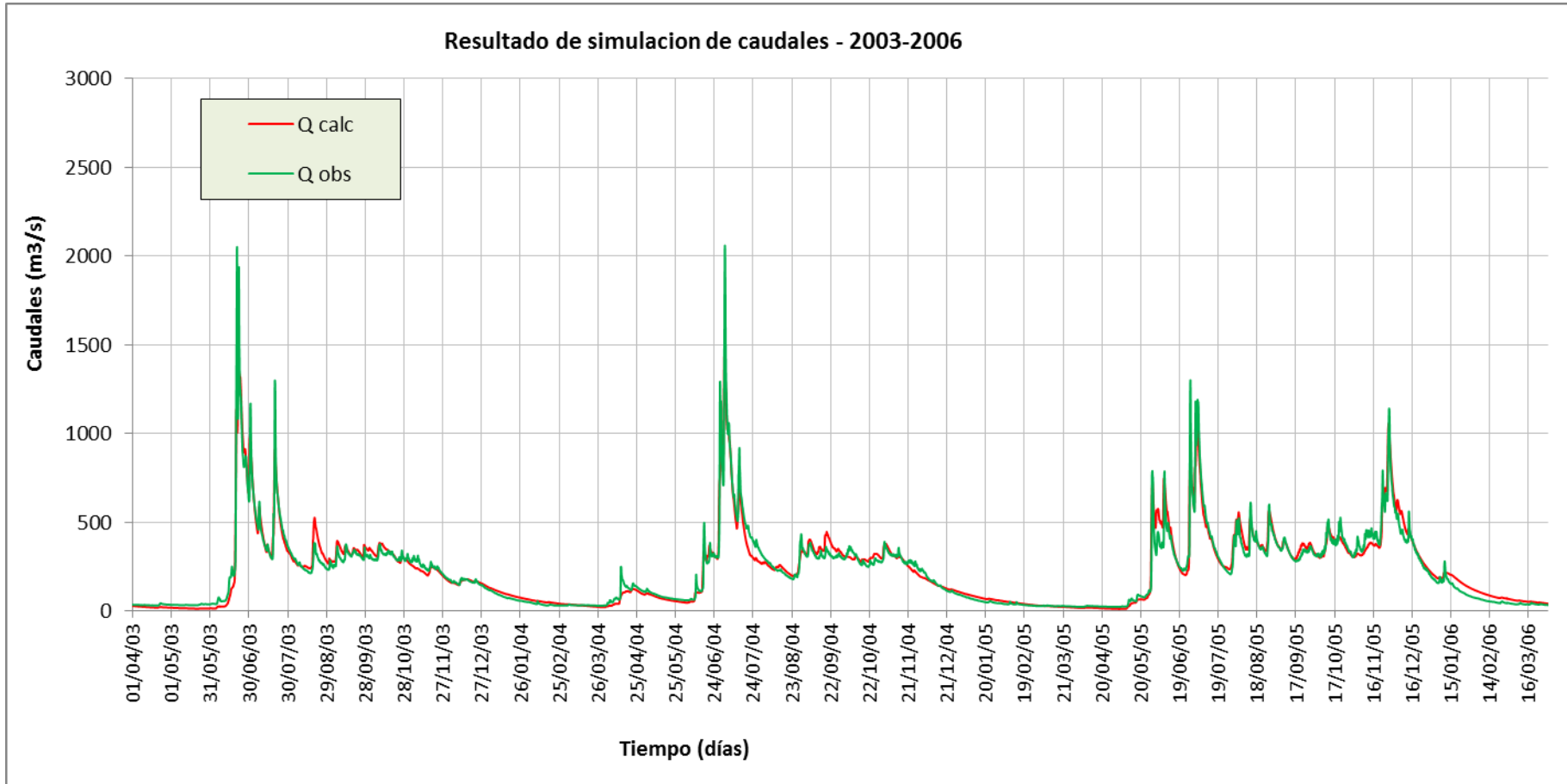


Fig 6-2: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2003-2005.

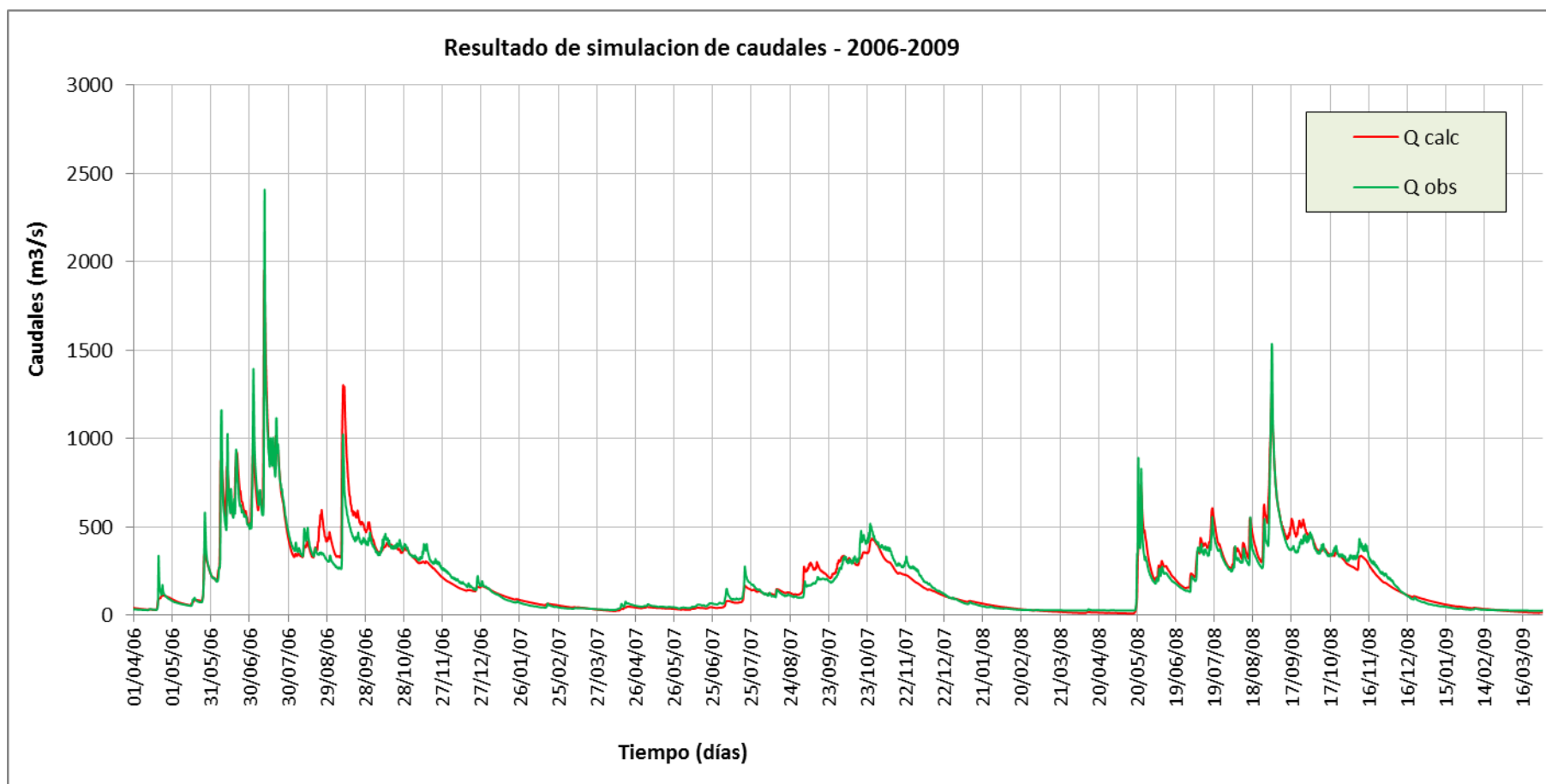


Fig 6-3: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2006-2008.

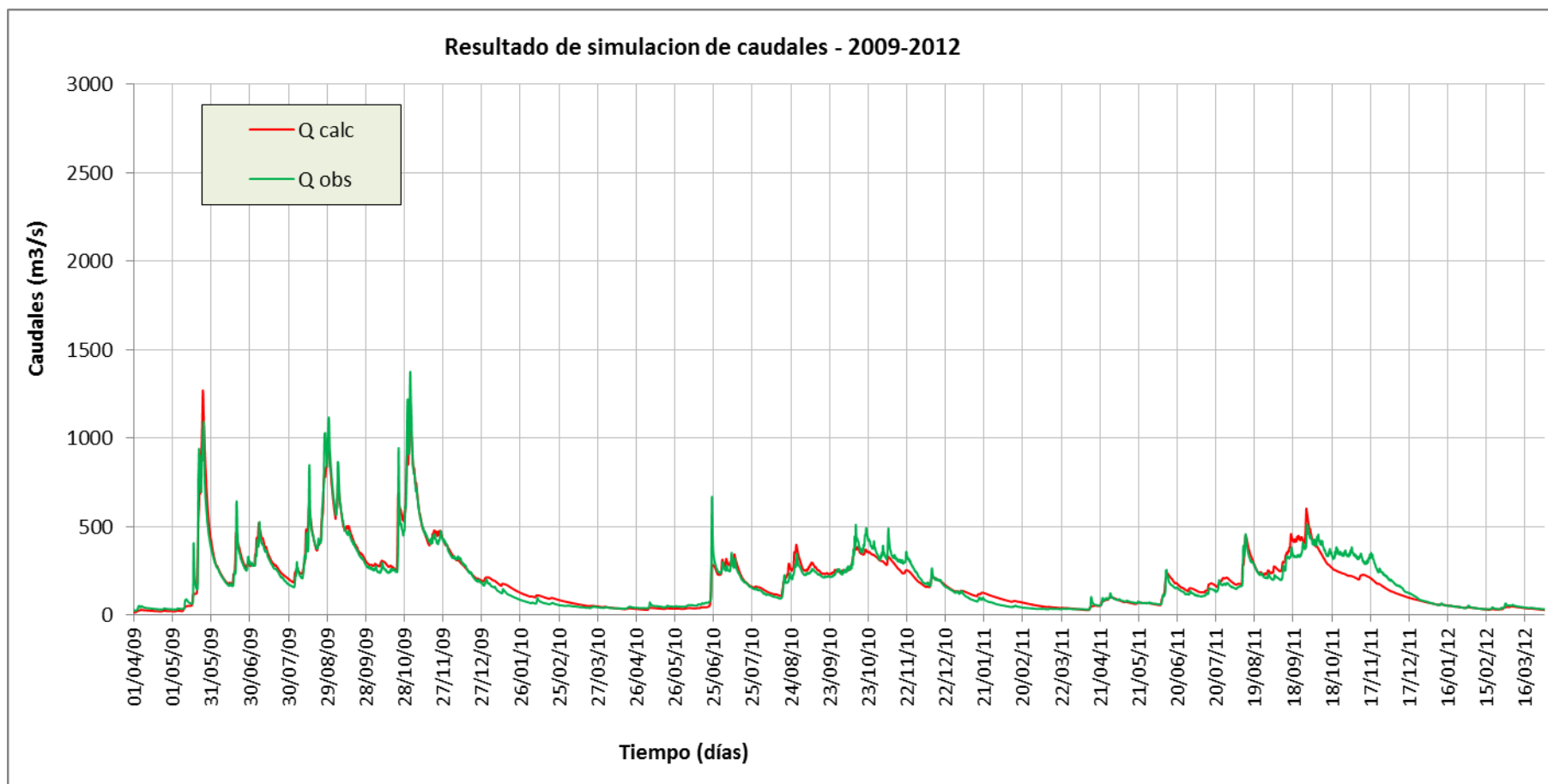


Fig 6-4: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2009-2011.

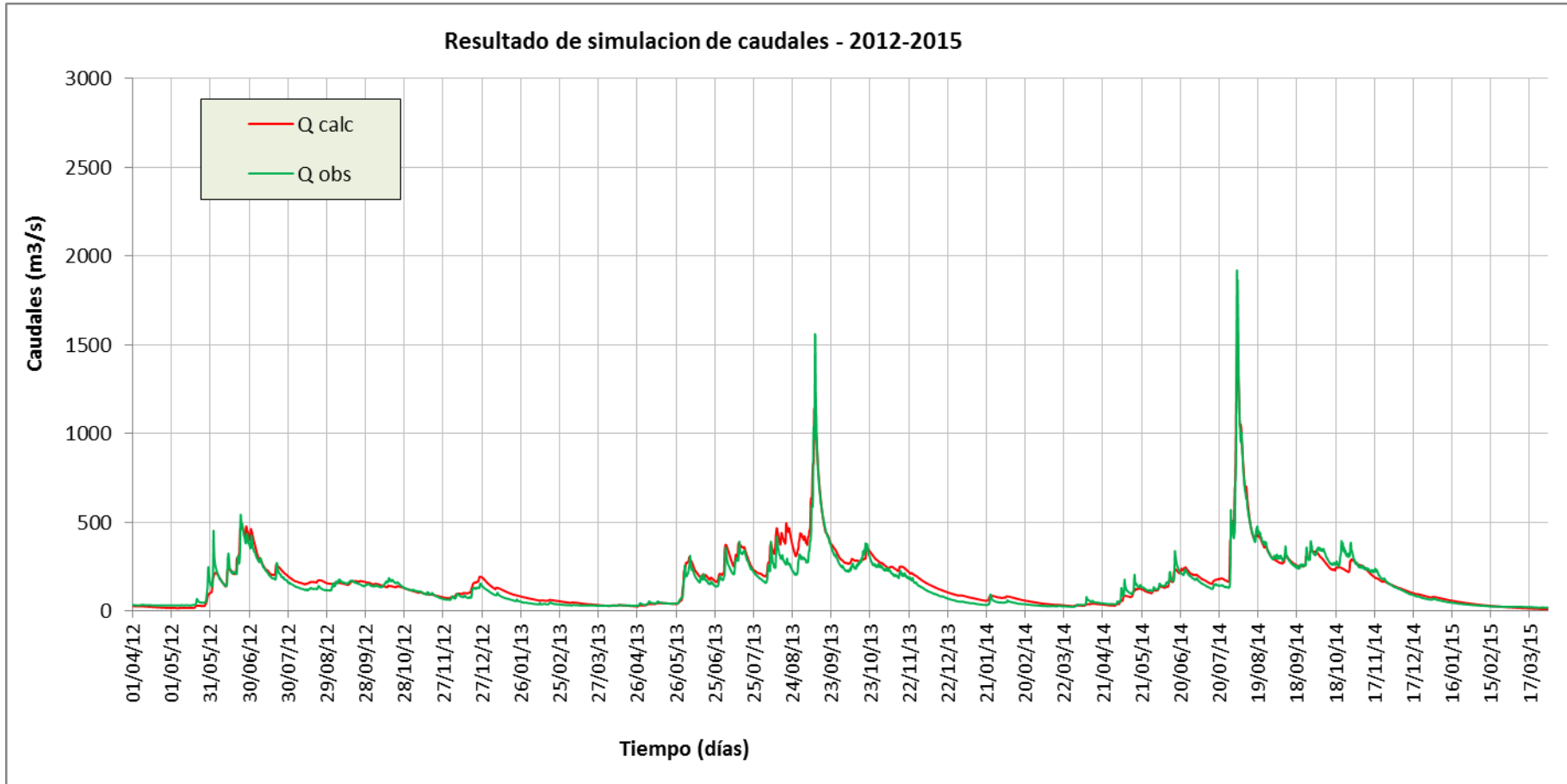


Fig 6-5: Caudales simulados - Periodo hidrológico 2012-2014

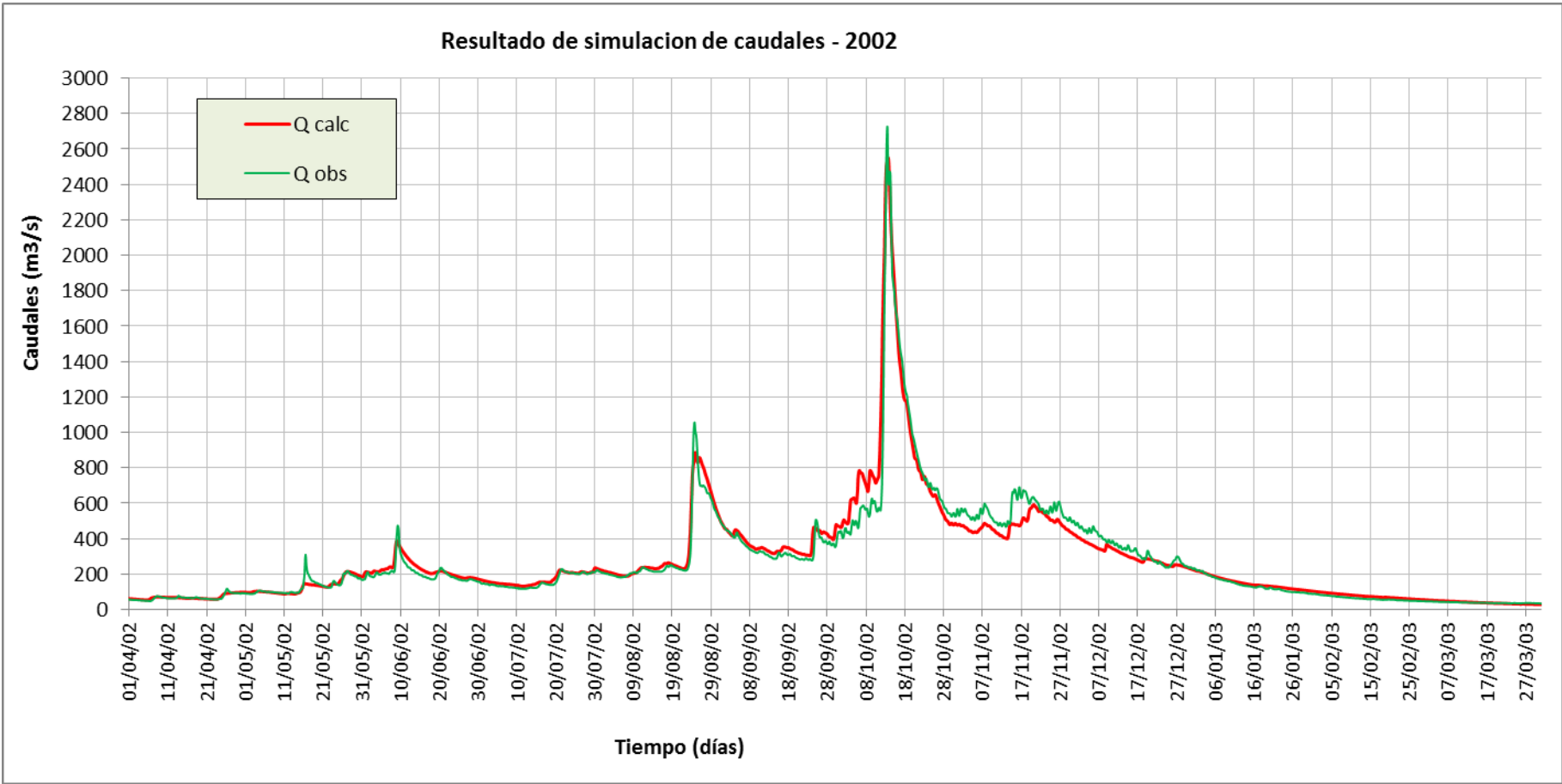


Fig 6-6: Caudales simulados en Huechahue - Periodo hidrológico 2002.

6.5. Acumulación y fusión de nieve.

El proceso de acumulación y fusión de nieve fue estudiado en detalle, comparando las salidas del modelo “SNOW” (contenido total de agua en el paquete de nieve) de las subcuencas, con respecto a las mediciones de Equivalente en Agua de la Nieve (EAN) en las estaciones de alta montaña de la AIC en la zona de estudio o cercana.

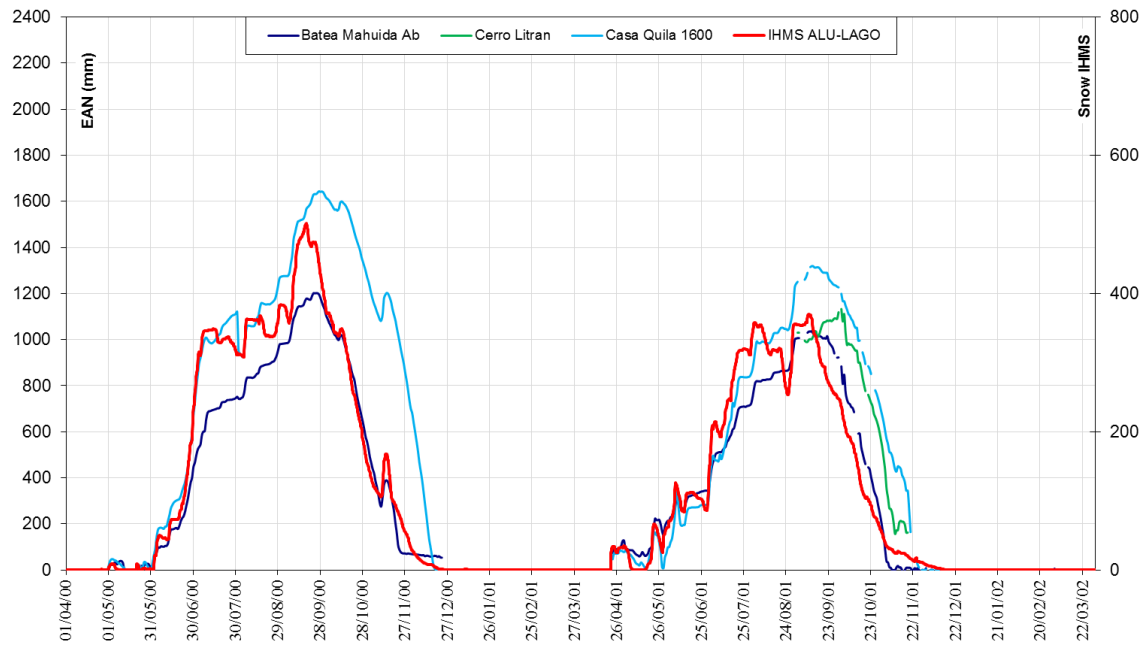


Fig 6-7: SNOW IHMS/HBV Sda. Lago Aluminé vs EAN estaciones AIC año 2001 y 2002.

Los gráficos permiten identificar y comparar el momento del inicio de la acumulación de nieve, la forma de la curva (acumulación y fusión) y el momento inicial y final del periodo de fusión.

Cabe mencionar que los valores de comparación no tienen la misma unidad de medida pero siguen el mismo comportamiento. Los valores de nieve del IHMS/HBV corresponden a nieve acumulada por unidad de área (mm/km^2) y los valores de EAN son mediciones puntuales en la cuenca (mm).

Estos gráficos permiten ajustar los siguientes parámetros de calibración de la rutina de acumulación y fusión de nieve del modelo:

- tt: Temperatura umbral de inicio de acumulación.
- tt+dtm: Temperatura umbral de inicio de fusión.
- cfmax: Velocidad de fusión.

- tti: Umbral de mezcla de lluvia y nieve.

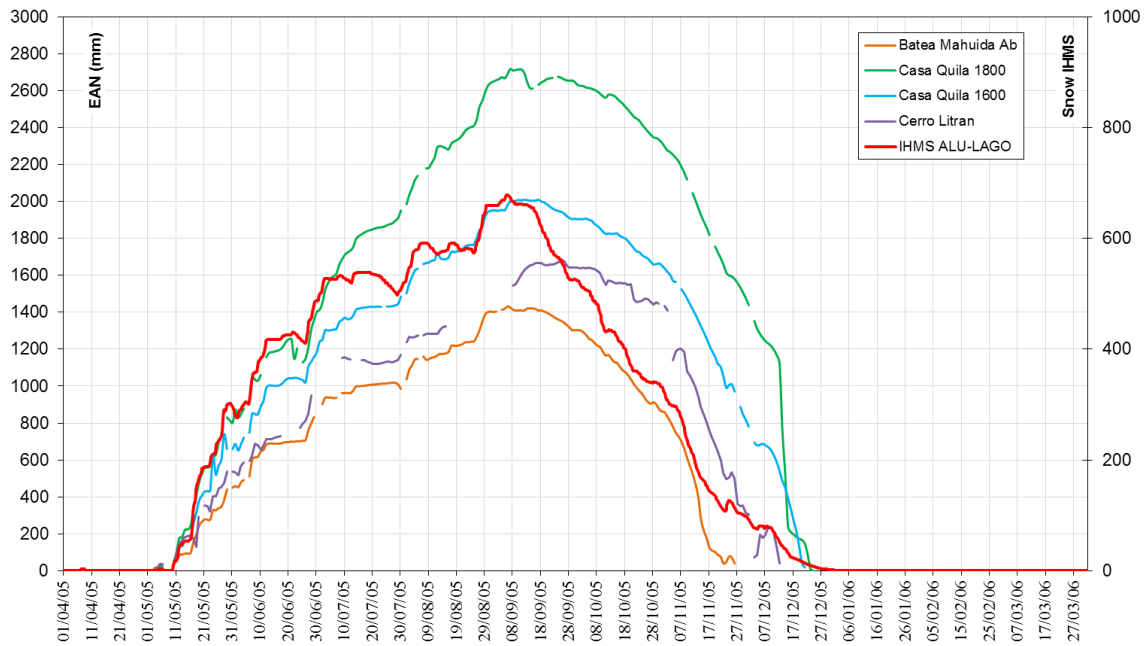


Fig 6-8: SNOW IHMS/HBV Sda. Lago Aluminé vs EAN estaciones AIC año 2006

De este análisis se observa que el modelo puede simular correctamente la precipitación en forma de nieve con base en la información termométrica ingresada

7. Conclusiones.

Las metodologías propuestas y aplicadas en el presente trabajo nos permitieron cumplir con los objetivos planteados:

1. Definir y caracterizar las subcuencas, en que se plantea distribuir el área de la cuenca, en función de la disponibilidad de información de las variables de entrada, ajustando la respuesta del sistema.
2. Procesar y validar los datos de entrada (lluvia, temperatura, nivel de lago y evaporación), y los datos de salida (caudal), para un paso de tiempo de seis horas.
3. Construir el modelo hidrológico de la cuenca analizada, utilizando la herramienta IHMS/modelo HBV versión 5.3.
4. Obtener resultados consistentes y aceptables de caudales calculados en cada uno de los puntos de control (estaciones hidrométricas seleccionadas), mediante la modelación hidrológica a través de la herramienta arriba descrita.

7.1. Descripción de la cuenca.

- En nivel de detalle alcanzado en la delimitación de subcuencas se corresponde con la información hidrometeorológica disponible para caracterizarlas. Las herramientas disponibles permiten obtener una mayor discretización de subcuencas pero no se tiene la información hidrometeorológica necesaria.
- La delimitación adoptada permitió simular los caudales de cada tributario, y estudiar cómo influyen cada uno de estos en el cauce principal.
- La resolución espacial del modelo digital de elevación (45 metros) permitió una muy buena definición y precisión en la delimitación de las subcuencas, y en las mediciones de superficies.
- Los datos de cobertura de suelo se pueden obtener de una fuente con mayor detalle en la clasificación de vegetación. El modelo IHMS/HBV identifica sólo 2 zonas de vegetación (forest y field), por lo que cambiar la fuente no tendrá mejoras sustanciales en los resultados finales.

7.2.Datos hidrometeorológicos.

- El periodo de información hidrometeorológica disponible (01-04-2000; 31-03-2015) fue suficiente para el desarrollo del trabajo ya que abarca una variedad importante de eventos hidrológicos, desde seco a extrahúmedo. Como evento importante, se destaca la crecida histórica del año 2006.
- La validación de datos permitió garantizar la calidad de los registros como paso previo a la modelación. La consistencia de los datos resulto indispensable para obtener resultados confiables, ya que disminuye el grado de incertidumbres de los resultados de predicción del modelo.
- El modelo no admite faltantes en los datos de precipitación y temperaturas, por lo tanto, las series fueron completadas mediante correlaciones estacionales.
- La cantidad de estaciones seleccionadas según la distribución espacial y consistencia de datos fue suficiente para calibrar el modelo.
- Para fortalecer la red de estaciones y calidad de los datos se propone:
 - Duplicar las mediciones de precipitación y temperatura en las estaciones que resultaron representativas del modelo, con el objetivo de evitar pérdida de información por fallas instrumentales o de transmisión.
 - Instrumentar las estaciones de telemedición de San Ceferino y Alinco para la medición de temperatura. La incorporación a la red de estas dos estaciones de temperatura va a permitir mejorar las estimaciones de la variable en región central de la cuenca.
 - Actualizar los instrumentos de medición altimétrica estaciones de caudales con el fin de mejorar el procesamiento y la calidad de los datos.
 - Cambiar el tipo de transmisión diferida a instantánea de la medición altimétrica de ríos en las estaciones de caudales con el fin de disponer de esta medición en tiempo real y poder detectar y corregir inconsistencias en los datos.
 - Planificar la periodicidad y la realización de aforos en las distintas estaciones para situaciones de contingencias, como por ejemplo, en valores extremos de caudales. Esto permite obtener curvas HQ de menor incertidumbre para medición de caudales.

- Instalar estaciones de Evaporación para validar y/o ajustar los cálculos analíticos realizados en el método de Thornthwaite.
- Instalar estaciones evaporimétricas (evaporación en tanque) en la cuenca para generar una base de datos de la medición. Esta base de datos permitirá además, comparar y validar la evapotranspiración potencial estimada por Thornthwaite con los datos de evaporación en tanque.
- Tener en cuenta las necesidades de datos del modelo, a la hora de estudiar la factibilidad de aumentar el número de estaciones automáticas.

7.3. Modelación hidrológica - Modelo IHMS/HBV.

- Precipitación y Temperatura.

Es necesario destacar dos etapas fundamentales del modelo y que determinaron la obtención de los buenos resultados:

La primera etapa se corresponde con las variables de entrada al modelo (precipitación y temperatura), utilizando los coeficientes C_i , P_{CALT} y T_{CALT} para cada subcuenca. El estudio de los eventos hidrometeorológicos más importantes de los últimos 15 años permitió desarrollar una metodología para calcular los coeficientes C_i , P_{calt} y T_{calt} que representan estos eventos con la menor incertidumbre. Dichos coeficientes, en cuyo análisis intervienen la ubicación topográfica y representatividad climática de las estaciones, simulaban satisfactoriamente el régimen hidrológico del periodo analizado y se entiende que también lo harán en regímenes futuros. La metodología es superadora a la propuesta por el manual (Polígonos de Thiessen).

La segunda etapa, es la calibración de los parámetros de las rutinas del modelo, en la cual se sigue la metodología propuesta por el manual de uso IHMS/HBV. El estudio exhaustivo de la variable de entrada facilitó el proceso de la calibración del modelo, sin necesidad de forzar los parámetros fuera de los rangos recomendados.

De los resultados de pesos C_i de las estaciones que determinan las temperaturas y precipitaciones medias de cada subcuenca, se observa una mayor incidencia de algunas estaciones con respecto a otras. Las estaciones de Salida Lago Aluminé, Rahue, La Ofelia y Las Coloradas suman una incidencia del 60% aproximadamente en la cuenca del Río Aluminé para ambos casos.

- Evaporación

Comparando la teoría completa de Thornthwaite con la teoría simplificada que utiliza el modelo IHMS/HBV, se observa que el coeficiente Athorn varía a lo largo del año. Al considerarse un único valor de este parámetro, se tiene que, en los meses de Febrero a Junio la evapotranspiración potencial calculada por el modelo es mayor que la de Thornthwaite, y de Julio a Enero la relación se invierte. Las diferencias no superan los 0,5mm/día y al final de un año se compensan. Estas diferencias no son significativas y la metodología propuesta es aceptable.

- El modelo IHMS/HBV.

El modelo IHMS/HBV desarrollado por el instituto hidrológico e meteorológico sueco está diseñado para simular la esorrentía para distintos regímenes. Por lo tanto se adapta satisfactoriamente a las características de la cuenca estudiada (régimen pluvio-nival), reproduciendo los procesos más importantes que están presentes en la producción de caudales.

El estudio exhaustivo de las variables de entrada y las rutinas del modelo permitió calcular una gran cantidad de parámetros físicos, y reducir la cantidad de parámetros libres a calibrar.

El modelo puede simular correctamente la precipitación en forma de nieve con base en la información termométrica ingresada

7.4.Ejecución del modelo.

La carga del modelo y la posterior calibración se realizó siguiendo la metodología de uso del manual IHMS/HBV 2005.

Resulta importante mencionar que la construcción del modelo se realizó evaluando los periodos calibración y validación, pero el nivel de desempeño final lo determina el periodo de Test, inalterando los parámetros de calibración para un periodo de datos diferente al periodo de calibración y validación.

En las subcuencas del Kilka y del Catal Lil con cierre en Las Coloradas y en Puesto Coifin, se obtuvieron magnitudes diferentes en parámetros de calibración respecto al resto de las subcuencas. Esto se puede explicar por la diferencia en las características físicas. Tales cuencas se encuentran ubicadas en una zona mucho más seca, con

orografía pronunciada y escasa vegetación, por lo cual, la respuesta a las precipitaciones es muy rápida.

7.5.Resultados.

Para todas las subcuencas, se obtuvo un desempeño final del modelo de muy bueno según el criterio de evaluación de Moriasi. Se puede destacar que el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (R^2) fue superior a 0,92 en todas las subcuencas con excepción de Rucachoroi en Casa de Piedra de 0,88 y Catan Lil en Las Coloradas de 0,70.

Un menor desempeño, en tales subcuencas, se puede atribuir a una menor densidad de las estaciones disponibles y generalmente no son muy representativas.

El modelo calibrado será utilizado como una herramienta para la previsión a corto y largo plazo de caudales, toma de decisiones, operación de embalses y como apoyo en la implementación del sistema de alerta temprana ante crecidas del río Aluminé.

7.6.Comentarios.

Con respecto a la puesta en funcionamiento de manera operativa en la previsión de caudales se harán los siguientes comentarios:

- Para asegurar la operatividad del modelo es necesario que el sistema sea constantemente actualizado, esto significa poner al día la simulación con los datos hidrometeorológicos requeridos.
- La previsión a corto plazo se hará hasta un máximo de 15 días, teniendo en cuenta el pronóstico de datos meteorológicos.
- El pronóstico de precipitación y temperatura se realizara en cada estación utilizada en el modelo y con un paso de tiempo de 6 horas. La carga al modelo de estos datos se realizara en el archivo PTQW, de la misma manera que se cargan los datos observados.
- La previsión a largo plazo se hará hasta un máximo de 3 meses. El mismo no se basa en pronósticos meteorológicos, sino en el análisis estadísticos de la serie históricas de datos.

8. Bibliografía.

- Fattorelli S. & Fernández P.C. (2011). *Diseño hidrológico*. Primera edición. Mendoza, Argentina: ZetaStudios
- Fattorelli S. & Fernández P.C. (2011). *Diseño hidrológico*. Edición digital. Recuperado de http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf
- Ven Te Chow, Maidment D.R. & Mays L.C. (2000). *Hidrología Aplicada*. Buenos Aires, Argentina: McGraw-Hill
- Beta Studios SRL (2007). *Sistema de pronósticos hidrológicos para las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro*. Cipolletti, Rio Negro.
- Manual IHMS/HBV versión 5.6 “*Integrated Hydrological modelling System*”.
- Manual del usuario de SPSS Statistics Base 17.0. Recuperado de <http://web.udl.es/Biomath/Bioestadistica/SPSS/v17/SPSS%20Statistcs%20Base%20User%27s%20Guide%2017.0.pdf>
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- Legates, D. R. and McCabe Jr., G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, Vol. 35, N°1, Pages 233–241.
- Zucarelli Agostina, Paris Marta, Macor José. (2013). Utilización de kriging para la elaboración de curvas isohietas de precipitación mensual en la Provincia de Santa Fe, Argentina. Facultad de Ingeniería en Ciencias Hídricas - Universidad Nacional del Litoral.
- Quevedo, Karim y Sánchez, Kevin (2009). Comparación de dos métodos de interpolación para la estimación de la temperatura del aire aplicando técnicas geo-estadísticas. *Revista peruana geoatmosférica RPGA*, Pagina 90–107.
- Página web de información climática Tutiempo.Net. Pronósticos del tiempo: <http://www.tutiempo.net/calendario-solar/alumine>.

9. Anexo.

9.1. Elaboración de mapas de precipitación - Interpolación de Kriging.

9.1.1. Conceptos Teóricos.

Definición.

Kriging es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos (x,y) dispersos con valores de "Z". Se apoya en el conocimiento del comportamiento de la variable en el espacio.

El método de interpolación de kriging es un método geoestadístico, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no sólo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

Kriging presupone que la distancia o dirección de los puntos de muestras reflejan una correlación que puede utilizarse para explicar la variación de la superficie. La herramienta, ajusta una función matemática a una cantidad específica de puntos dentro de un radio específico determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la variancia. Este método es el más adecuado cuando se sabe que una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos.

Formula de Kriging. Estimador lineal no sesgado.

$$\hat{Z}(S_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i)$$

Dónde:

- Z(S_i): El valor medido de la ubicación i.
- λ_i: una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i.
- S_o: La ubicación de la predicción.
- N: La cantidad de valores medidos.

El semivariograma empírico es un gráfico de los valores de semivariograma promediados en el eje Y, y la distancia (o intervalo) en el eje X.

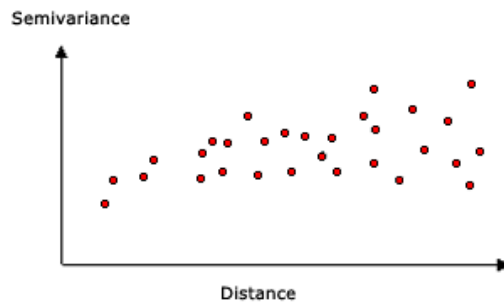


Fig 9-2: Semivariograma empírico.

La autocorrelación espacial cuantifica un principio básico de geografía: es más probable que las cosas que están más cerca sean más parecidas que las que están más alejadas. Entonces, los pares de ubicaciones que están más cerca (extremo izquierdo del eje X de la nube de semivariograma) deberían tener valores más similares (parte inferior en el eje Y de la nube de semivariograma). A medida que los pares de ubicaciones estén más separados entre sí (hacia la derecha en el eje X de la nube de semivariograma), deberían ser más distintos y tener una diferencia cuadrada más grande (hacia arriba en el eje Y de la nube de semivariograma). Los datos más allá del alcance, es decir cuando el semivariograma se vuelve plano, tienen la mínima capacidad predictora.

Ajustar un modelo al semivariograma empírico.

Para ajustar un modelo al semivariograma empírico, hay que seleccionar una función que sirva como modelo, por ejemplo, un tipo esférico que se eleve y nivele las distancias más grandes que sobrepasan un determinado rango (vea el ejemplo del modelo esférico más abajo). Existen desviaciones de los puntos en el semivariograma empírico con respecto al modelo; algunos están por encima de la curva del modelo y algunos están por debajo. Sin embargo, si suma la distancia de cada punto por encima de la línea y la distancia de cada punto por debajo, los dos valores deberían ser similares. Existen varios modelos de semivariograma para elegir.

Modelos de semivariograma.

La herramienta Kriging proporciona las siguientes funciones para elegir el modelado del semivariograma empírico:

- Circular
- Esférica
- Exponencial
- Gaussiana

El modelo seleccionado influye en la predicción de los valores desconocidos, en particular cuando la forma de la curva cercana al origen difiere significativamente. Cuanto más pronunciada sea la curva cercana al origen, más influirán los vecinos más cercanos en la predicción. Como resultado, la superficie de salida será menos suave. Cada modelo está diseñado para ajustarse a diferentes tipos de fenómenos de forma más precisa.

En los siguientes diagramas se muestran dos modelos comunes y se identifican las diferencias de las funciones:

1. Ejemplo del modelo esférico

En este modelo se muestra una disminución progresiva de la autocorrelación espacial (así como un aumento en la semivarianza) hasta cierta distancia, después de la cual la autocorrelación es cero. El modelo esférico es uno de los que más se utilizan.

2. Ejemplo del modelo exponencial.

Este modelo se aplica cuando la autocorrelación espacial disminuye exponencialmente cuando aumenta la distancia. En este caso, la autocorrelación desaparece por completo solo a una distancia infinita. El modelo exponencial también es un modelo comúnmente utilizado. La elección de qué modelo se va a utilizar está basada en la autocorrelación espacial de los datos y en el conocimiento previo del fenómeno.

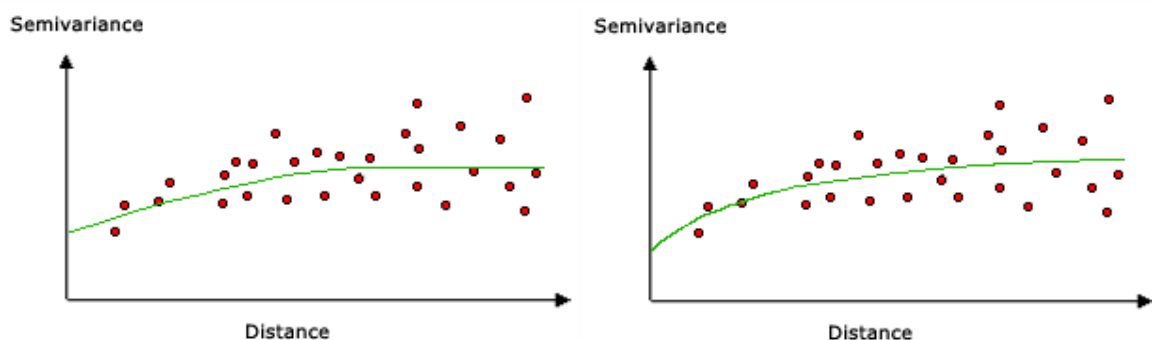


Fig 9-3: Ajuste del Semivariograma con un modelo esférico y con un modelo exponencial.

Realizar una predicción.

Cuando se haya descubierto la dependencia o autocorrelación en sus datos (Variografía) y se haya finalizado con el primer uso de los datos (usar la información espacial de los datos para calcular las distancias y modelar la autocorrelación espacial) puede realizar una predicción utilizando el modelo ajustado. Después de esto, se aparta el semivariograma empírico.

Ahora puede utilizar los datos para realizar predicciones. La interpolación de kriging forma ponderaciones a partir de los valores medidos circundantes para prever ubicaciones sin mediciones. Asimismo, los valores medidos que estén más cerca de las ubicaciones sin mediciones tienen la mayor influencia. Sin embargo, las ponderaciones de kriging para los puntos medidos circundantes son más sofisticadas que las del método IDW. Este último utiliza un algoritmo simple basado en la distancia, mientras que las ponderaciones de kriging provienen de un semivariograma que se desarrolló observando la naturaleza espacial de los datos. Para crear una superficie continua del fenómeno, se realizan predicciones para cada ubicación, o centro de celda, en el área de estudio basadas en el semivariograma y la disposición espacial de los valores medidos que son cercanos.

Los métodos kriging.

Existen dos métodos kriging: ordinario y universal.

El kriging ordinario es el más general y más utilizado de los métodos kriging y es el predeterminado. Presupone que el valor medio constante es desconocido. Esa es una presuposición razonable a menos que haya una razón científica para rechazarla.

El kriging universal presupone que hay una tendencia de invalidación en los datos, por ejemplo, un viento prevaleciente, y puede modelarse a través de la función determinística polinómica. Esta función polinómica se resta de los puntos medidos originalmente y la autocorrelación se modela a partir de los errores aleatorios. Una vez que el modelo se ajusta a los errores aleatorios y antes de realizar una predicción, se vuelve a sumar la función polinómica a las predicciones para obtener resultados significativos. El kriging universal solo se debe utilizar si se conoce una tendencia en los datos y se puede dar una justificación científica para describirla.

9.1.2. Creación de un mapa de precipitaciones con el método de Kriging.

Para la creación de estos mapas se utilizó el software ArcGis versión 10.3.

Se parte de un “shape” de puntos con las estaciones de precipitaciones pertenecientes a la cuenca de estudio y sus alrededores con su correspondiente ubicación geográfica, altitud (x,y,z) y el valor “Z” que corresponde en este caso a los datos de precipitaciones acumuladas en cada evento. Se representa en la siguiente tabla del “shape”.

Tabla 9-1: Datos del Shape de precipitaciones de cada evento.

FID	Shape *	Estación	Código	x	y	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18
0	Point	Salmonicultura	p22002	231058	549569	427	247	289	296	390	117	243	179	263	221	139	163	205	78	290	136	172	255
1	Point	La Cantera	p22003	232153	549128	383	175	194	322	511	128	252	216	225	185	91	200	171	85	269	115	75	285
2	Point	Villa Trafal	p22401	229823	549674	534	340	347	210	496	176	267	229	291	281	184	170	256	99	360	188	174	302
3	Point	Corralito	p23007	235746	549004	157	103	28	114	157	31	63	56	92	29	21	93	29	24	131	88	82	92
4	Point	Puesto Cordoba	p41003	231758	551446	427	262	230	388	328	143	263	207	225	180	117	172	162	51	253	131	192	222
5	Point	Sda L° Melquina	p41101	230794	552755	640	415	365	477	568	190	238	253	300	253	198	271	243	94	295	186	114	309
6	Point	Cerro Mocho	p41511	228813	553263	781	605	491	611	600	262	482	315	456	440	272	353	349	161	481	481	294	521
7	Point	Puesto Lopez	p41604	230887	551510	456	287	272	337	377	154	248	260	266	166	126	194	220	53	302	153	205	275
8	Point	Ea. Quenquentreu	p42001	234548	554514	271	231	45	164	144	62	63	49	103	58	25	77	55	20	41	28	20	78
9	Point	Sda Lago Alumne	p60003	232234	568723	490	385	296	375	299	200	292	248	172	176	172	221	157	70	289	65	113	299
10	Point	Rahue	p60007	233327	564068	336	337	216	264	258	214	225	232	145	135	89	107	110	77	315	46	182	261
11	Point	Huechahue	p60027	234196	557455	239	122	107	169	152	83	101	86	169	75	66	117	120	51	181	22	72	135
12	Point	Ea. Mamul Malal	p61006	230531	560526	532	421	321	506	386	256	271	300	335	293	169	230	241	108	411	138	308	358
13	Point	La Ofelia	p62004	231138	564000	543	349	468	426	470	236	279	353	344	340	297	242	182	166	439	141	217	311
14	Point	Añihueraqui	p62107	229159	563343	150	100	897	100	102	522	793	680	654	794	524	613	435	342	850	410	438	896
15	Point	Nac. A° Malalco	p62502	229589	565288	998	841	573	717	757	417	570	523	517	561	381	329	296	194	600	240	314	670
16	Point	Lago Norquino	p64101	229951	566767	729	585	414	532	579	300	412	403	327	354	285	253	246	142	455	137	307	459
17	Point	Batea Mahuida Abajo	p68004	230870	570011	610	580	511	491	433	326	431	317	223	339	206	266	281	108	424	116	212	503
18	Point	Lirran Abajo	p68103	233744	570979	618	414	280	466	351	228	379	205	219	208	233	247	153	88	292	75	111	320
19	Point	Casa Quila 1800	p68221	229159	568472	133	115	879	120	970	456	842	593	644	828	657	655	342	252	795	332	325	763
20	Point	Las Coloradas	p69008	236333	562119	117	80	60	157	123	70	94	41	122	52	53	78	45	45	162	17	45	88
21	Point	Nac. Catan Lli	p69009	235861	567836	306	204	116	230	158	105	200	100	143	102	138	63	80	80	138	35	31	234
22	Point	Casa de Lata	p70003	231369	558739	372	267	256	313	248	157	170	230	208	162	80	162	163	67	291	76	192	241
23	Point	Ea Collunco	p71001	231220	557424	341	233	238	276	306	145	178	224	211	169	93	159	124	60	224	78	184	229
24	Point	L° Huechulafquen	p72003	228783	559765	692	486	430	546	431	262	367	374	423	394	259	278	299	161	384	188	241	476
25	Point	Pto Antao	p72106	227513	559678	124	886	707	970	907	442	664	589	683	704	436	477	493	278	728	361	377	753
26	Point	Cerro Huicufa	p72107	227649	559536	105	769	627	826	828	327	681	515	667	623	402	357	308	224	677	322	314	695
27	Point	L° Espejo Chico	p88111	227005	550309	825	573	558	521	658	269	439	392	412	459	227	256	387	107	396	259	273	446
28	Point	Ea Sañico	p20101	0	0	121	94	19	135	40	23	36	50	131	19	37	63	9	20	41	28	20	78
29	Point	Pucon	0	0	551	496	341	491	447	252	335	311	300	383	250	329	270	117	299	146	315	464	
30	Point	Matthei	0	0	311	264	226	224	320	151	220	168	168	225	72	104	178	22	224	117	251	196	
31	Point	Valdivia	0	0	530	495	405	503	681	260	427	337	264	495	211	303	381	104	347	174	347	450	
32	Point	Temuco	0	0	234	250	199	237	211	151	199	184	116	122	74	145	114	39	145	73	214	210	

Metodología – Secuencia de pasos.

Paso 1.

- En Geostatistical Analyst/ Geostatistical Wizard
- Elegimos el método geoestadístico de KRIGING.
- En la ventana Input Data se ingresa:
 - Source Dataset: El shape de eventos de lluvias
 - Data Field: El campo numérico de entrada que contienen valores z (ejemplo: valores lluvias E1).

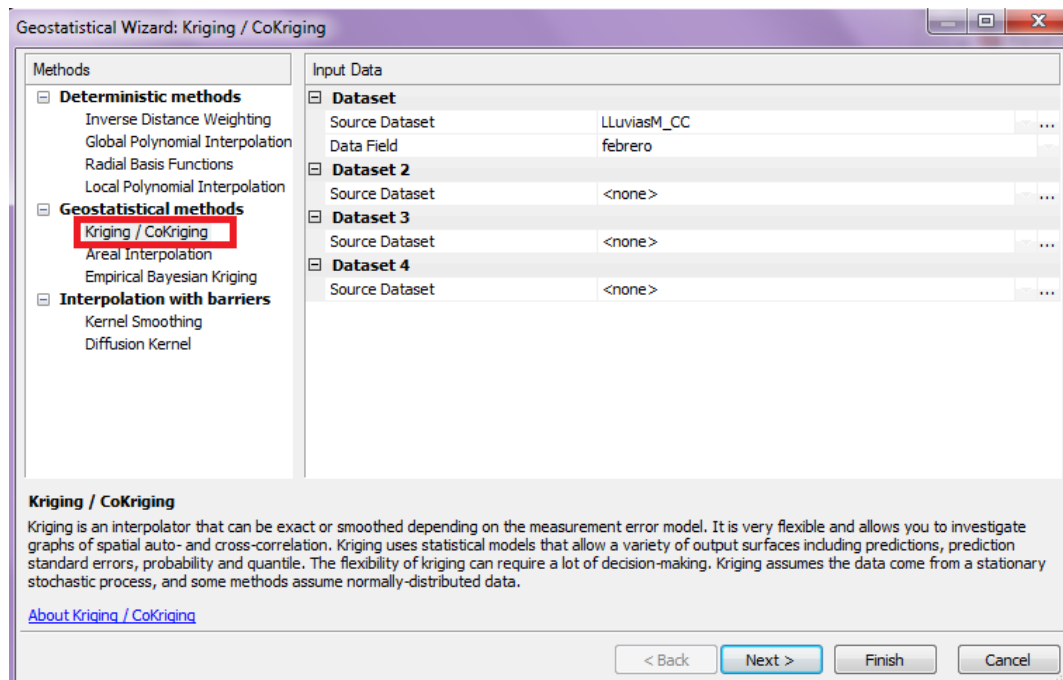


Fig 9-4: Paso 1 – Ingreso de Shape y campo “z”.

Paso 2.

- Se elige el tipo de método de kriging: Ordinario.
- En la ventana Output Surface Type se indica: Prediction. Se elige un tipo de superficie de salida de predicción.
- En la ventana Dataset #1 se ingresa:
 - Transformation type: Log. Se elige una transformación logarítmica para ajustar y normalizar los datos. Esta transformación comprime los valores bien altos y riega los valores bajos.
 - Orden of trend removal: none. Es posible que se desee eliminar una tendencia en la superficie a partir de los datos y el uso de kriging en los datos sin tendencia (residual).

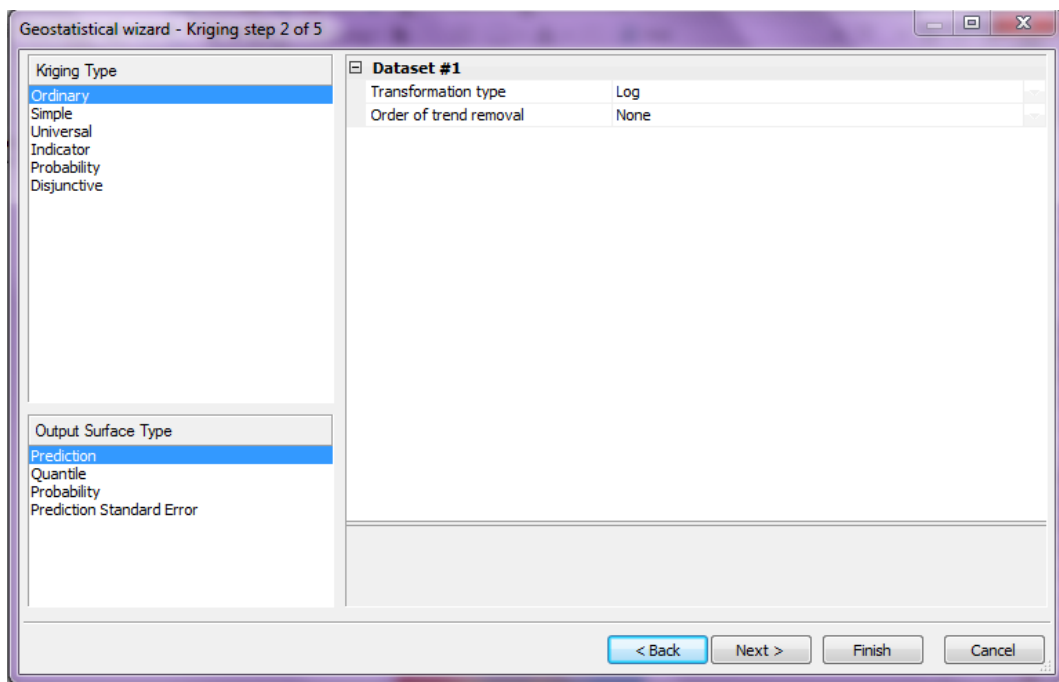


Fig 9-5: Paso 2 – Selección de tipo de método de Kriging.

Paso 3.

Se crea el semivariograma empírico, se analiza la existencia de anisotropías y se elige el tipo de función de modelado para el semivariograma.

En la pantalla se visualizan 2 gráficos

- 1- Superior: Semivariograma y el modelo de ajuste.
 - 2- Inferior: Mapa del Semivariograma.
- En la pestaña General se ingresa:
 - Variable: Semivariogram.

En la pestaña General se ingresa:

- En la pestaña Model Nugget se ingresa:
 - Enable: False. Se puede ingresar un efecto nugget que es la intercepción del modelo del semivariograma con el eje Y. en este caso es cero.
El nugget representa el error y la variación a una escala espacial que es demasiado fina para ser detectada. El efecto nugget se ve como una discontinuidad del origen.
- En la pestaña Model #1 se ingresa:
 - Type: Exponencial. Consideramos que el tipo de modelo o función exponencial ajusta bien el semivariograma. También se pueden seleccionar otro tipo de funciones como la circular, esférica y otras más.

- Anisotropy: True. Existe Anisotropía. Las funciones del semivariograma pueden cambiar no solamente con la distancia, también con la dirección, esto se denomina anisotropía.
- Calcule partial sill: True. Se indica que se informe de forma automática el valor de la meseta parcial del semivariograma (Partial Sill). El valor en el cual el modelo de semivariograma alcanza el rango (el valor en el eje Y) se denomina meseta. Una meseta parcial es la meseta menos el nugget.
- En la pestaña Lag se ingresa:
 - Lag Size: se carga el tamaño de desfase. Es un muy importante y tiene efectos en el semivariograma. Por ejemplo si el lag es muy largo la autocorrelacion puede quedar enmascarada en un rango corto. El tamaño del lag es indicar una distancia entre los puntos que forman el semivariograma menores a tal valor.
 - Number of Lags: Numero entero que multiplica al a los lag. Se carga un número entero visualizando el grafico del semivariograma hasta que la autocorrelación se disipe.

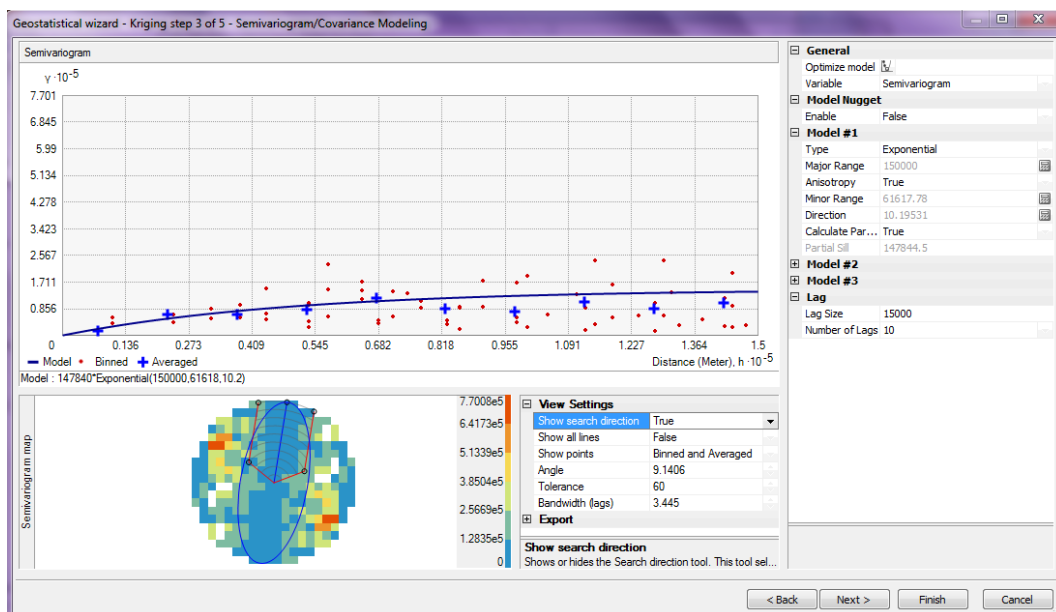


Fig 9-6: Paso 3 – Selección del Ajuste del Semivariograma.

- En la pestaña View Setting se ingresa:
 - Show search direction: true. Indicamos se muestre la Dirección de Búsqueda. mostrar u oculta la herramienta Dirección de búsqueda. Esta herramienta selecciona pares de puntos que caen dentro de un sector definido por un ángulo, una tolerancia y un ancho de banda.
 - Show all lines: False. Nos mostrar las líneas

- Show point: Binned and averaged. Indicar que se visualicen los Pares de ubicaciones que forman el semivariograma (bines) y también los promedios.
- Angle: Angulo en grados. indica la dirección en la que la búsqueda está apuntando (medido en grados a partir del norte, girando en sentido horario). Por lo general se coloca el mismo ángulo que la “Dirección” de la pestaña modelo #1.
- Tolerance: Angulo en grados. (entre 0 a 90°). Es el ángulo de apertura del sector utilizado por la herramienta dirección de búsqueda para seleccionar los pares de puntos. El sector de las búsquedas no se expande infinitamente; su anchura , está limitada por el parámetro de anda de banda.
- Bandwidth (lags). Define la anchura del sector de búsquedas. Se mide en términos de lags, que se definen en unidades de distancia de la del conjunto de datos de entrada primaria.

Paso 4.

Asumiendo que las ubicaciones quedan más lejos de la ubicación que se predijo, los valores medidos tendrán menos influencia en la ubicación de predicción.

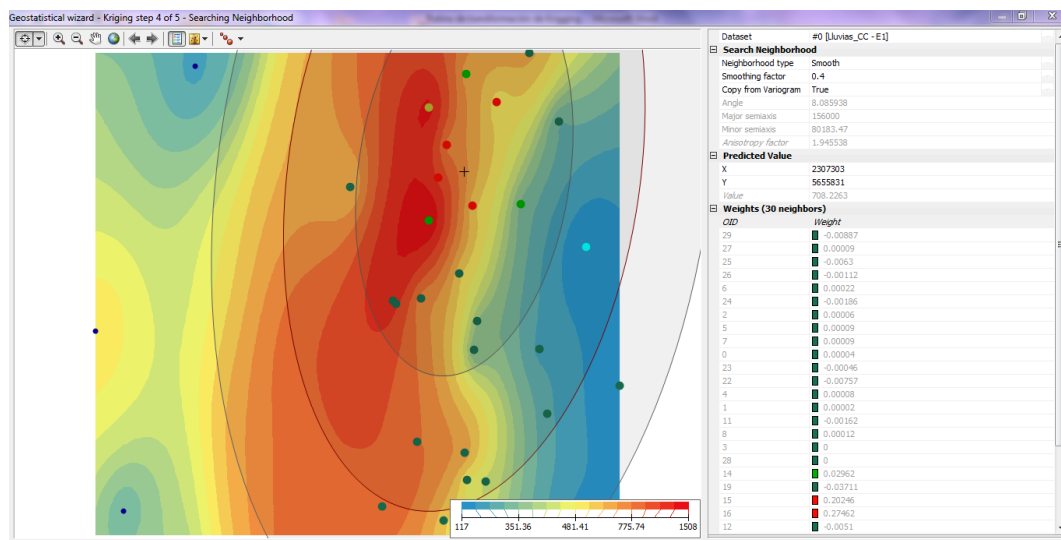


Fig 9-7: Paso 4 - Selección de Pesos.

- En la pestaña Search Neighborhood se ingresa:
 - Neighborhood Type (Tipo de vecindad): Estandar o Smooth (suave). Se elige la forma de buscar los pesos (weights). La opción estándar asignara pesos basados en la distancia desde la ubicación de destino. Se elige la opción suave que ajusta los pesos usando una función sigmoial definido por el factor de alisamiento (Smoothing factor).

- Smoothing factor: Factor de alisamiento. Se determina la cantidad de suavizado para la performance de la predicción. Varía de 0 (sin suavizado) a 1 (máxima cantidad de suavizado).
- Copy from Variogram. True. Se selecciona verdadero y el ángulo, los valores de semieje menor y mayor se copian desde el ángulo de variograma.
- En la pestaña Predicted Value.
 - X:
 - Y:
 - Value:

Se hace un click sobre el gráfico para saber el valor de la predicción en una ubicación (x,y).

- En la pestaña weight (pesos) neighbors se visualiza lo siguiente:

La lista de valores de pesos que se utilizan para estimar el valor de predicción en valor de la posición.

En este caso, sabiendo que cada “punto” en el mapa representa una estación, y que necesitamos un buen ajuste de la predicción en la zona de estudio de la cuenca del río Aluminé; se busca que los pesos de las estaciones más representativas de la cuenca tengan mayor peso.

 - Salida lago Aluminé.
 - Rahue.
 - Añihueraqui.

Paso 5:

Este es el último paso, es donde se comparan los datos reales y de predicciones de precipitaciones en las estaciones. Se visualiza todo el resumen de análisis de errores en las predicciones del método kriging. Las tablas resúmenes de errores fueron exportadas para cada evento de estudio y no presentaban errores significativos. No fueron incluidos en los anexos.

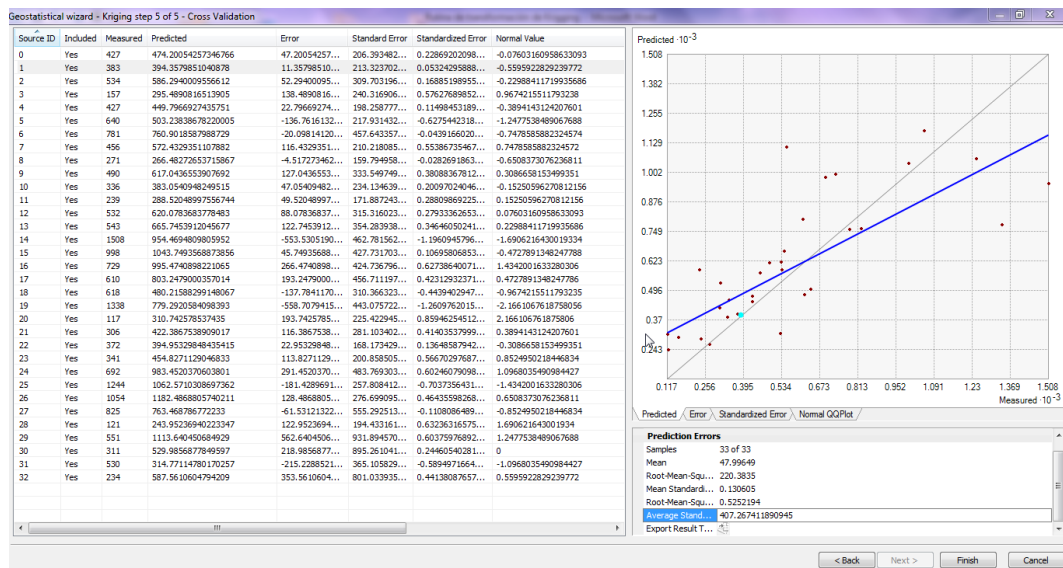


Fig 9-8: Paso 5 - Análisis de errores.

Reporte del método:

Es una tabla resumen de todos los parámetros utilizados en el método. Se guarda para cada mapa de predicción de precipitaciones de eventos.

Resultado final - RASTER:

Por último se obtiene el raster de precipitaciones para cada evento. El mapa elaborado muestra una distribución de las precipitaciones basado en el análisis de la correlación espacial de la variable considerada dentro del dominio que definen los puntos de muestreo, con un estimar no sesgado y lineal.

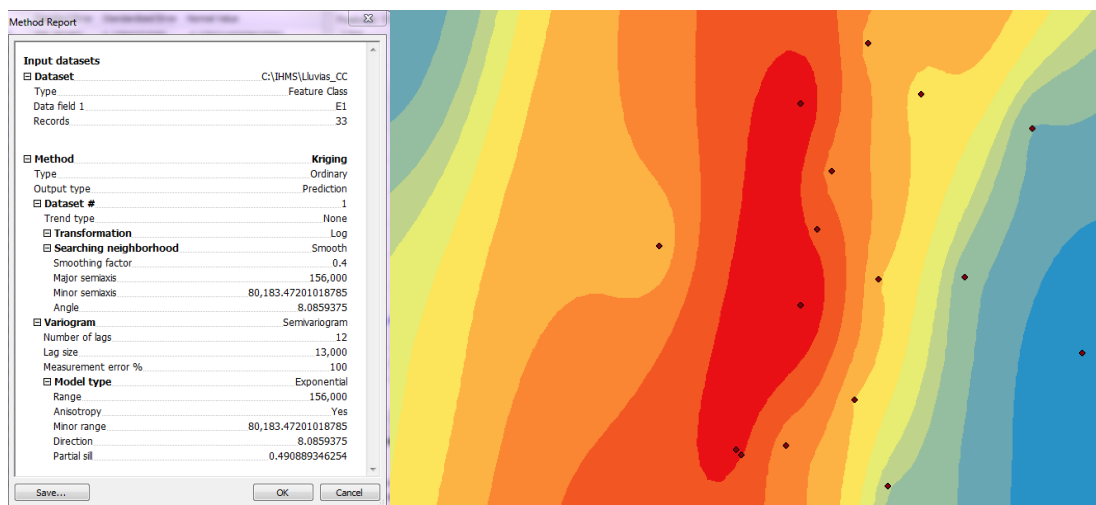


Fig 9-9: Paso 5 - Reporte del método - Mapa de precipitaciones final.

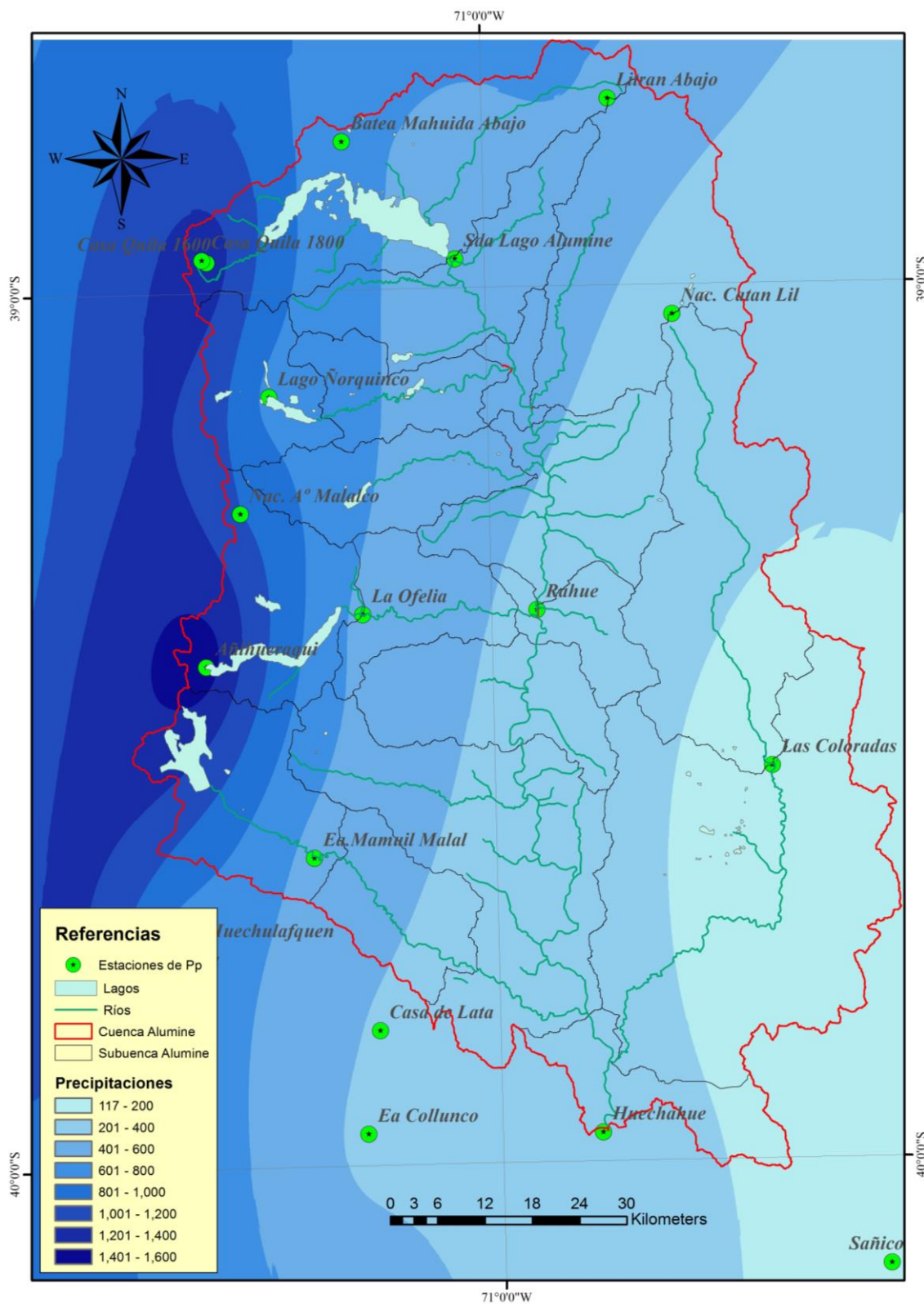


Fig 9-10: Mapa de precipitaciones – Evento 1 – Mayo 2001.

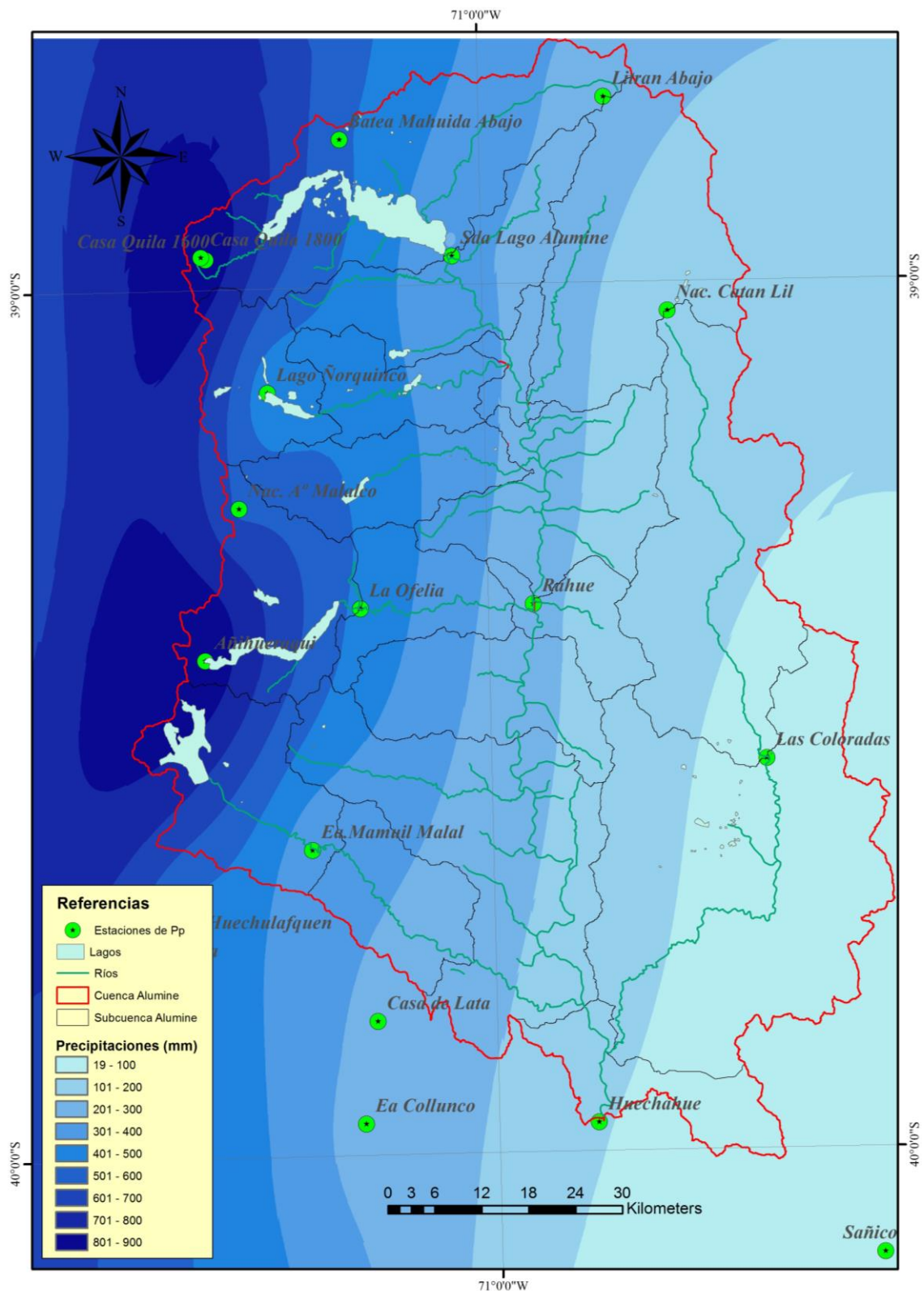


Fig 9-11: Mapa de precipitaciones – Evento 3 – Octubre 2002.

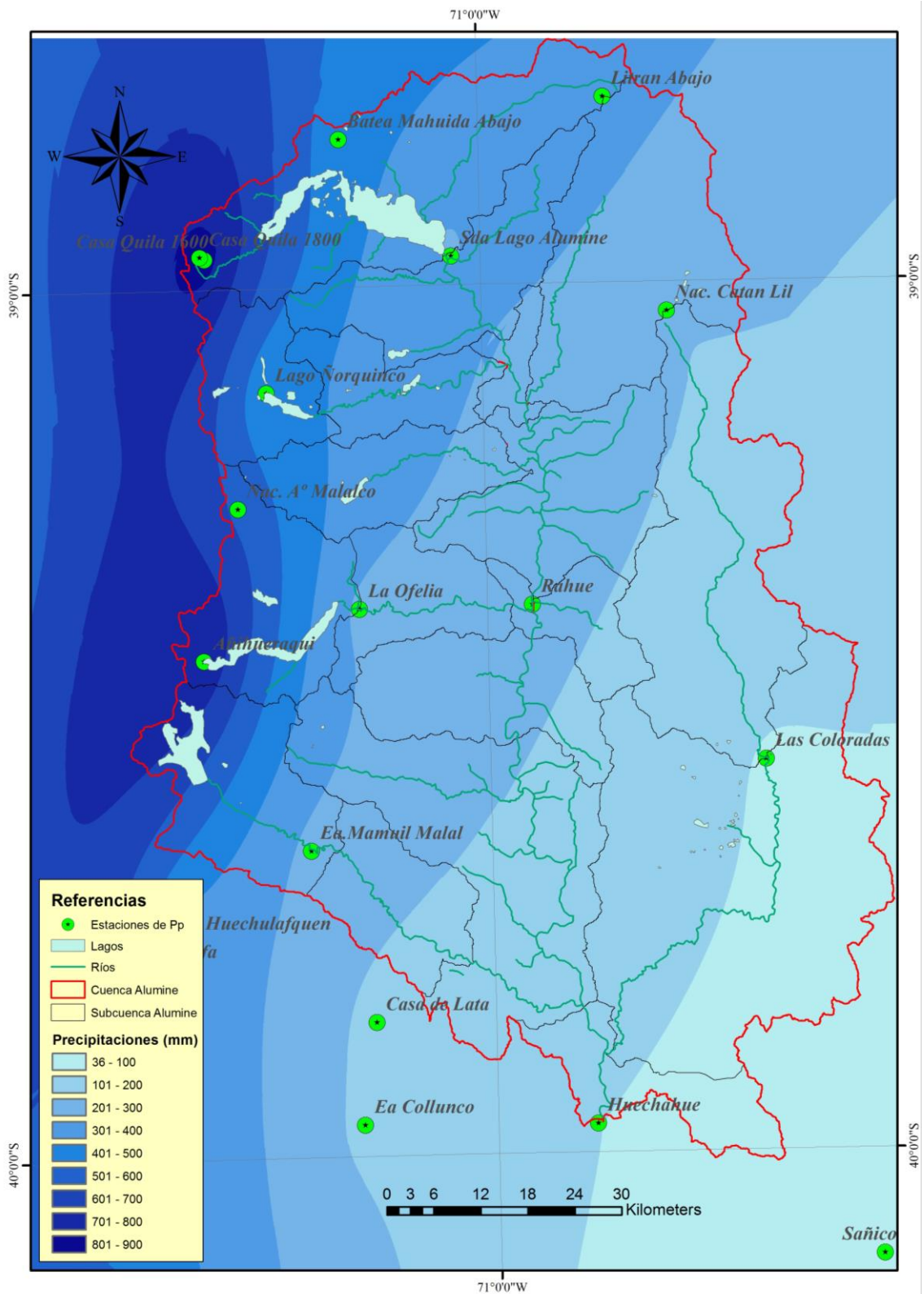


Fig 9-12: Mapa de precipitaciones – Evento 7 – Julio 2006.

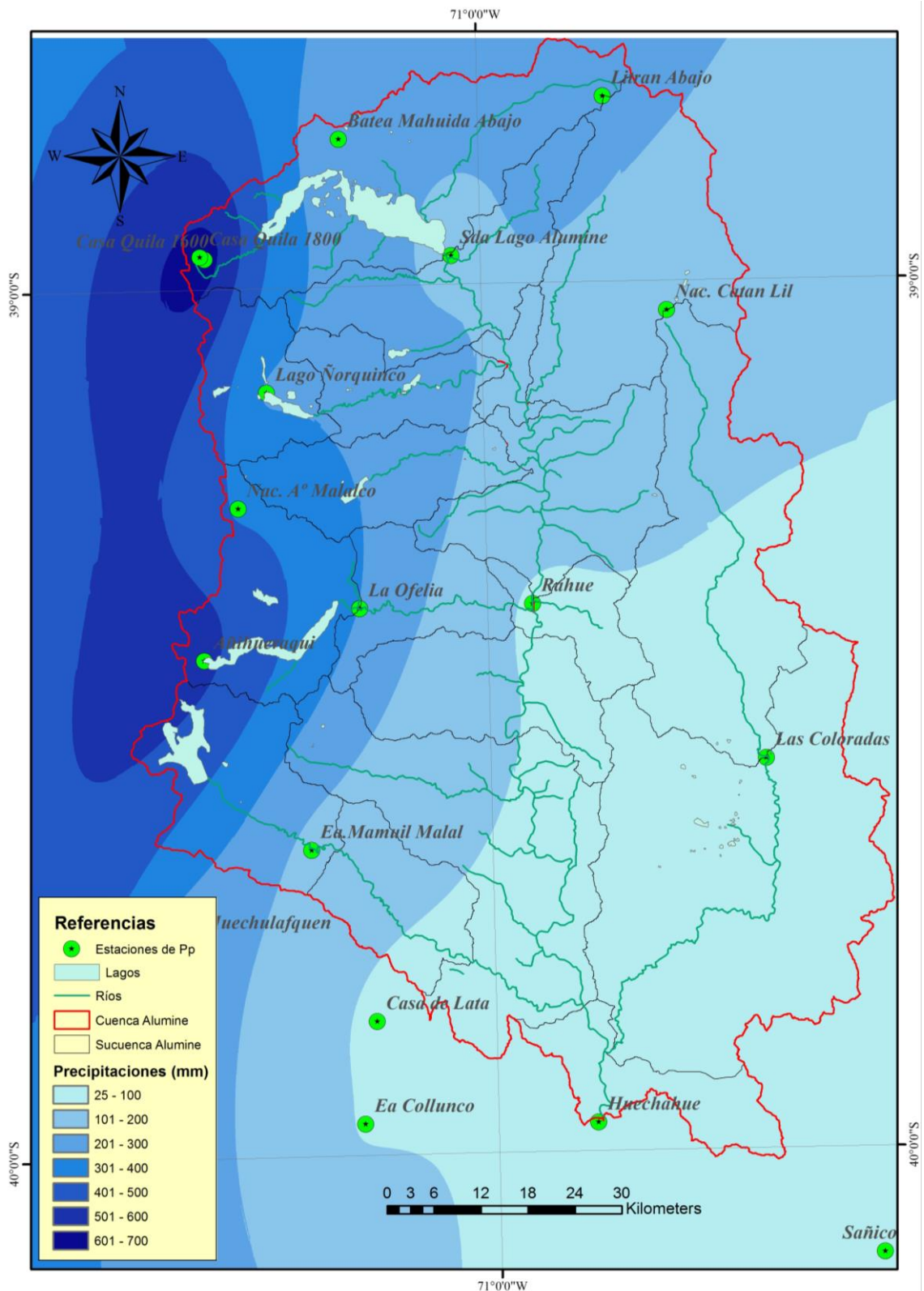


Fig 9-13: Mapa de precipitaciones – Evento 11 – Octubre 2011.

9.2. Estimación del gradiente altitudinal de precipitaciones P_{calt} .

Es necesario calcular un gradiente altitudinal de precipitaciones P_{calt} para cada subcuenca de estudio, por eso es necesario analizarlas una a una por separado.

Haciendo uso de las herramientas ArcGIS, se calcula la precipitación media por franja de altura (100m) para cada evento de lluvia.

Como puede observarse en la siguiente figura, la distribución de las precipitaciones en función de la altura puede ajustarse mediante una ecuación lineal de la forma:

$$P_{Fi} = a * h_{Fi} + b \quad (1)$$

Dónde:

- P_{Fi} : Precipitación media de la franja i (mm).
- h_{Fi} : valor altimétrico de la franja i (msnm).

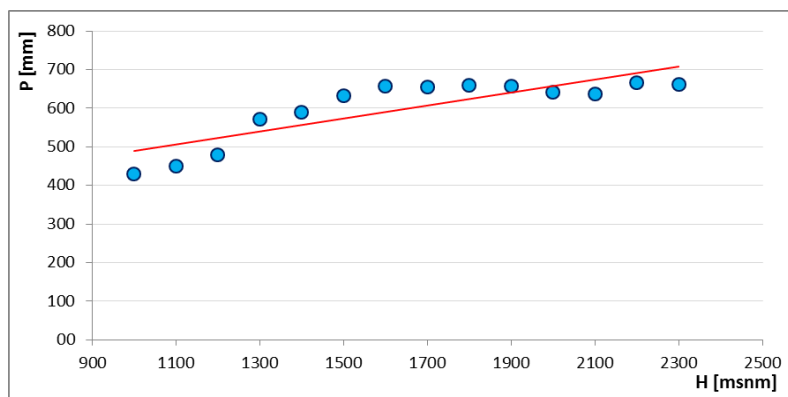


Fig 9-14: Distribución de lluvias con relación a la altura.

Como la distribución de las precipitaciones es conocida, los valores de a y b de la recta de tendencia también son conocidos.

Sabiendo además que:

$$P_{md Fi} = P_{md} * (1 + h * P_{calt})$$

$$h = h_{Fi} - h_{md}$$

$$P_{md Fi} = P_{md} * [1 + (h_{Fi} - h_{md}) * P_{calt}]$$

$$P_{md Fi} = P_{md} * [1 + P_{calt} * h_{Fi} - P_{calt} * h_{md}]$$

$$P_{md Fi} = P_{md} + P_{calt} * h_{Fi} * P_{md} - P_{calt} * h_{md} * P_{md}$$

$$P_{md Fi} = (P_{calt} * P_{md}) * h_{Fi} + P_{md} * (1 - P_{calt} * h_{md}) \quad (2)$$

Comparando (1) y (2) se observa que ambas son ecuaciones lineales donde la precipitación de cada franja altitudinal está en función de la altura de dicha franja, por lo se tiene:

$$a = P_{calt} * P_{md}$$

$$b = P_{md} * (1 - P_{calt} * h_{md})$$

Como P_{calt} y P_{md} son incógnitas, se tiene:

$$P_{md} = \frac{a}{P_{calt}}$$

$$b = \frac{a}{P_{calt}} * (1 - P_{calt} * h_{md}) = \frac{a}{P_{calt}} - a * h_{md}$$

Por último se tiene que:

$$P_{calt} = \frac{a}{(b + a * h_{md})}$$

Dónde:

- a: Pendiente de la recta de tendencia.
- b: Ordenada al origen de la recta de tendencia.

Como puede verse, el coeficiente P_{calt} está en función del valor de h_{md} adoptado. Por lo tanto es necesario fijar un valor de h_{md} .

Se determinó un valor P_{calt} para cada evento y se adoptó el valor promedio para utilizar en el modelo IHMS/HBV.

Tabla 9-2: Valores de P_{calt} por evento para cada subcuenca.

CUENCA	Hmd	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	Pcalt Prom.
ALU/LAGO	1535	-0.020	-0.037	-0.051	-0.024	-0.035	-0.032	-0.022	-0.048	-0.022	-0.046	-0.016	-0.038	-0.044	-0.027	-0.039	-0.049	-0.057	-0.034	-0.036
ALU/EXBAL	1300	0.029	0.035	0.039	0.031	0.045	0.033	0.030	0.034	0.038	0.054	0.032	0.031	0.043	0.038	0.036	0.065	0.065	0.032	0.039
NORQUINCO	1350	-0.005	-0.006	0.000	-0.005	-0.006	-0.001	-0.004	-0.003	-0.005	-0.004	-0.003	-0.005	-0.003	-0.002	-0.003	-0.007	-0.005	-0.005	-0.004
PUL/CONF	1050	0.028	0.034	0.030	0.029	0.040	0.027	0.028	0.029	0.033	0.043	0.025	0.031	0.039	0.027	0.028	0.054	0.052	0.031	0.034
KILKA	1800	-0.014	-0.022	-0.033	-0.010	-0.022	-0.020	-0.011	-0.037	-0.004	-0.020	-0.006	-0.025	-0.020	-0.009	-0.029	-0.021	-0.051	-0.013	-0.021
ALU/CEF	1170	0.006	0.001	-0.001	0.004	0.001	-0.003	0.004	-0.005	0.003	0.001	0.007	0.007	0.001	-0.005	-0.005	0.006	-0.012	0.001	0.001
RUCA/PIED	1100	0.034	0.026	0.042	0.033	0.045	0.026	0.024	0.036	0.053	0.057	0.050	0.044	0.036	0.046	0.032	0.071	0.043	0.025	0.040
ALU/RAHUE	1230	-0.013	-0.023	-0.022	-0.009	-0.017	-0.022	-0.012	-0.029	-0.001	-0.013	0.002	-0.017	-0.014	-0.008	-0.025	-0.012	-0.039	-0.014	-0.016
QUI/OFEL	1050	-0.027	-0.025	-0.020	-0.025	-0.023	-0.021	-0.026	-0.020	-0.024	-0.026	-0.018	-0.028	-0.025	-0.026	-0.021	-0.035	-0.022	-0.028	-0.024
QUI/SROSA	930	0.014	0.006	0.017	0.011	0.013	0.004	0.011	0.009	0.011	0.018	0.029	0.017	0.012	0.012	0.005	0.017	0.001	0.007	0.012
ALU/SIB	880	-0.019	-0.032	-0.023	-0.011	-0.017	-0.027	-0.018	-0.037	0.002	-0.015	-0.003	-0.007	-0.009	-0.010	-0.024	-0.019	-0.035	-0.025	-0.018
ALU/MLUNA	900	-0.010	-0.020	-0.012	-0.005	-0.008	-0.016	-0.010	-0.020	0.004	-0.004	0.005	-0.001	-0.006	-0.004	-0.015	-0.003	-0.021	-0.014	-0.009
MAL/MAMUIL	960	0.010	0.010	0.008	0.008	0.006	0.005	0.013	0.004	0.009	0.011	0.012	0.006	0.008	0.010	0.004	0.007	-0.001	0.011	0.008
MAL/PTE	835	0.032	0.038	0.032	0.039	0.038	0.040	0.037	0.046	0.037	0.055	0.070	0.031	0.026	0.046	0.030	0.061	0.035	0.033	0.040
ALU/ALINCO	860	0.076	0.094	0.093	0.090	0.080	0.084	0.073	0.128	0.073	0.135	0.122	0.070	0.061	0.084	0.065	0.199	0.098	0.078	0.095
CATAN/COL	1220	0.036	0.033	0.021	0.016	0.007	0.014	0.030	0.027	0.007	0.025	0.042	0.000	0.016	0.011	0.006	0.030	0.000	0.034	0.022
CATAN/COIF	945	0.031	0.065	0.071	0.028	0.043	0.070	0.061	0.076	0.001	0.057	0.032	0.003	0.029	0.033	0.054	0.040	0.071	0.054	0.046
ALU/HUE	800	-0.038	-0.003	-0.082	-0.014	-0.056	-0.058	-0.052	-0.055	-0.027	-0.059	-0.044	-0.040	-0.101	-0.053	-0.087	0.018	-0.078	-0.057	-0.049

Tabla 9-3: Valores de P_{calt} para cada subcuenca.

CUENCA	P _{calt}	Hmd
ALU/LAGO	-0.036	1535
ALU/EXBAL	0.039	1300
ÑORQUINCO	-0.004	1250
PUL/CONF	0.034	1050
KILKA	-0.021	1800
ALU/CEF	0.001	1170
RUCA/PIED	0.040	1100
ALU/RAHUE	-0.016	1230
QUI/OFEL	-0.024	1050
QUI/SROSA	0.012	930
ALU/SIB	-0.018	880
ALU/MLUNA	-0.009	900
MAL/MAMUIL	0.008	960
MAL/PTE	0.040	835
ALU/ALINCO	0.095	860
CATAN/COL	0.022	1220
CATAN/COIF	0.046	945
ALU/HUE	-0.049	800

9.3.Elaboración de mapas de temperatura del aire.

9.3.1. Introducción.

Para la elaboración de los mapas de temperatura de la cuenca del Collón Cura se optó utilizar el método de regresión lineal múltiple, propuesto por Pons (1996) y Ninyerola (2000), el cual incluye la variable topográfica.

Trabajos como el realizado por Pons (1996) y Ninyerola (2000), proponen una metodología que relaciona la información geográfica (variables independientes) con la información climática (variable dependiente), dando una buena alternativa para generar información en zonas con baja densidad de estaciones. Otra gran ventaja del método propuesto es que la interpolación es corregida mediante un mapa de errores, obtenido de la regresión lineal, y que luego es utilizado para ajustar el mapa resultante de la fórmula encontrada, con el fin de reproducir en el mapa aquel porcentaje del comportamiento de la variable que no es explicada mediante la fórmula.

9.3.2. Datos.

En el siguiente trabajo se utilizan los datos de temperatura media del aire de 24 estaciones meteorológicas, pertenecientes a la red de estación de la AIC, con paso temporal de 6 horas (0:00; 6:00; 12:00; 18:00). En este modelo no se utilizan los valores de temperatura máxima y mínima medida por las estaciones.

Se utilizaron estaciones de temperatura dentro de la cuenca y sus alrededores, con su correspondiente ubicación geográfica y altitud (x,y,z) y el valor de temperatura media diaria (T) representativa de cada evento seleccionado.

Los valores de altitud se obtuvieron del modelo de elevación digital (DEM), el cual se obtuvo del Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN), cuya resolución espacial es de 45 metros.

La información de referencia espacial de los archivos utilizados durante el proceso de elaboración de los mapas fueron: WGS 84 (coordenadas geográficas).

Tabla 9-4: Ubicación geográfica de estaciones de temperaturas.

Estación	Código	Altura dem [msnm]	Latitud	Longitud
Puesto Cordoba	t41003	834	-40.50511	-71.15296
Sda L° Meliquina	t41101	930	-40.38690	-71.25692
Cerro Chapelco	t41321	1835	-40.26433	-71.35408
Cerro Mocho	t41511	1500	-40.31902	-71.51522
Puesto Lopez	t41604	885	-40.49617	-71.25550
Sda Lago Alumine	t60003	1156	-38.96630	-71.05037
Rahue	t60007	865	-39.36994	-70.93306
Huechahue	t60027	668	-39.97232	-70.84150
Ea.Mamuil Malal	t61006	924	-39.64740	-71.26956
La Ofelia	t62004	973	-39.37330	-71.18904
Añihueraqui	t62107	982	-39.42748	-71.42165
Nac. A° Malalco	t62502	1270	-39.25325	-71.36553
Lago Ñorquinco	t64101	1063	-39.12104	-71.31880
Batea Mahuida Abajo	t68004	1607	-38.83100	-71.20400
Litrán Abajo	t68103	1729	-38.75025	-70.87192
Casa Quila 1600	t68221	1541	-38.96594	-71.40600
Casa Quila 1800	t68222	1645	-38.96283	-71.41208
Las Coloradas	t69008	909	-39.55237	-70.59000
Nac. Catan Lil	t69009	2131	-39.03500	-70.72625
Casa de Lata	t70003	852	-39.84437	-71.17795
Ea Collunco	t71001	879	-39.96467	-71.19900
L° Huechulafquen	t72003	907	-39.74825	-71.47633
Pto Antiao	t72106	969	-39.75040	-71.62539
Cerro Huicuífa	t72107	1586	-39.76539	-71.60830

Se seleccionaron 15 eventos de precipitaciones más importantes en el periodo de tiempo 1/4/2000 al 1/4/2015, y se calcularon las temperaturas medias de cada uno.

Además de eventos de tormentas se calcularon las temperaturas medias mensuales con el objetivo de estudiar la variación de las temperaturas a lo largo del año.

9.3.3. Método.

El método utilizado fue propuesto por Pons (1996) y Ninyerola et al. (2000), basado en técnicas de regresión lineal múltiple para la interpolación espacial de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas. Lo resaltante de este método es que al final los mapas resultantes son corregidos utilizando los residuales, producto de la regresión lineal múltiple. La fórmula de regresión lineal múltiple debe de cumplir ciertos supuestos para que pueda ser aplicable, los cuales se mencionan a continuación:

- Normalidad: La variable a predecir tiene que tener un comportamiento normal
- Homocedasticidad, es decir varianzas homogéneas

- Autocorrelación, errores no correlacionados
- Multicolinealidad, regresores independientes

Algebra de mapas

El proceso de regresión lineal múltiple pasa por el proceso de obtener matrices ráster de las distintas variables independientes: Modelo de elevación digital, latitud y longitud. Estos ráster (variables independientes), se relacionan con la variable climática (variable dependiente).

9.3.4. Calibración y Validación

El proceso de calibración consiste en sumar el “ráster” de residuales, con el “ráster” del modelo de regresión lineal múltiple obtenido de la data de temperatura para así obtener el mapa final.

Los residuales son obtenidos de la diferencia entre los valores medidos en la estación meteorológica y los obtenidos mediante el proceso de regresión lineal múltiple.

$$Error = T_{real} - T_{Estim}$$

Fue necesario un método de interpolación simple para representar los residuales de la variable temperatura, acción necesaria debido a que los residuales representan aquel porcentaje del comportamiento de la variable que no puede ser explicado mediante el comportamiento físico normal de la variable.

En nuestro caso se usó el IDW para la interpolación de los residuales, debido a que da un peso mayor a los pixeles cercanos al pixel conocido, y por tanto tienen a tener un comportamiento similar a éste; mientras que los que se encuentran lejanos tienen un peso menor.

Para la validación de los mapas se utilizó el método de la validación cruzada generalizada (GCV, Generalized Cross-Validation), el cual se define como el error cuadrático promedio entre los valores estimados y los valores observados, cuando el valor observado en cuestión es dejado fuera del proceso de estimación. Esta es una medida de qué tan bien la superficie es capaz de estimar un valor observado cuando éste no es utilizado en el proceso de estimación.

Como indicador de la bondad del ajuste se usó el coeficiente de determinación (R^2), y como medida de error el Root Mean Square Error (RMSE), además del Sesgo (Bias);

mientras menores sean estos dos últimos índices, mejor será el funcionamiento del modelo.

Se utilizaron 11 estaciones para el proceso de validación, las cuales debían estar distribuidas a lo largo de toda la cuenca, para procurar representar el comportamiento de la variable en toda la cuenca de estudio.

Tabla 9-5: Ubicación geográfica de estaciones de validación de temperaturas.

Estación	Código	Altura dem [msnm]	Latitud	Longitud
ALUMINE	06000.16	925	-39.23333	-70.91667
SALIDA LAGO ÑORQUINCO	06400.02	1059	-39.14397	-71.23695
MALLEO ABAJO	06100.09	751	-39.79591	-71.00264
HOSTERIA MOQUEHUE	06820.04	1161	-38.94744	-71.33133
EA. LOS REMOLINOS	06910.01	794	-39.71634	-70.68271
EA. CERRO DE LOS PINOS	07000.04	731	-40.09981	-71.01748
CERRO LITRAN	06810.01	2197	-38.78733	-70.81500
ALICURA	02000.08	660	-40.58723	-70.75128
JUNIN AUTOMATICA	07000.12	812	-39.89944	-71.13528
LA ANGOSTURA (DIR.BOS.P.NQN)	06820.07	1158	-38.867926	-71.203912
LOS NOTROS	07310.04	927	-40.016667	-71.366667

9.3.5. Resultados.

Prueba de Normalidad.

Previamente a la regresión lineal múltiple se realizó la prueba de normalidad en el SPSS. La normalidad se da cuando los valores de la variable aleatoria dependiente (temperaturas) siguen una distribución normal en la población a la que pertenece la muestra.

La variable temperatura de por si tiene un comportamiento normal; sin embargo para comprobar esta condición se puede realizar:

- Gráfico P-P plot: en donde los valores deben acercarse al comportamiento de una curva normal, línea patrón que atraviesa el gráfico.
- Analizarse por medio de un histograma.
- Prueba de normalidad Shapiro-Wilk: Prueba de normalidad para muestras menos a 50 observaciones,

Los resultados muestran que la variable temperatura tiene un comportamiento normal, tal como se observa en las siguientes Figuras.

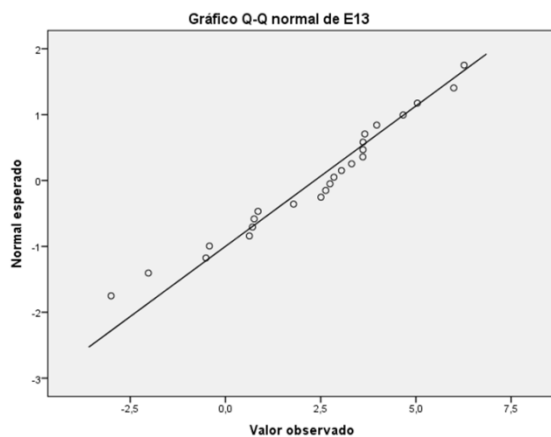


Fig 9-15: Prueba de Normalidad - Gráfico P-P plot.

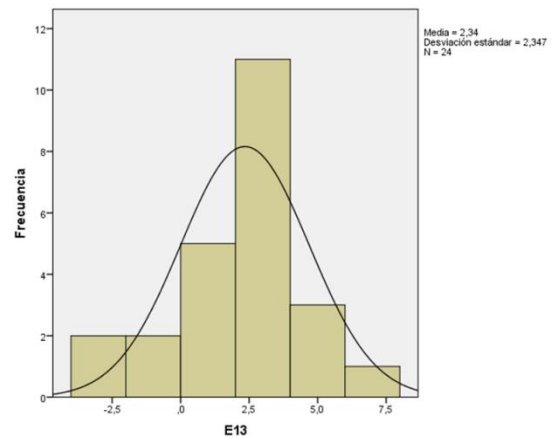


Fig 9-16: Prueba de Normalidad - Histograma.

Prueba de hipótesis Shapiro-Wilk:

- H_0 : La variable temperatura tiene distribución Normal.
- H_1 : La variable temperatura es distinta a la distribución Normal.
- $\alpha = 0.05$ nivel de significación.

Si el valor de significancia es mayor a 0.05 se rechaza la hipótesis alternativa (H_1), por lo tanto la distribución es normal.

Tabla 9-6: Prueba de Normalidad: Shapiro-Wilk

Eventos	Pruebas de normalidad			
	Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	Sig.	Conclusión
E1	.947	24	.230	NORMAL
E2	.957	24	.386	NORMAL
E3	.950	24	.265	NORMAL
E4	.950	24	.267	NORMAL
E5	.937	24	.143	NORMAL
E6	.974	24	.768	NORMAL
E7	.949	24	.253	NORMAL
E8	.968	24	.622	NORMAL
E9	.927	24	.083	NORMAL
E10	.955	24	.340	NORMAL
E11	.959	24	.415	NORMAL
E12	.922	24	.066	NORMAL
E13	.962	24	.490	NORMAL
E17	.941	24	.169	NORMAL
E18	.954	24	.334	NORMAL

- **Conclusión:** Los eventos de temperaturas analizados siguen una distribución normal.

Prueba de Homocedasticidad.

Fue necesario realizar la prueba de homocedasticidad o igualdad de varianzas, lo cual implica que todos los grupos a analizar poseen la misma varianza o que las varianzas de los residuos eran homogéneas.

La homocedasticidad se estudió utilizando la prueba de Levene:

Prueba de hipótesis:

- H_0 : No existen diferencias significativas entre las varianzas de la variable temperatura en los distintos eventos.
- H_1 : Existen diferencias significativas entre las varianzas de la variable temperatura de al menos 2 grupos.
- $\alpha = 0.05$ nivel de significación.

Si el valor de significancia es mayor a 0.05 se rechaza la hipótesis alternativa (H_1), por lo tanto la variable temperatura tienen homocedasticidad en los distintos eventos.

Tabla 9-7: Prueba de Homocedasticidad.

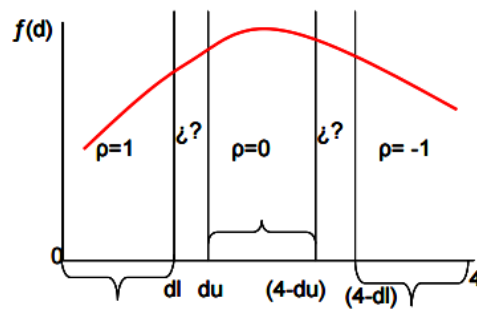
Prueba de homogeneidad de varianzas				
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.	Conclusión
.766	14	345	1	TIENEN HOMOCEASTICIDAD

- **Conclusión:** La variable temperatura tienen homocedasticidad en los distintos eventos.

Autocorrelación - Prueba de Durbin y Watson.

El Test de Durbin-Watson permite evaluar si existe autocorrelación en una Regresión lineal, sea simple o múltiple. Con ello se pretende ver si los valores presentan algún tipo de dependencia en cuanto al orden de obtención. Si fuera así se estaría incumpliendo una de las condiciones del modelo.

Para rechazar o no la hipótesis nula de que no hay autocorrelación de primer orden en las perturbaciones, se consideran los límites inferior dL y superior du , dados en tablas, valores que dependen del número de muestras, número de parámetros y nivel de significancia.



<u>Valor del Durbin entre</u>	<u>Valor del ρ</u>	<u>Conclusión</u>
Limites 0—dL	1	Autocorrelación Positiva
Limites dL—dU	$\zeta?$	Ausencia de Evidencia
Limites dU—4-dU	0	Ausencia de Autocorrelación
Limites 4-dU—4-dL	$\zeta?$	Ausencia de Evidencia
Limites 4-dL—4	-1	Autocorrelación Negativa

Fig 9-17: Autocorrelación: Prueba de Durbin-Watson - Limites.

Tabla 9-8: Datos de entrada - Test de Durbin-Watson.

N	24
α	0.05
k	3
dL	1.12
dU	1.66
(4 - dU)	2.34
(4 - dL)	2.88

Tabla 9-9: Autocorrelación – Resultados Test de Durbin-Watson.

Evento	d	Test
E1	1.426	S/E
E2	1.496	S/E
E3	1.890	VERIFICA
E4	1.774	VERIFICA
E5	1.556	VERIFICA
E6	1.452	S/E
E7	1.461	S/E
E8	1.816	VERIFICA
E9	1.643	S/E
E10	1.492	S/E
E11	1.752	VERIFICA
E12	1.586	S/E
E13	1.82	VERIFICA
E17	1.724	VERIFICA
E18	1.52	S/E

- **Conclusión:** No existe evidencia que haya autocorrelación entre las variables predictoras, es decir entre la longitud, latitud y la altitud. De todas formas hay eventos de los cuales no puede sacarse conclusión y habría que analizar más en detalles.

Multicolinealidad.

La multicolinealidad también puede ser calculada en el SPSS. La colinealidad puede analizarse por medio del Nivel de Tolerancia (valores menores a 0,10 indican multicolinealidad); o por medio del factor de agrandamiento de la varianza (FAV), algunos autores dicen que existen problemas graves de multicolinealidad cuando éste es mayor de 10; sin embargo valores mayores a 4 merecen atención.

Tabla 9-10: Multicolinealidad - Valores de Tolerancia y FAV.

Variable	Tolerancia	FAV
Altura	0.794	1.259
Latitud	0.759	1.318
Longitud	0.930	1.076

Además se analizó la matriz de correlación entre las variables independientes, con el fin de detectar colinealidad entre las variables.

Tabla 9-11: Multicolinealidad - Correlación.

Correlaciones				
		Altura dem [msnm]	Latitud	Longitud
Altura dem [msnm]	Correlación de Pearson	1	.430*	-.046
	Sig. (bilateral)		.036	.832
	N	24	24	24
Latitud	Correlación de Pearson	.430*	1	.216
	Sig. (bilateral)	.036		.311
	N	24	24	24
Longitud	Correlación de Pearson	-.046	.216	1
	Sig. (bilateral)	.832	.311	
	N	24	24	24

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

A pesar que los valores de FAV y tolerancia no indican que halla multicolinealidad, la matriz de correlaciones muestra una correlación significativa entre la altura y la latitud.

- **Conclusión:** Habría que descartar la latitud como variable independiente de la regresión múltiple ya que existe evidencia que tiene una colinealidad con la altura.

Influencia variables independientes.

Adicionalmente se muestra los resultados de la influencia que ejerce cada variable predictora (latitud, longitud y altura), sobre la temperatura. Se observa que la altura tiene mayor influencia en el comportamiento de la variable, con un R^2 superior a 0.9; mientras que las variables independientes latitud y longitud tienen una influencia mucho menor, que apenas llega a un R^2 de 0.13 y 0.05 respectivamente.

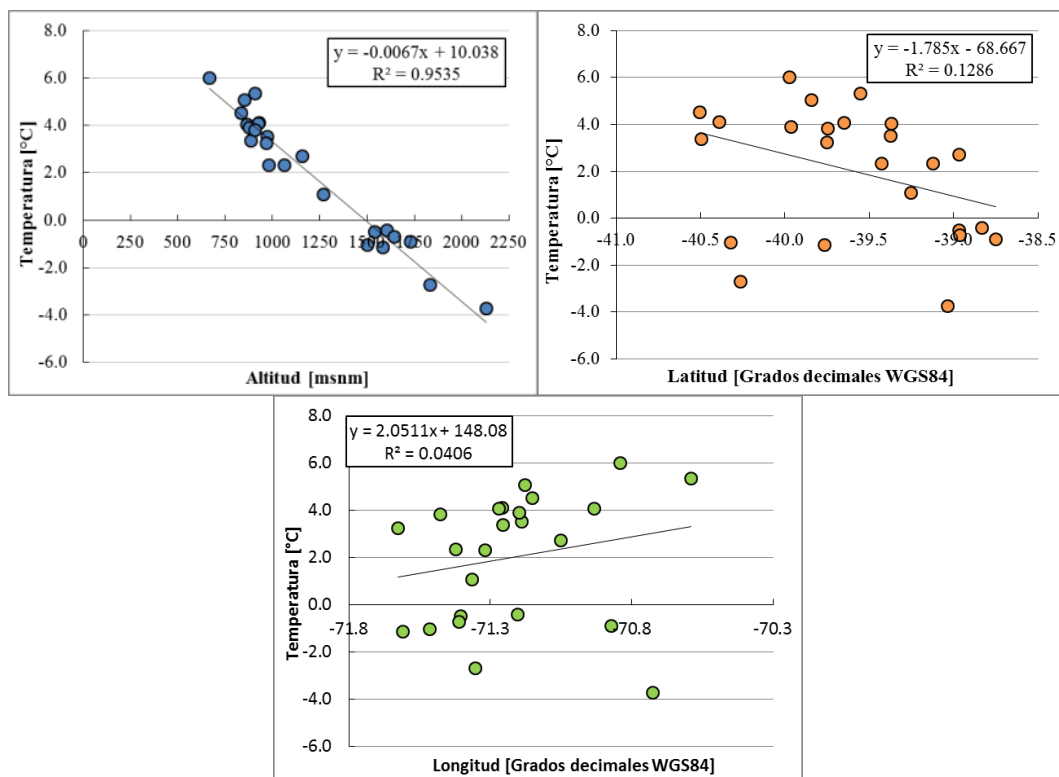


Fig 9-18: Relación entre cada variable y la temperatura.

- **Conclusión:** Dado que la relación de la temperatura con la altura es tan alta, y con la latitud y longitud tan baja, es posible descartar estas últimas dos de la regresión lineal múltiple. Incluir la latitud y longitud al método no aporta mejoras sustanciales que justifiquen el incremento de cálculos.

Algebra de mapas.

- A. En primer lugar se debe obtener la regresión lineal de los datos de temperatura con la altura en cada uno de los eventos. A continuación se desarrolla un ejemplo con el evento E1.

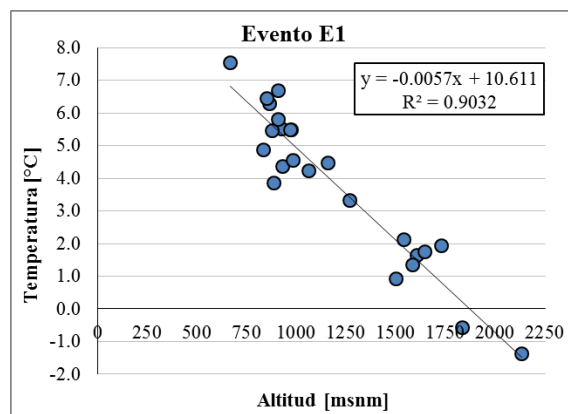


Fig 9-19: Relación lineal entre la temperatura y la altitud.

B. Haciendo uso de la herramienta ArcGis se calculan los ráster de temperatura, calculado en función de la altitud. Para esto se usa el DEM antes mencionado y las ecuaciones de la regresión lineal de cada evento antes calculadas. Con las mismas ecuaciones se puede calcular la temperatura estimadas en cada estación, y los errores de la misma.

Tabla 9-12: Error de temperaturas en cada estación.

Estación	Código	Altura dem [msnm]	E1		
			Temp Real	Temp Estimada	Error (Tr - Te)
Puesto Cordoba	t41003	834	4.9	5.9	-1.0
Sda L° Meliquina	t41101	930	4.4	5.3	-1.0
Cerro Chapelco	t41321	1835	-0.6	0.2	-0.8
Cerro Mocho	t41511	1500	0.9	2.1	-1.2
Puesto Lopez	t41604	885	3.8	5.6	-1.7
Sda Lago Alumine	t60003	1156	4.5	4.0	0.4
Rahue	t60007	865	6.3	5.7	0.6
Huechahue	t60027	668	7.5	6.8	0.7
Ea.Mamuil Malal	t61006	924	5.5	5.4	0.1
La Ofelia	t62004	973	5.5	5.1	0.4
Añihueraqui	t62107	982	4.6	5.0	-0.5
Nac. A° Malalco	t62502	1270	3.3	3.4	-0.1
Lago Ñorquinco	t64101	1063	4.2	4.6	-0.4
Batea Mahuida Abajo	t68004	1607	1.6	1.5	0.1
Litran Abajo	t68103	1729	1.9	0.8	1.1
Casa Quila 1600	t68221	1541	2.1	1.9	0.2
Casa Quila 1800	t68222	1645	1.8	1.3	0.5
Las Coloradas	t69008	909	6.7	5.5	1.2
Nac. Catan Lil	t69009	2131	-1.4	-1.5	0.1
Casa de Lata	t70003	852	6.4	5.8	0.7
Ea Collunco	t71001	879	5.4	5.6	-0.2
L° Huechulafquen	t72003	907	5.8	5.5	0.3
Pto Antiao	t72106	969	5.5	5.1	0.4
Cerro Huicuiifa	t72107	1586	1.4	1.6	-0.2
Regreción Lineal		Pendiente	-0.0057		
		Ordenada	10.611		

- C. Con los errores calculados en cada estación se calcula un mapa para representar los residuales de la variable temperatura., para esto fue necesario un método de interpolación simple.
- D. Sumando el ráster de temperaturas en función de la altitud y el ráster de los residuos se obtienen el ráster de temperatura final. Esto se repite para todos los eventos seleccionados.

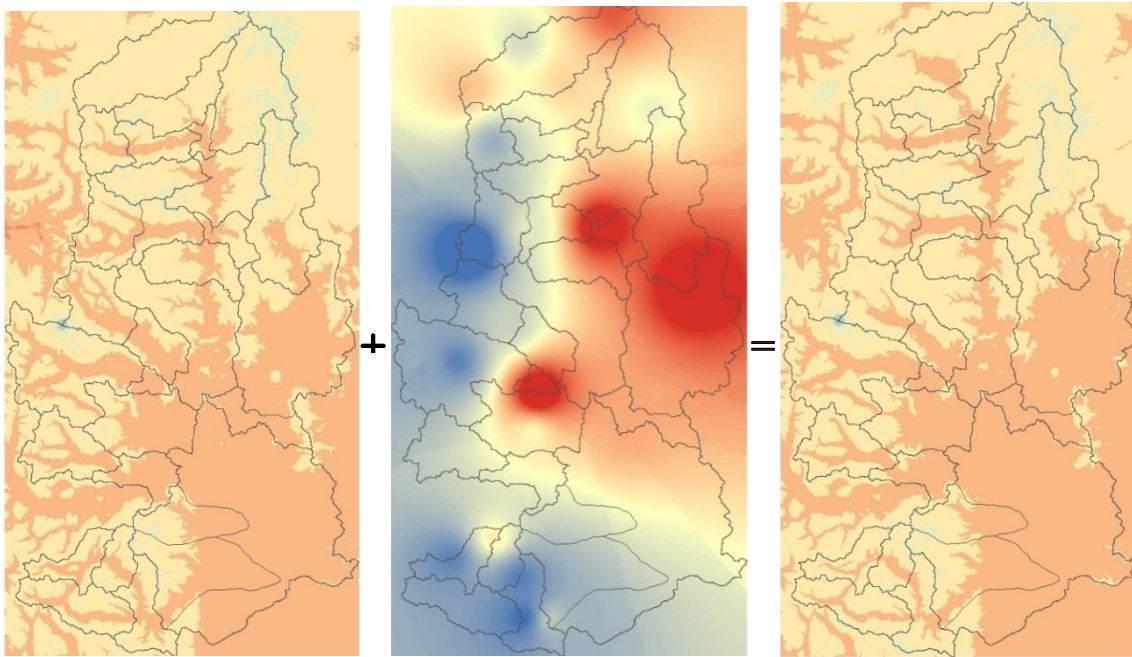


Fig 9-20: Resultado algebra de mapas de temperaturas.

Validación.

La siguiente tabla muestra los valores de coeficiente de determinación (R^2), del error medio cuadrático (RMSE) y del sesgo (BIAS) obtenidos del proceso de validación.

Tabla 9-13: Validación de mapas de temperaturas.

Evento	R ²	BIAS	RMES
E17	0.9148	-0.54	0.96
E18	0.9432	0.04	0.85
E1	0.9796	0.40	0.73
E2	0.9828	-0.21	0.48
E3	0.9433	0.24	0.90
E4	0.9166	-0.08	1.03
E5	0.9101	0.06	0.95
E6	0.9372	-0.13	0.87
E7	0.9518	0.11	1.01
E8	0.9486	0.47	0.91
E9	0.9168	-0.62	1.15
E10	0.8743	-0.95	1.71
E11	0.8889	0.14	1.19
E12	0.8776	-0.16	1.09
E13	0.8599	0.17	1.60
C1	0.8574	0.09	0.92
C2	0.7176	-0.08	1.56
C3	0.8852	-0.21	1.53
C4	0.8136	-0.94	2.13

- **Conclusión:** Los resultados muestran que el método de regresión lineal, utilizados para la elaboración de mapas de temperatura, tienen un nivel de precisión aceptable.

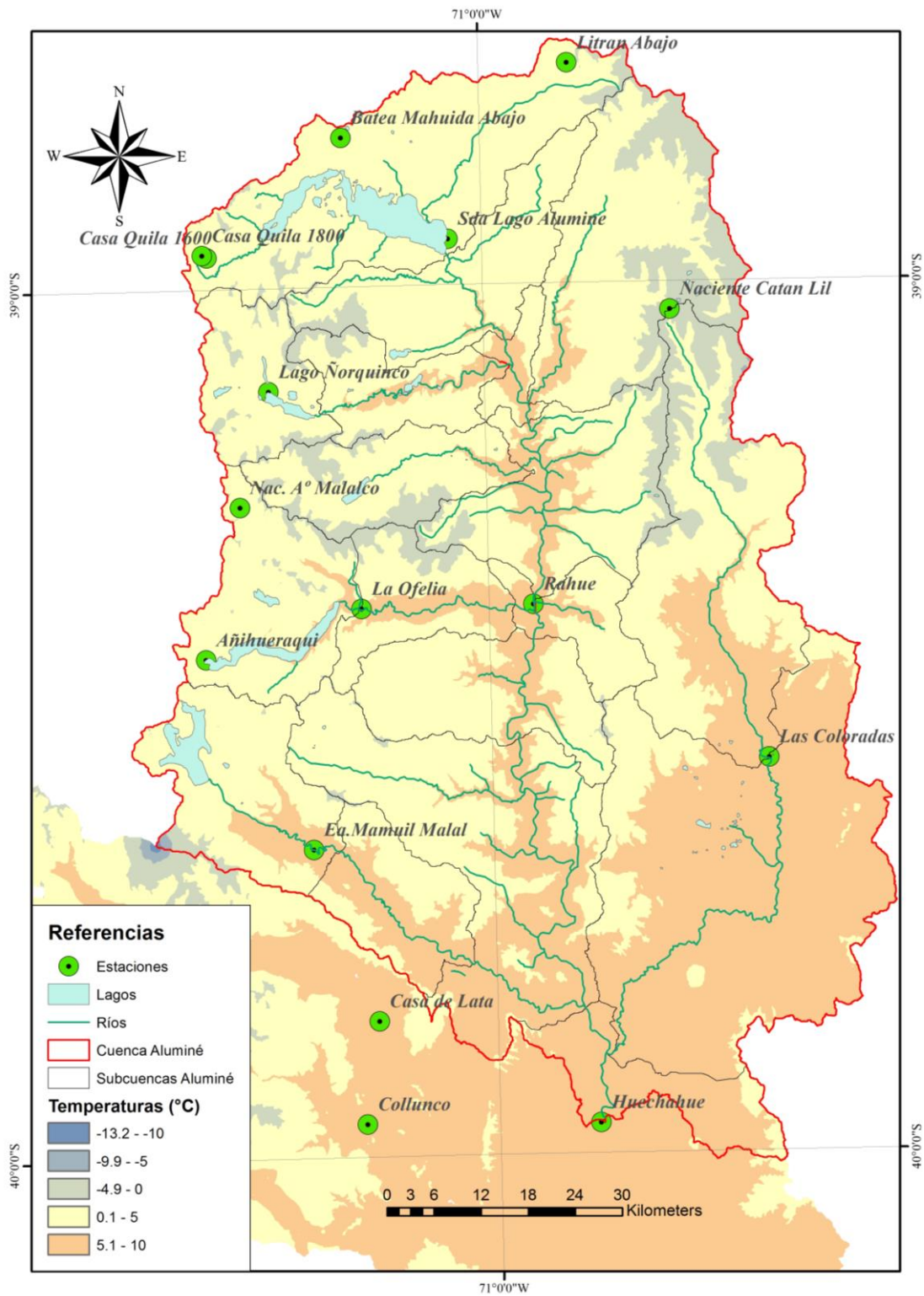


Fig 9-21: Mapa de temperatura – Evento 3 – Octubre 2002.

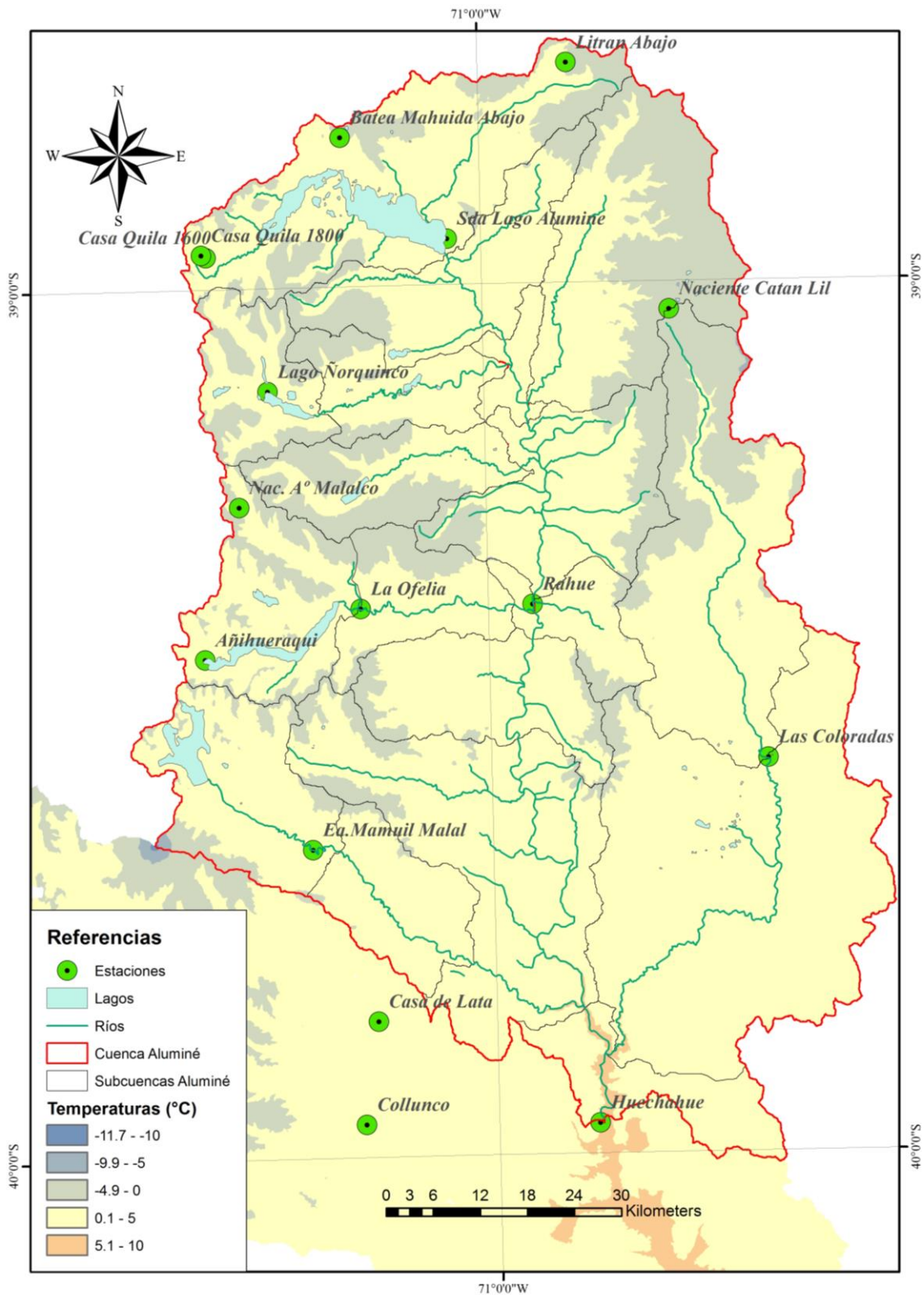


Fig 9-22: Mapa de temperatura – Evento 7 – Julio 2006.

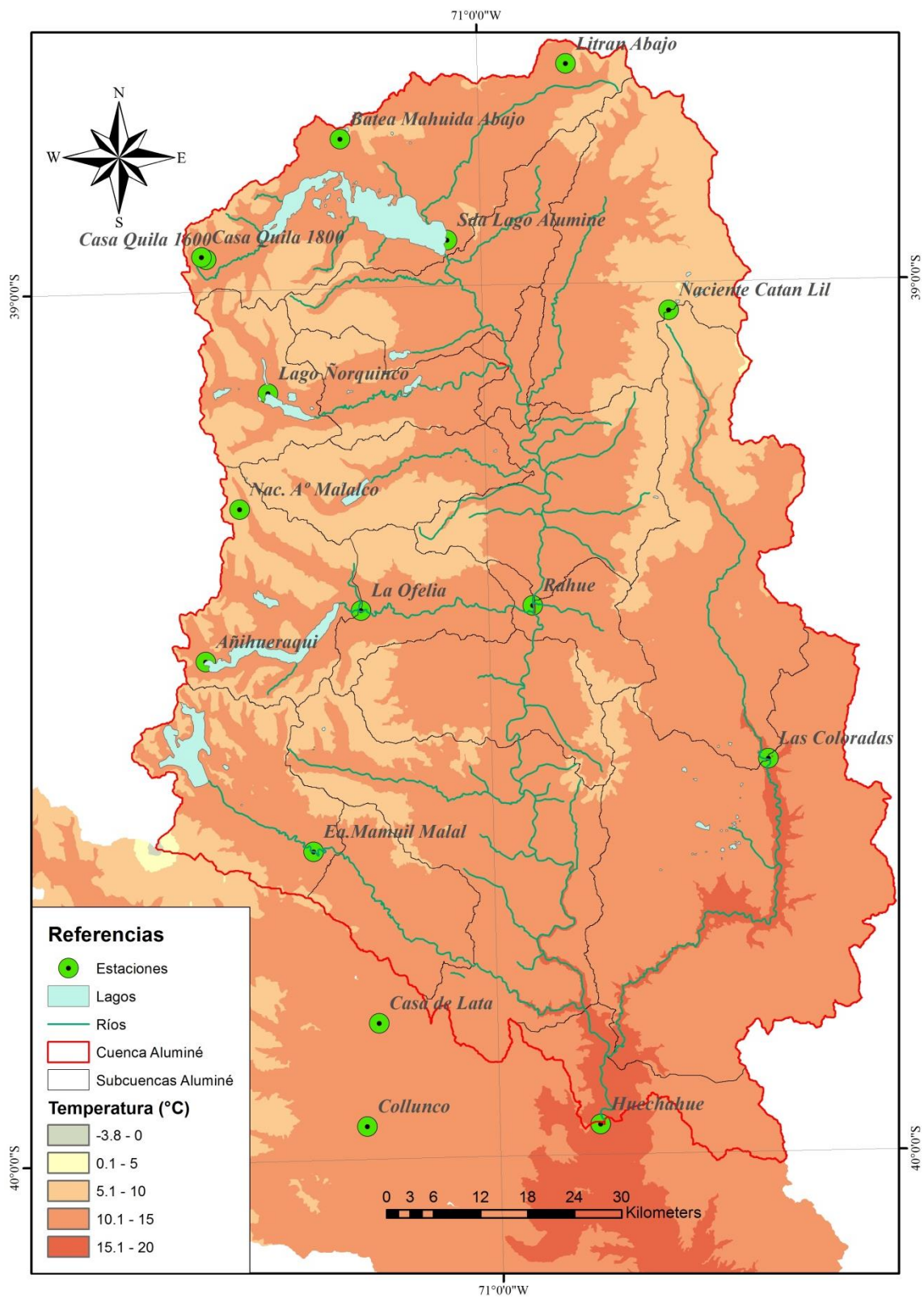


Fig 9-23: Mapa de temperatura – Promedio mensual - Diciembre.

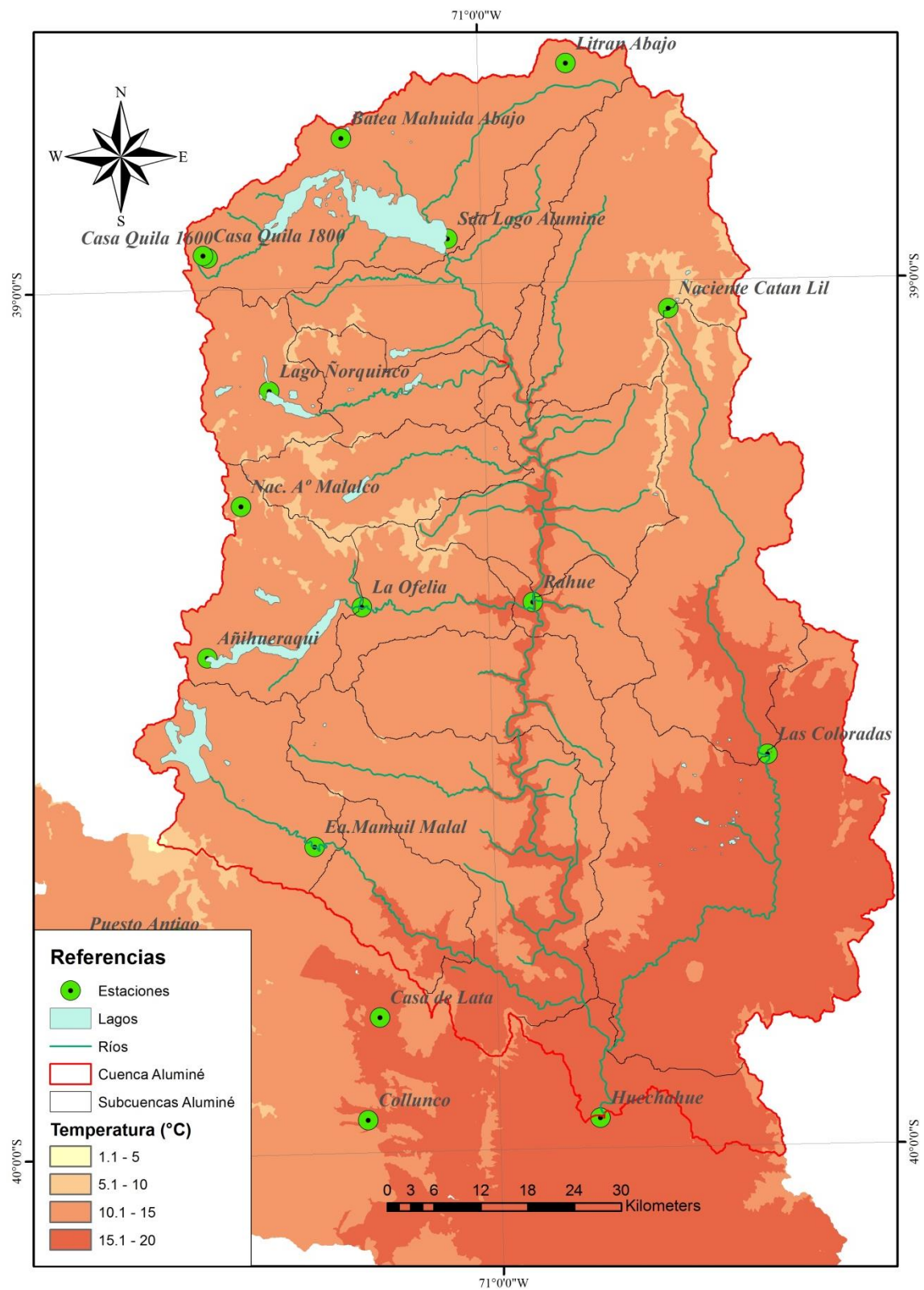


Fig 9-24: Mapa de temperatura – Promedio mensual - Febrero.

9.4. Estimación del gradiente altitudinal de Temperatura T_{calt}.

Es necesario calcular un gradiente altitudinal de temperaturas T_{calt} para cada subcuenca de estudio, por eso es necesario analizarlas una a una por separado.

Haciendo uso de las herramientas ArcGIS, se calcula la temperatura media por franja de altura (100m) para cada evento de temperatura.

Como puede observarse en la siguiente figura, la distribución de las temperaturas en función de la altura puede ajustarse mediante una ecuación lineal de la forma:

$$T_{Fi} = a * h_{Fi} + b \quad (1)$$

Dónde:

- T_{Fi}: Temperatura media de la franja i (°C).
- H_{Fi}: valor altimétrico de la franja i (msnm).

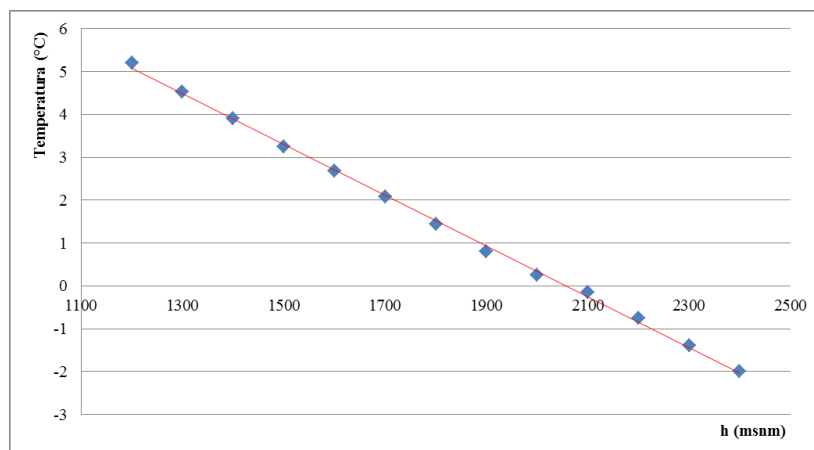


Fig 9-25: Distribución de la temperatura con relación a la altura.

Como la distribución de las temperaturas es conocida, los valores de a y b de la recta de tendencia también son conocidos.

Sabiendo además que:

$$T_{md Fi} = T_{md} + (h * T_{calt})$$

$$h = h_{Fi} - h_{md}$$

$$T_{md Fi} = T_{md} + [(h_{Fi} - h_{md}) * T_{calt}]$$

$$T_{md Fi} = T_{calt} * h_{Fi} + T_{md} - h_{md} * T_{calt} \quad (2)$$

Comparando (1) y (2) se observa que ambas son ecuaciones lineales donde la temperatura de cada franja altitudinal está en función de la altura de dicha franja, por lo se tiene:

$$T_{calt} = a$$

Dónde:

- a: Pendiente de la recta de tendencia.

Como puede verse, el coeficiente T_{calt} está dado por la pendiente de la línea de tendencia.

Se determinó un valor T_{calt} para cada mapa en los dos periodos, y se calculó el promedio de los eventos de acumulación y los de fusión:

Tabla 9-14: Valores de Tcalt acumulación para cada subcuenca.

CUENCA	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E17	E18	Promedio
ALU/LAGO	0.495	0.444	0.560	0.406	0.539	0.356	0.474	0.398	0.524	0.551	0.527	0.455	0.464	0.462	0.424	0.472
ALU/EXBAL	0.562	0.511	0.661	0.476	0.608	0.427	0.514	0.526	0.567	0.614	0.645	0.484	0.528	0.530	0.501	0.544
ÑORQUINCO	0.543	0.493	0.655	0.451	0.593	0.406	0.515	0.487	0.582	0.602	0.644	0.471	0.525	0.494	0.485	0.530
PUL/CONF	0.578	0.528	0.685	0.480	0.624	0.454	0.536	0.571	0.586	0.635	0.666	0.492	0.553	0.534	0.521	0.563
KILKA	0.558	0.509	0.662	0.465	0.600	0.428	0.529	0.525	0.590	0.614	0.640	0.487	0.543	0.511	0.496	0.544
ALU/CEF	0.559	0.508	0.665	0.458	0.605	0.430	0.530	0.530	0.586	0.618	0.642	0.479	0.543	0.504	0.502	0.544
RUCA/PIED	0.573	0.533	0.693	0.477	0.627	0.458	0.547	0.581	0.590	0.643	0.686	0.501	0.566	0.528	0.532	0.569
ALU/RAHUE	0.571	0.523	0.679	0.474	0.608	0.444	0.540	0.558	0.590	0.627	0.659	0.497	0.566	0.515	0.521	0.558
QUI/OFEL	0.537	0.492	0.630	0.456	0.593	0.423	0.514	0.501	0.558	0.581	0.609	0.470	0.503	0.493	0.485	0.523
QUI/SROSA	0.575	0.527	0.686	0.474	0.620	0.450	0.541	0.570	0.587	0.636	0.671	0.493	0.565	0.519	0.528	0.563
ALU/SIB	0.557	0.508	0.657	0.461	0.590	0.425	0.521	0.520	0.556	0.609	0.642	0.489	0.545	0.502	0.517	0.540
ALU/MLUNA	0.548	0.498	0.649	0.454	0.587	0.416	0.515	0.503	0.564	0.601	0.632	0.477	0.529	0.498	0.496	0.531
MAL/MAMUIL	0.563	0.509	0.674	0.472	0.611	0.427	0.529	0.521	0.604	0.624	0.670	0.481	0.544	0.511	0.492	0.549
MAL/PTE	0.571	0.527	0.668	0.465	0.619	0.443	0.551	0.590	0.589	0.643	0.674	0.484	0.560	0.515	0.528	0.562
ALU/ALINCO	0.582	0.547	0.705	0.482	0.640	0.463	0.567	0.636	0.599	0.667	0.705	0.501	0.590	0.535	0.553	0.585
CATAN/COL	0.549	0.554	0.605	0.562	0.743	0.504	0.664	0.499	0.590	0.681	0.663	0.681	0.717	0.549	0.554	0.611
CATAN/COIF	0.564	0.529	0.694	0.467	0.633	0.456	0.551	0.589	0.602	0.644	0.672	0.482	0.555	0.519	0.508	0.564
ALU/HUE	0.553	0.516	0.665	0.471	0.595	0.430	0.520	0.554	0.553	0.608	0.652	0.480	0.535	0.516	0.497	0.543

Tabla 9-15: Valores de Tcalt acumulación para cada subcuenca.

CUENCA	Enero	Febrero	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
ALU/LAGO	0.369	0.344	0.433	0.486	0.471	0.427	0.422
ALU/EXBAL	0.505	0.462	0.504	0.581	0.592	0.564	0.535
ÑORQUINCO	0.498	0.447	0.506	0.576	0.586	0.558	0.528
PUL/CONF	0.541	0.491	0.531	0.609	0.625	0.598	0.566
KILKA	0.490	0.449	0.520	0.580	0.583	0.550	0.529
ALU/CEF	0.502	0.453	0.522	0.586	0.592	0.561	0.536
RUCA/PIED	0.572	0.522	0.550	0.628	0.648	0.626	0.591
ALU/RAHUE	0.517	0.473	0.543	0.602	0.606	0.574	0.552
QUI/OFEL	0.484	0.438	0.495	0.557	0.569	0.539	0.514
QUI/SROSA	0.542	0.492	0.544	0.614	0.626	0.599	0.570
ALU/SIB	0.507	0.460	0.528	0.588	0.593	0.564	0.540
ALU/MLUNA	0.493	0.445	0.511	0.574	0.580	0.551	0.526
MAL/MAMUIL	0.526	0.469	0.521	0.601	0.616	0.589	0.554
MAL/PTE	0.551	0.508	0.541	0.612	0.629	0.605	0.574
ALU/ALINCO	0.611	0.569	0.578	0.651	0.675	0.659	0.624
CATAN/COL	0.578	0.533	0.589	0.656	0.668	0.636	0.610
CATAN/COIF	0.583	0.541	0.554	0.626	0.648	0.629	0.597
ALU/HUE	0.587	0.553	0.549	0.609	0.633	0.622	0.592

Tabla 9-16: Valores de Tcalt promedio para cada subcuenca.

CUENCA	ACUMULACIÓN	FUSIÓN	DIFERENCIA
ALU/LAGO	0.472	0.422	0.050
ALU/EXBAL	0.544	0.535	0.009
ÑORQUINCO	0.530	0.528	0.001
PUL/CONF	0.563	0.566	-0.003
KILKA	0.544	0.529	0.015
ALU/CEF	0.544	0.536	0.008
RUCA/PIED	0.569	0.591	-0.022
ALU/RAHUE	0.558	0.552	0.006
QUI/OFEL	0.523	0.514	0.009
QUI/SROSA	0.563	0.570	-0.007
ALU/SIB	0.540	0.540	0.000
ALU/MLUNA	0.531	0.526	0.006
MAL/MAMUIL	0.549	0.554	-0.005
MAL/PTE	0.562	0.574	-0.013
ALU/ALINCO	0.585	0.624	-0.039
CATAN/COL	0.611	0.610	0.001
CATAN/COIF	0.564	0.597	-0.033
ALU/HUE	0.543	0.592	-0.049

Como puede observarse, en ambos periodos el valor del gradiente de temperatura (Tcalt) tiene valores similares, por lo tanto puede usarse un único valor para todo el periodo de tiempo ya que representara bien tanto la acumulación como la fusión. En nuestro caso se optó por utilizar los valores de acumulación en el modelo IHMS/HBV, y representativos para todo el año.

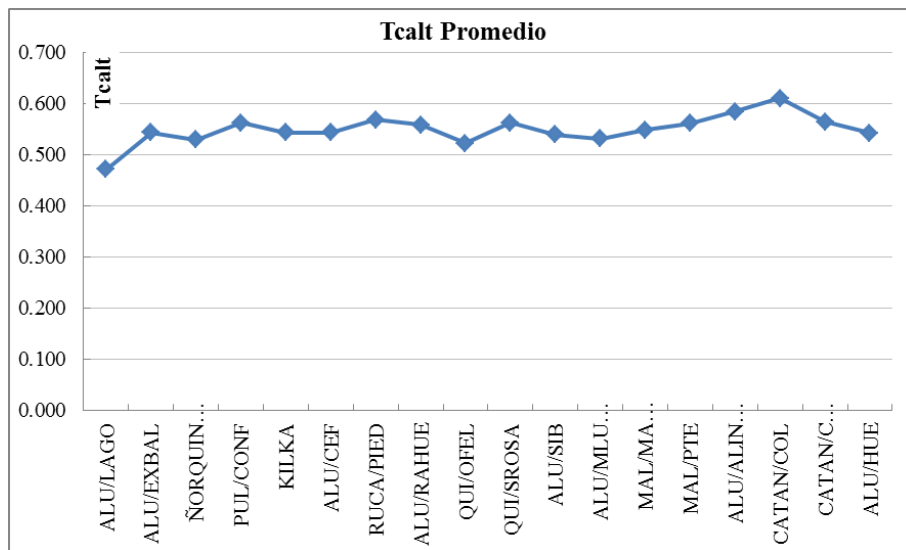


Fig 9-26: Valores de Tcalt para cada subcuenca.

9.5. Diagramas de resultados IHMS/HBV.

Los resultados gráficos de la salida del modelo para algunas cuencas en particular se esquematizan a continuación. Se representa el periodo de años hidrológicos 2000 – 2015.

Los gráficos tienen las siguientes referencias para su interpretación:

1- Lluvia y temperatura.

Precipitaciones: gráfico de barras (verde).

Temperaturas: gráfico de líneas (rojo).

2- Nieve acumulada y Humedad del Suelo.

Nieve acumulada de la simulación (Snow): gráfico de áreas (celeste).

Estados de humedad del suelo: gráfico de líneas (naranja).

3- Diferencia Acumulada.

Diferencia acumulada entre la simulación y el caudal observado: gráfico de líneas (marrón).

4- Hidrograma de caudales simulados y observados.

Caudales simulados: gráfico de líneas (rojo).

Caudales observados: gráfico de líneas (verde)

• Estación Salida Lago Aluminé.

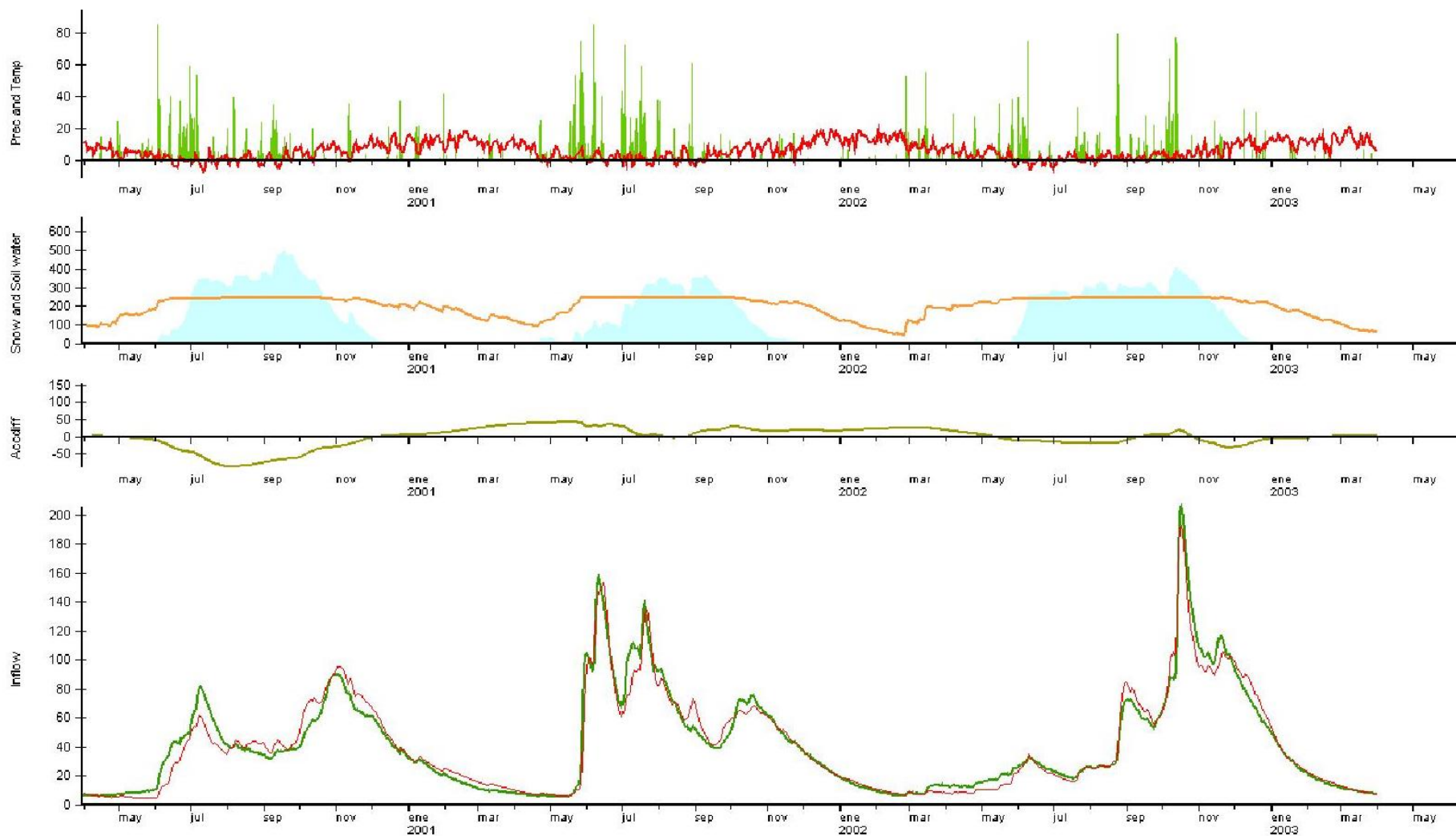


Fig 9-27: Salida Lago Aluminé - 2000-2003.

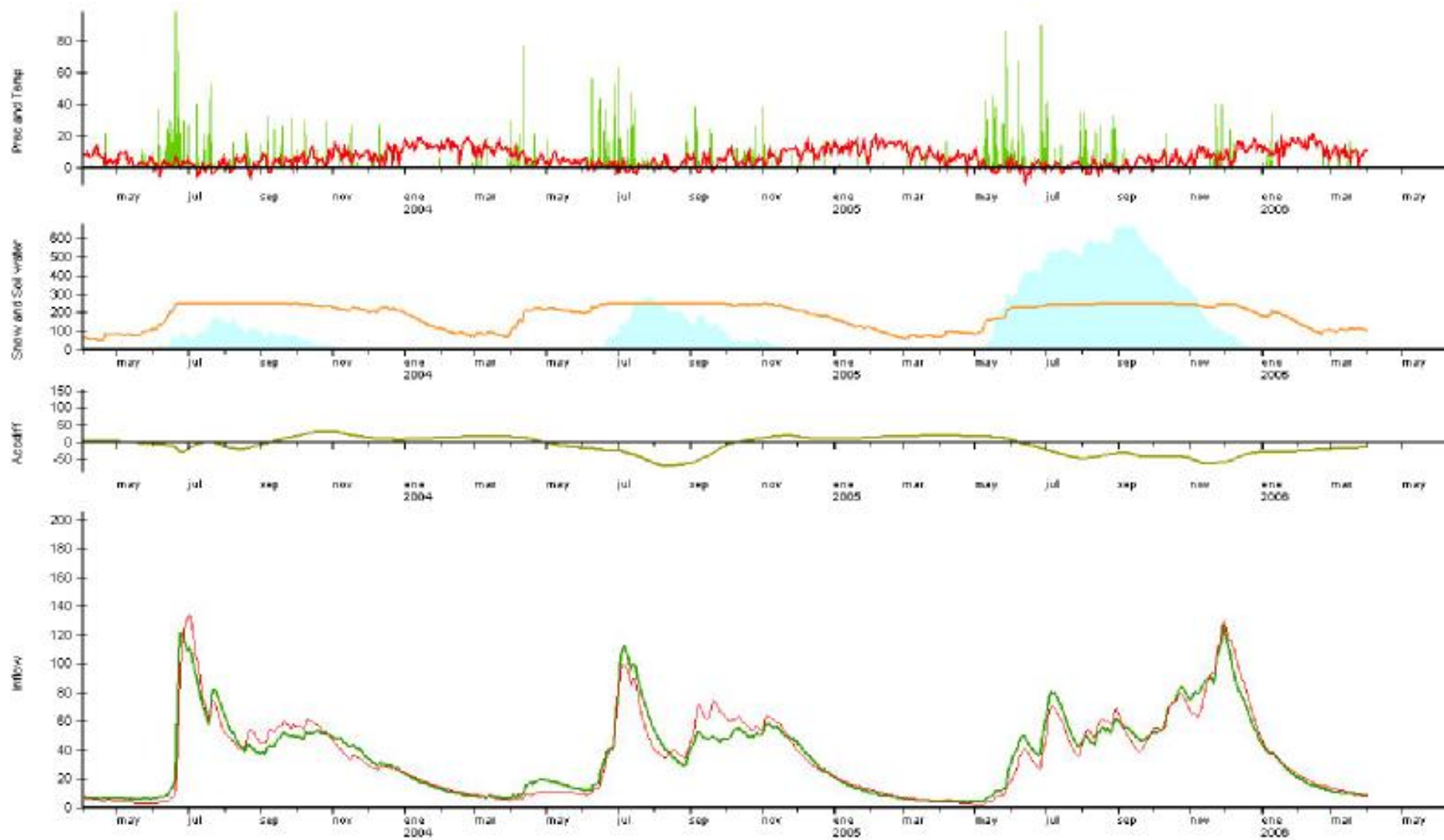


Fig 9-28: Salida Lago Aluminé - 2003-2006.

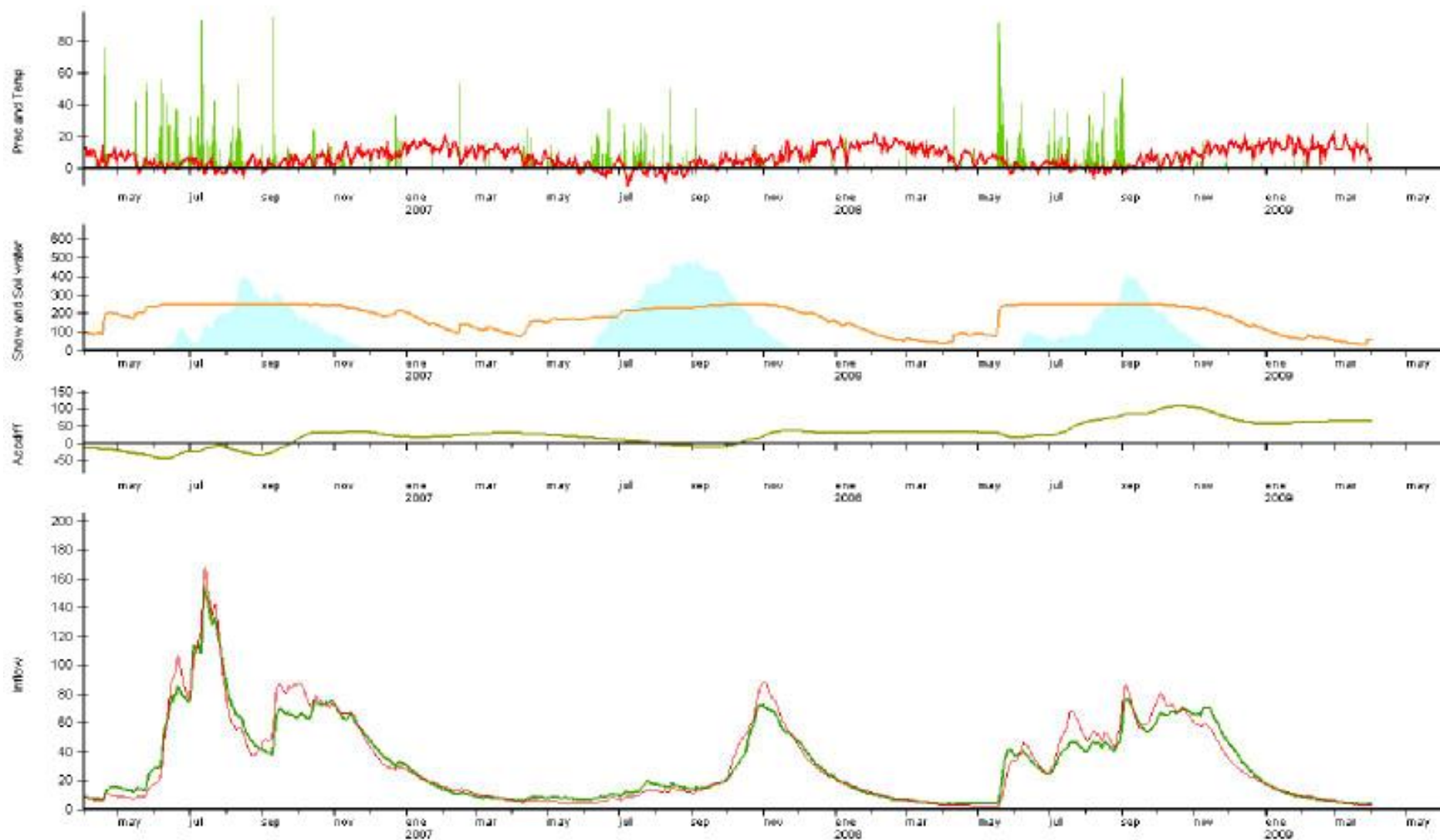


Fig 9-29: Salida Lago Aluminé - 2006-2009.

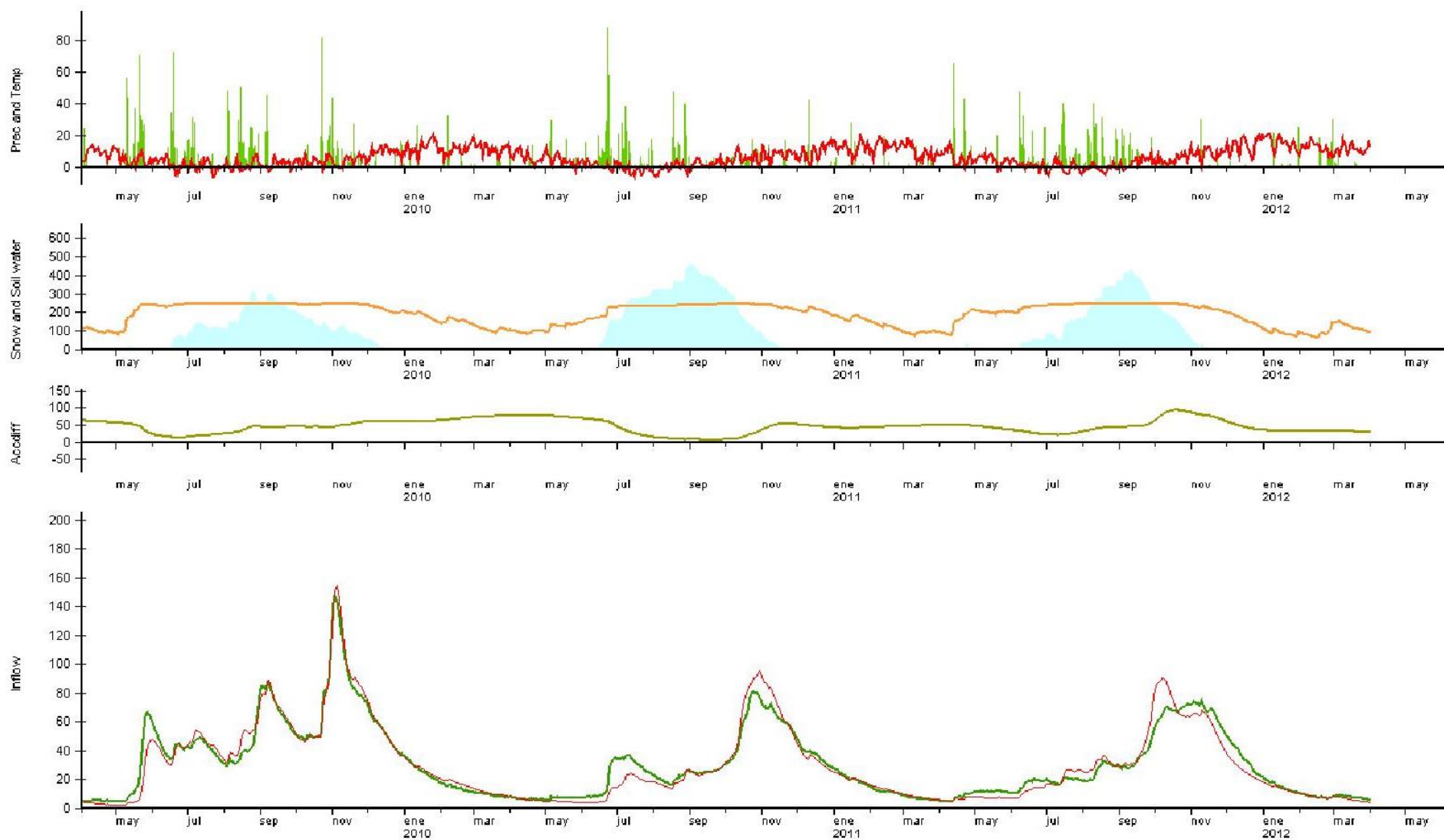


Fig 9-30: Salida Lago Aluminé - 2009-2012.

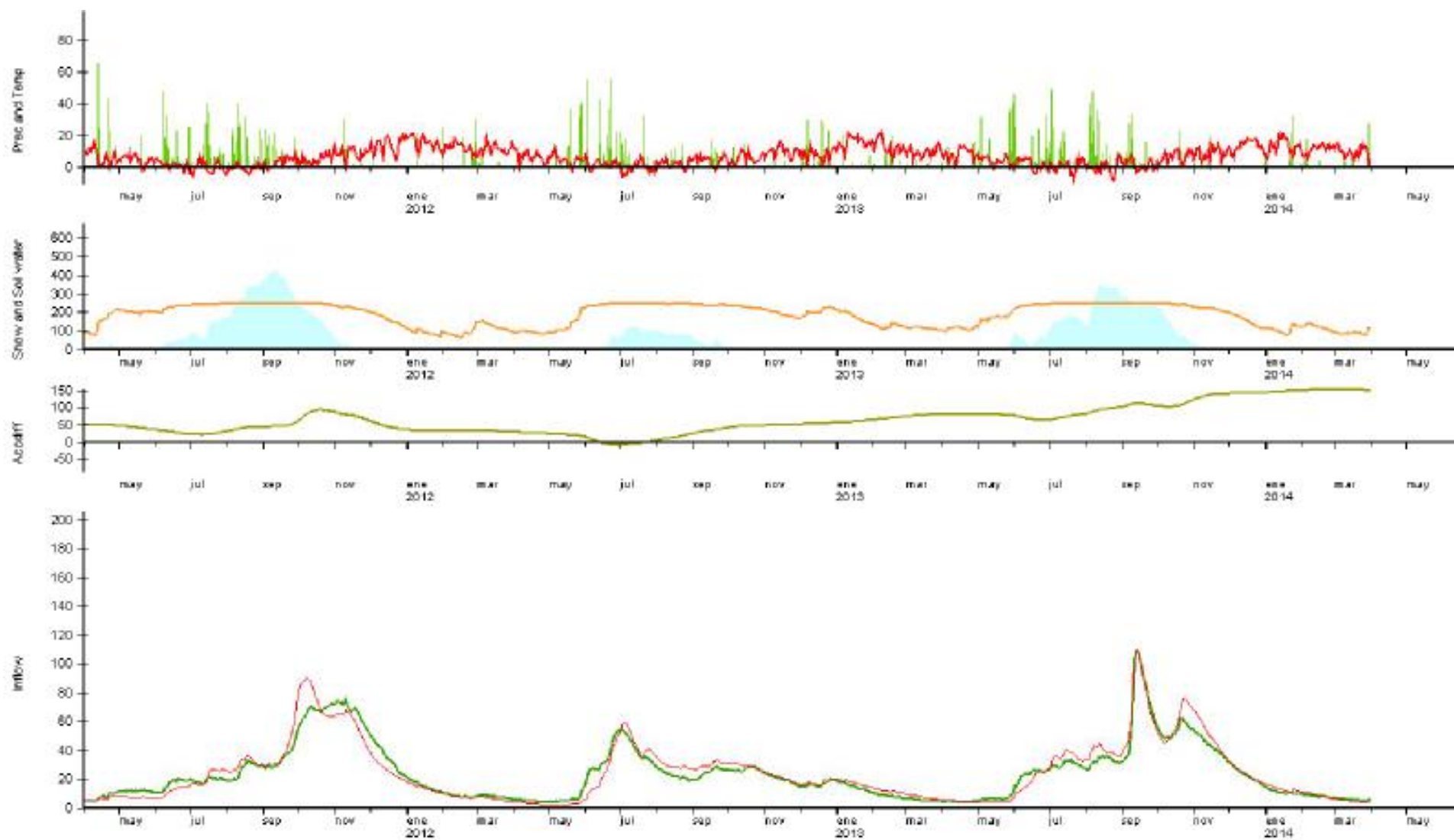


Fig 9-31: Salida Lago Aluminé - 2012-2015.

- Estación Rahue.

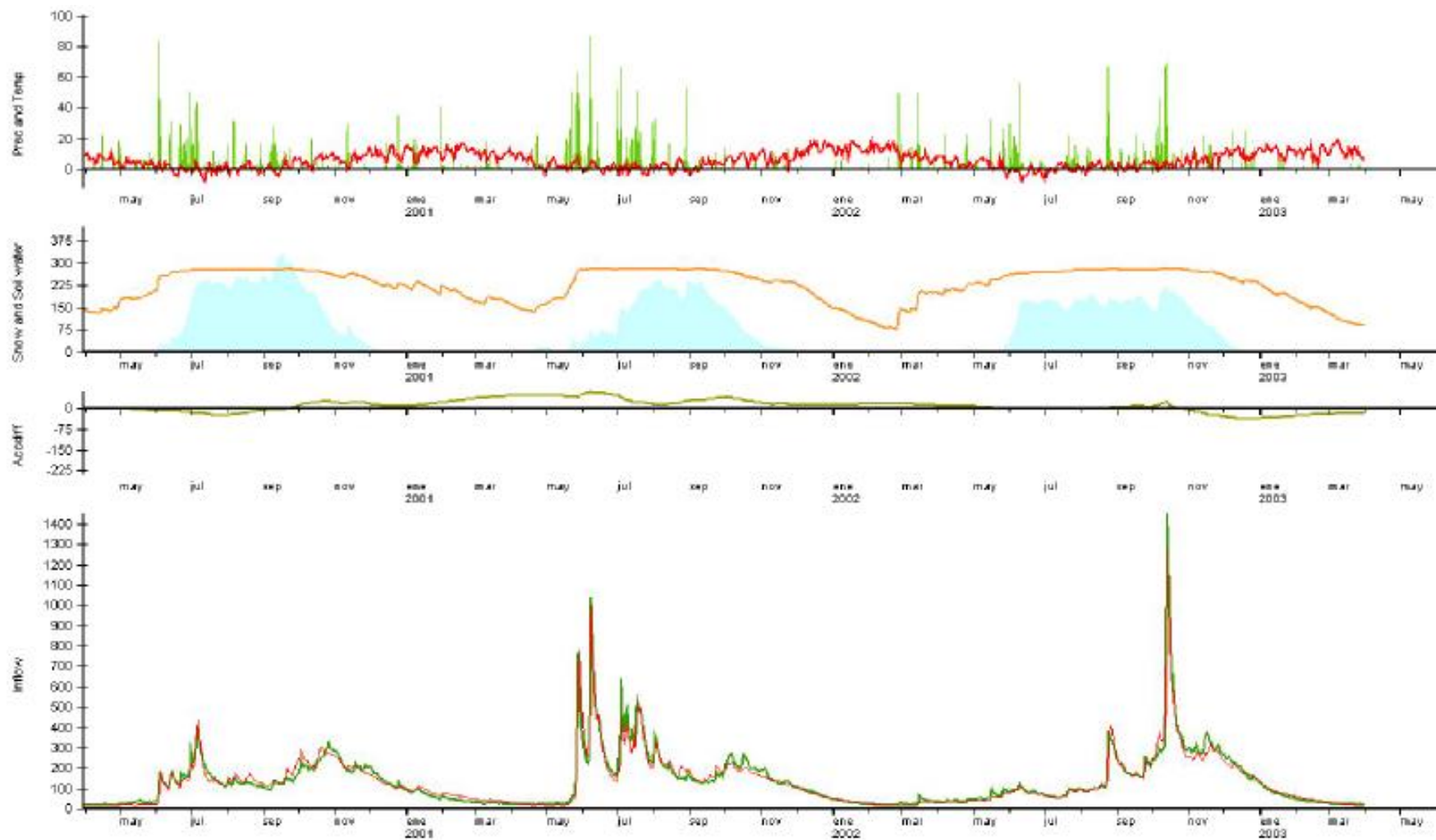


Fig 9-32: Rahue - 2000-2003.

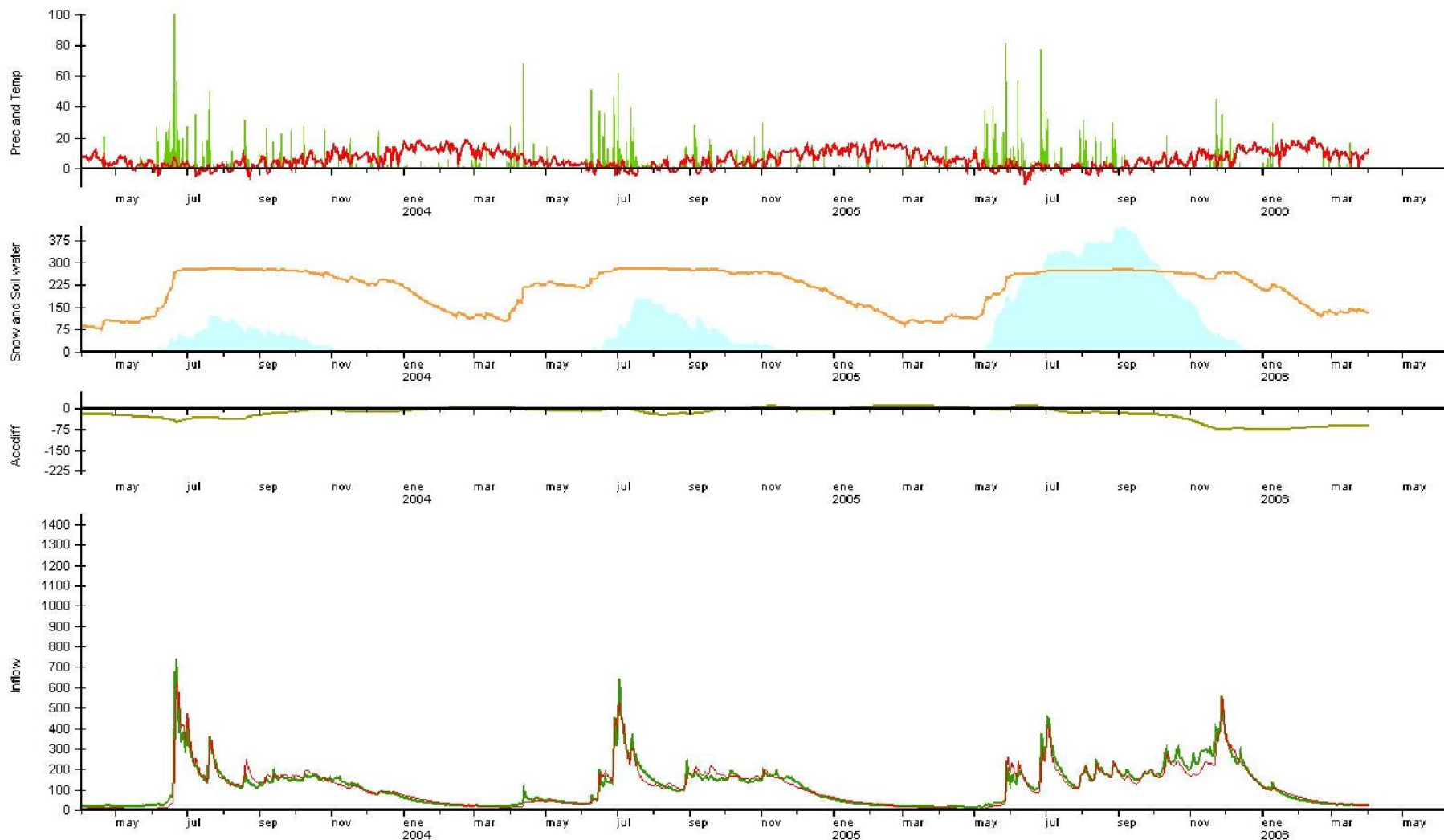


Fig 9-33: Rahue - 2003-2006.

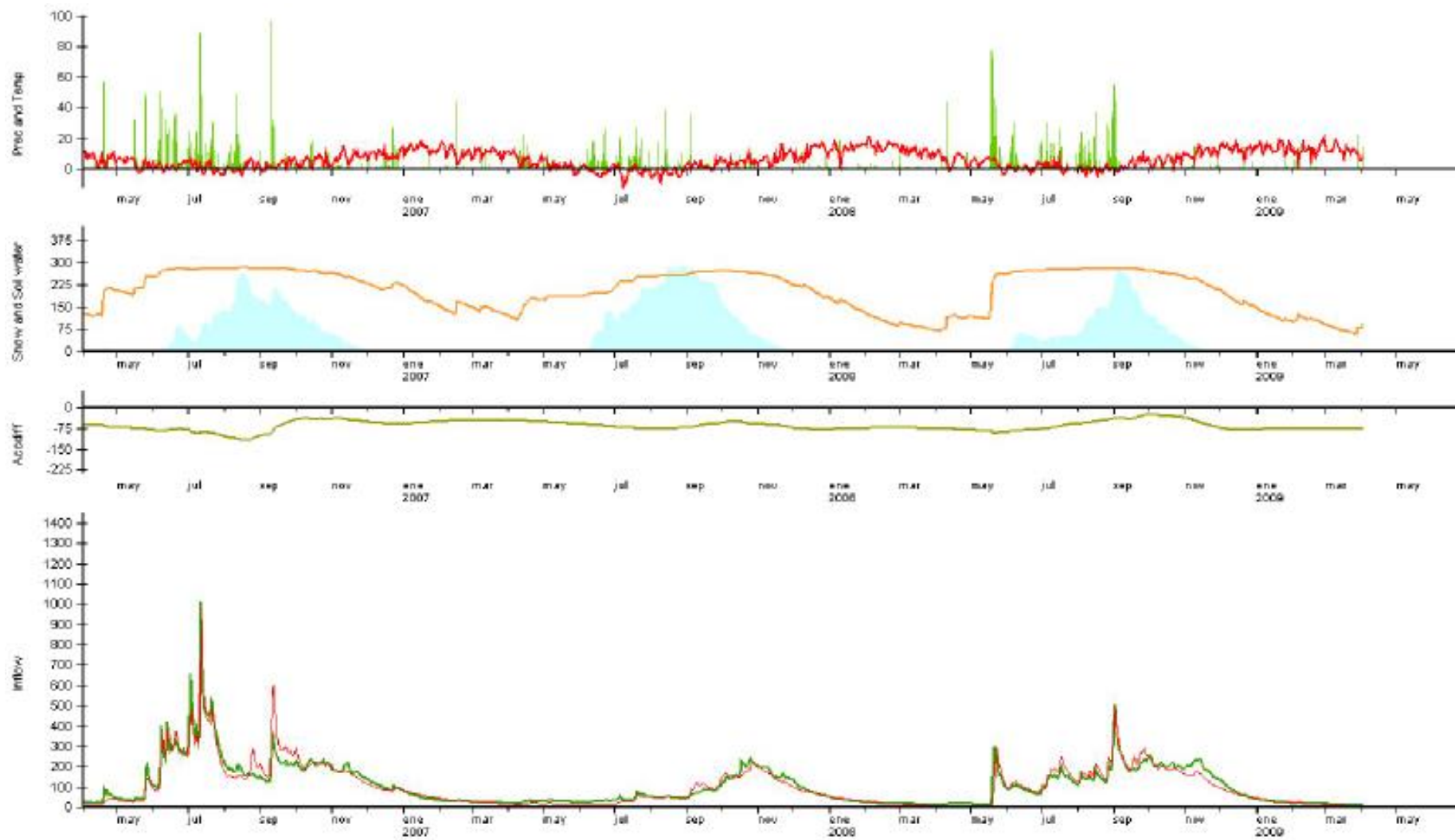


Fig 9-34: Rahue - 2006-2009.

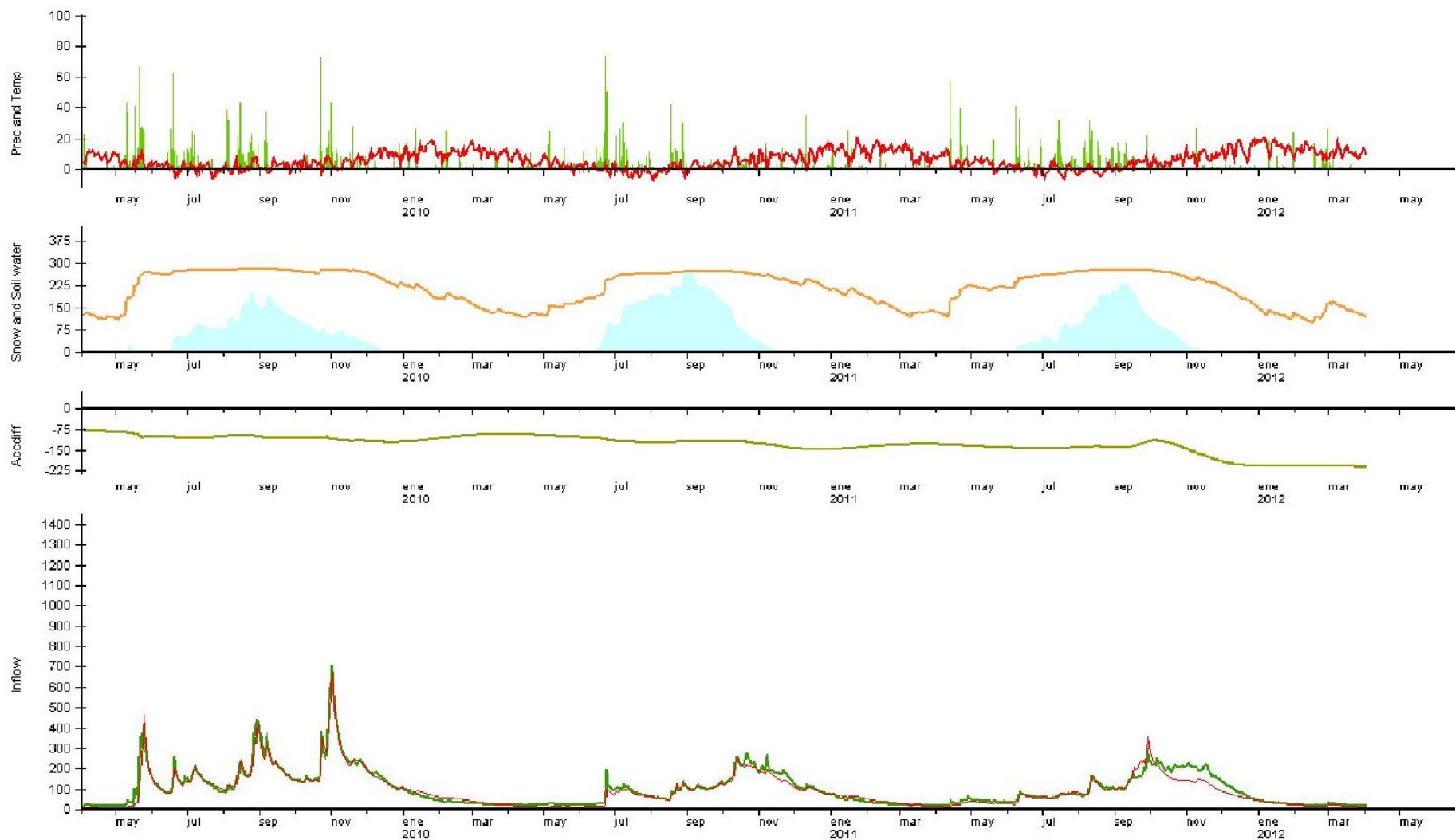


Fig 9-35: Rahue - 2009-2012.

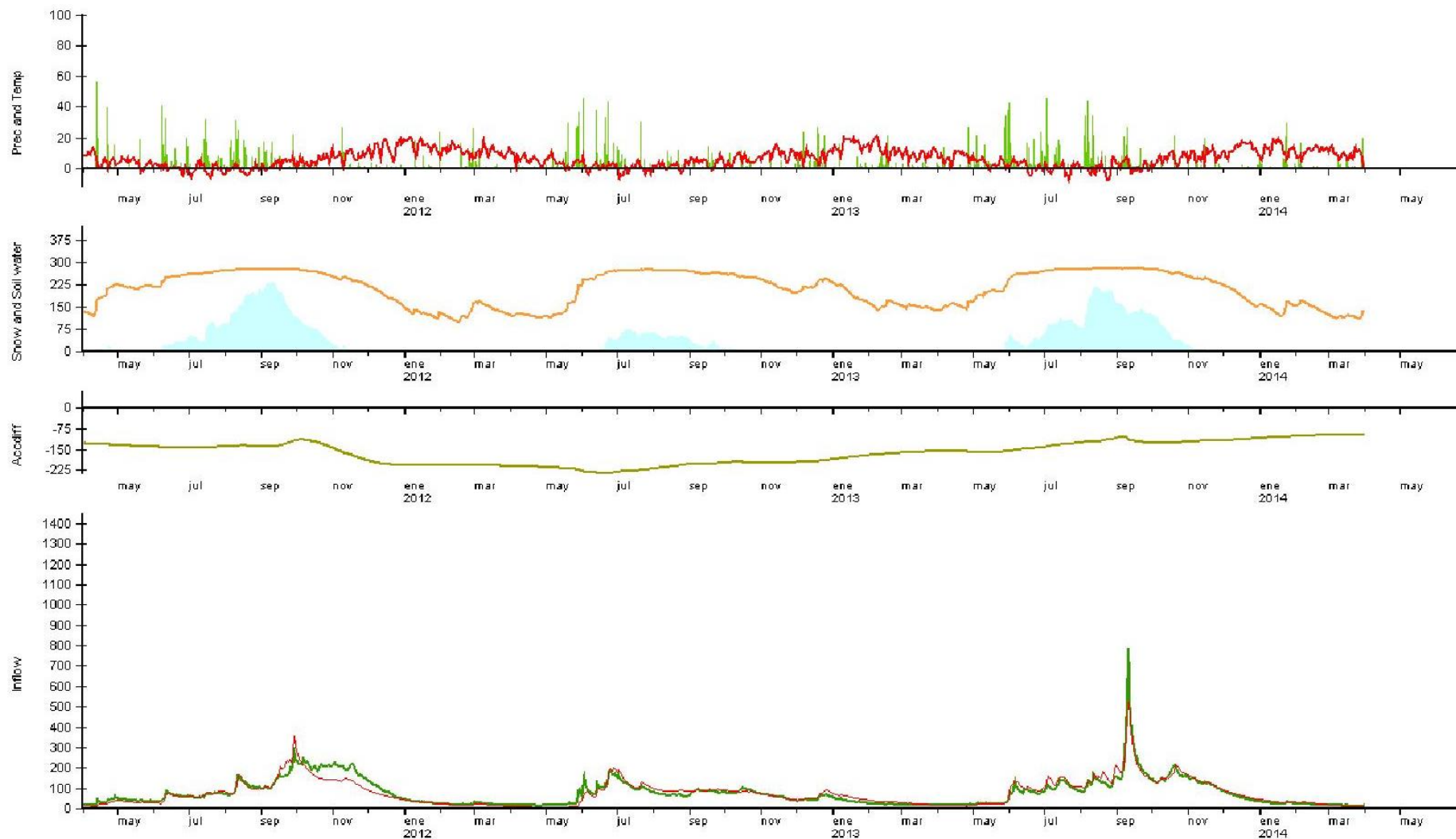


Fig 9-36: Rahue - 2012-2015.

- Estación Santa Rosa.

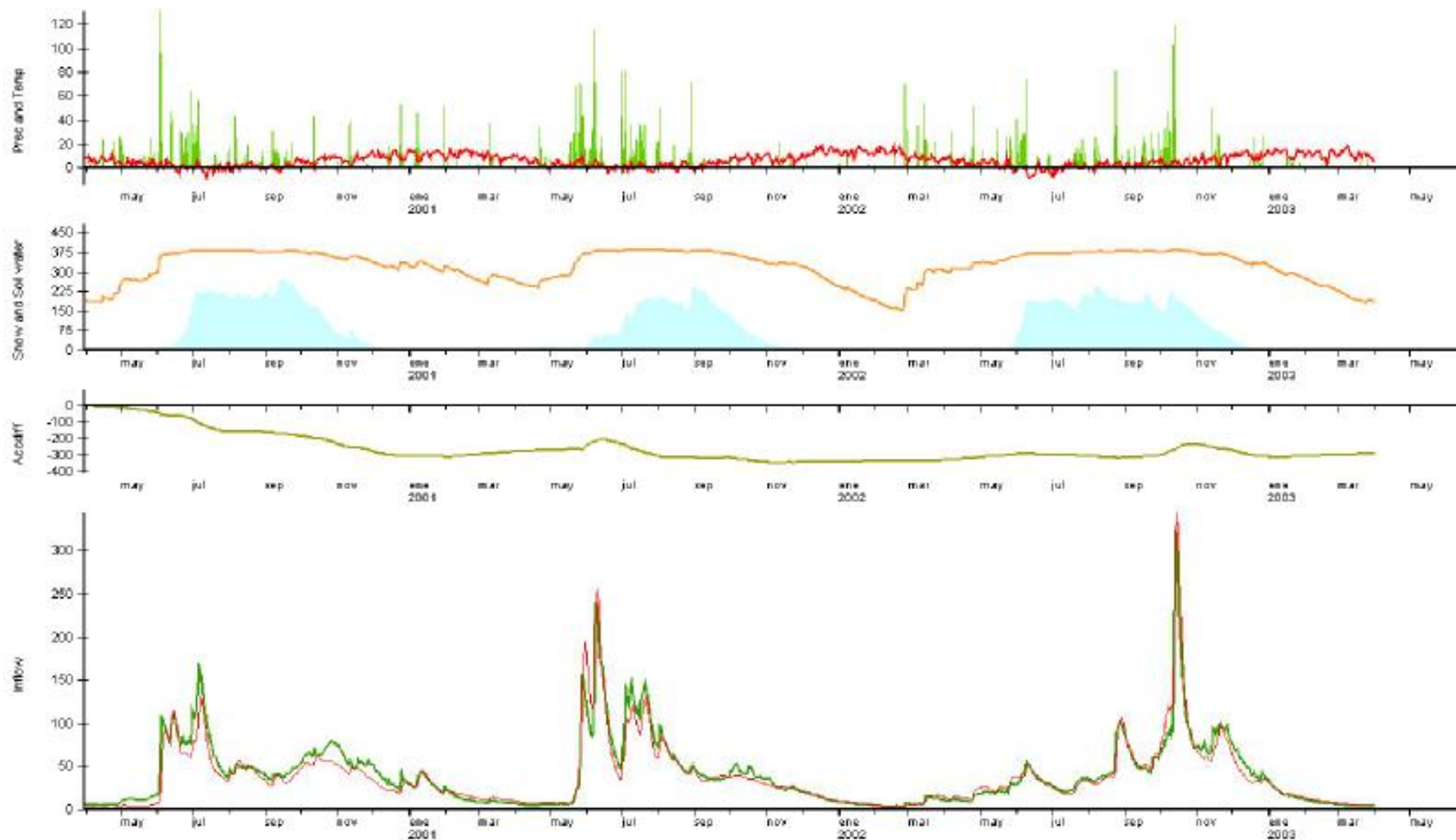


Fig 9-37: Santa Rosa - 2000-2003.

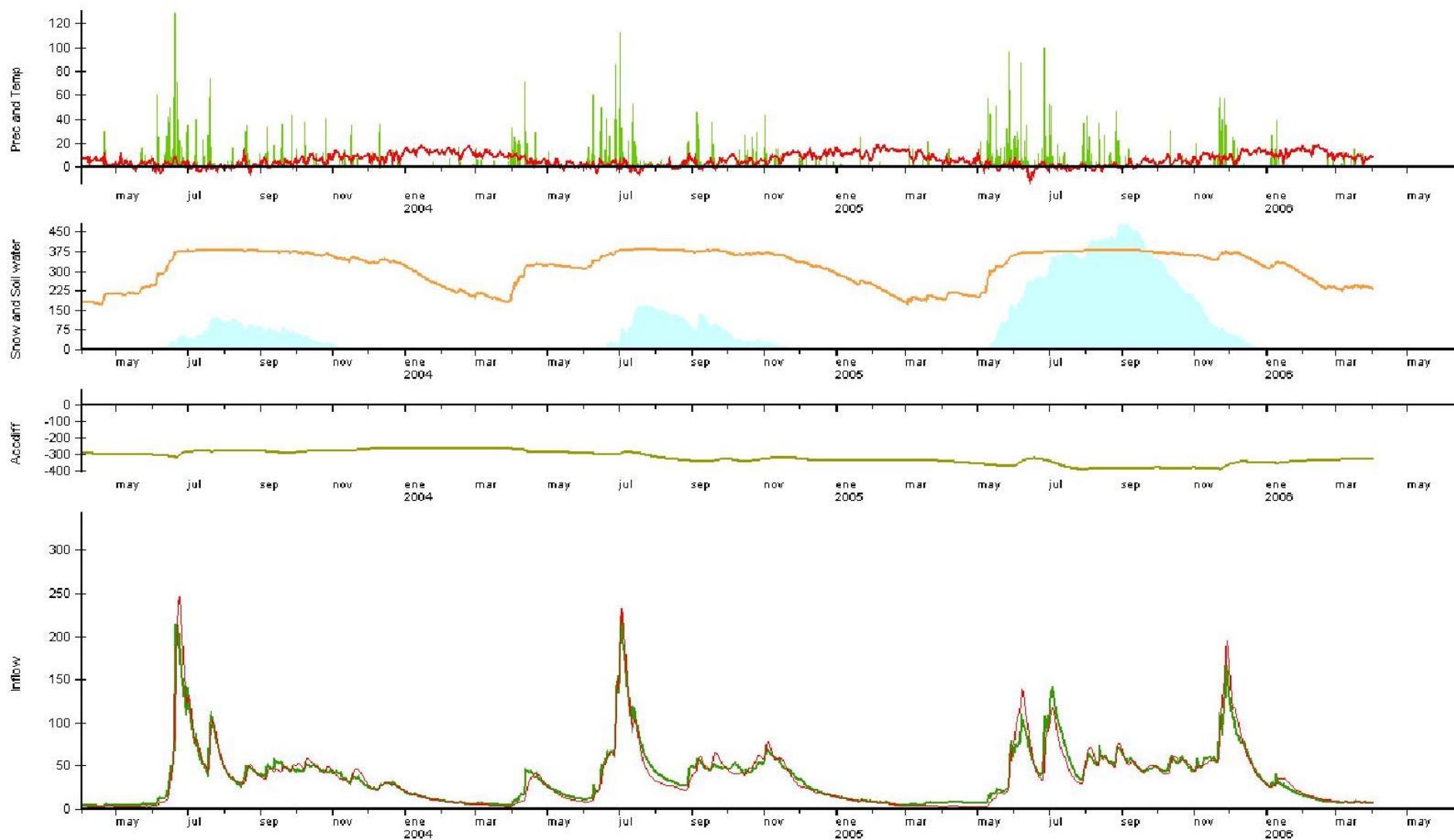


Fig 9-38: Santa Rosa - 2003-2006.

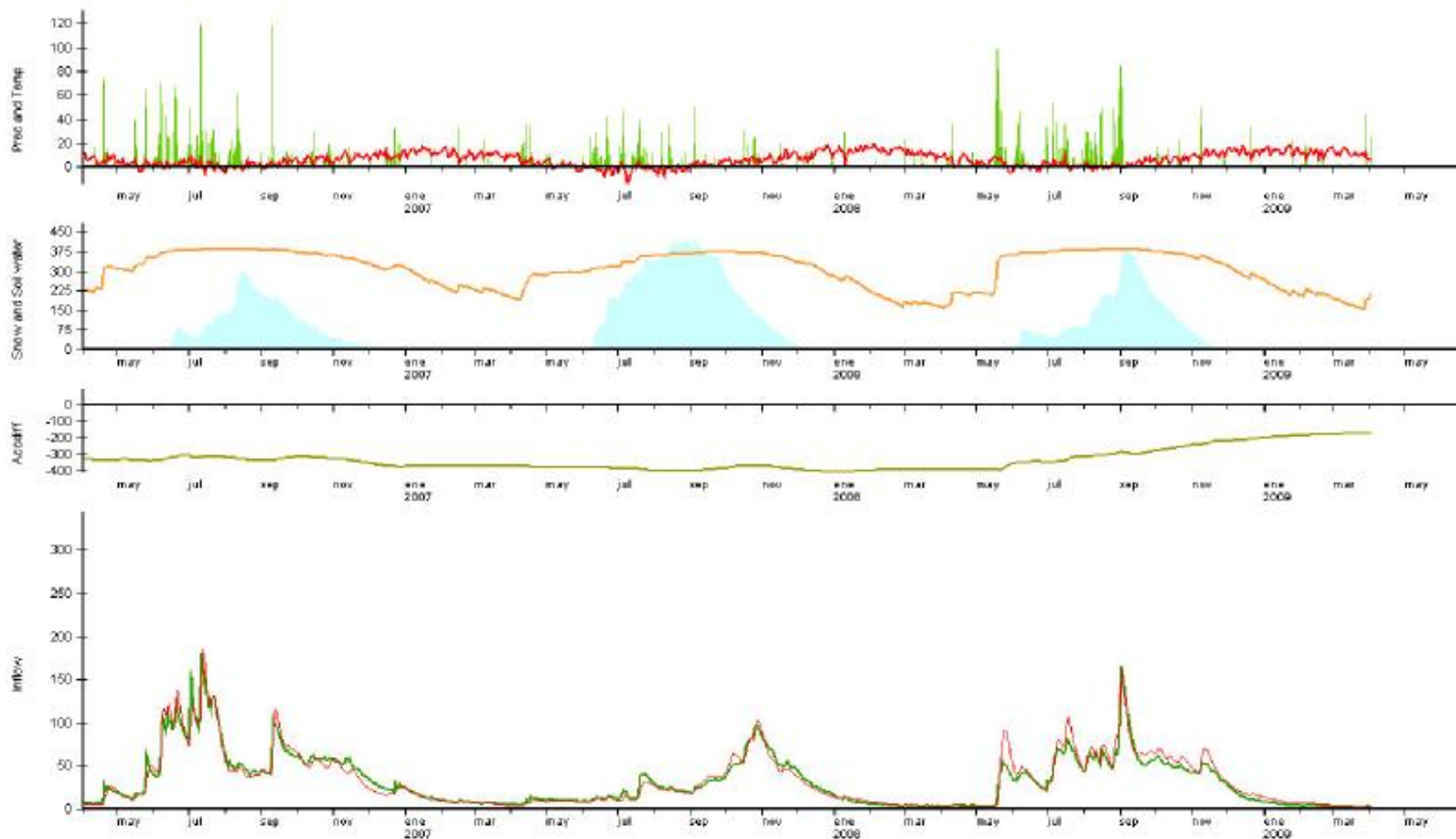


Fig 9-39: Santa Rosa - 2006-2009.

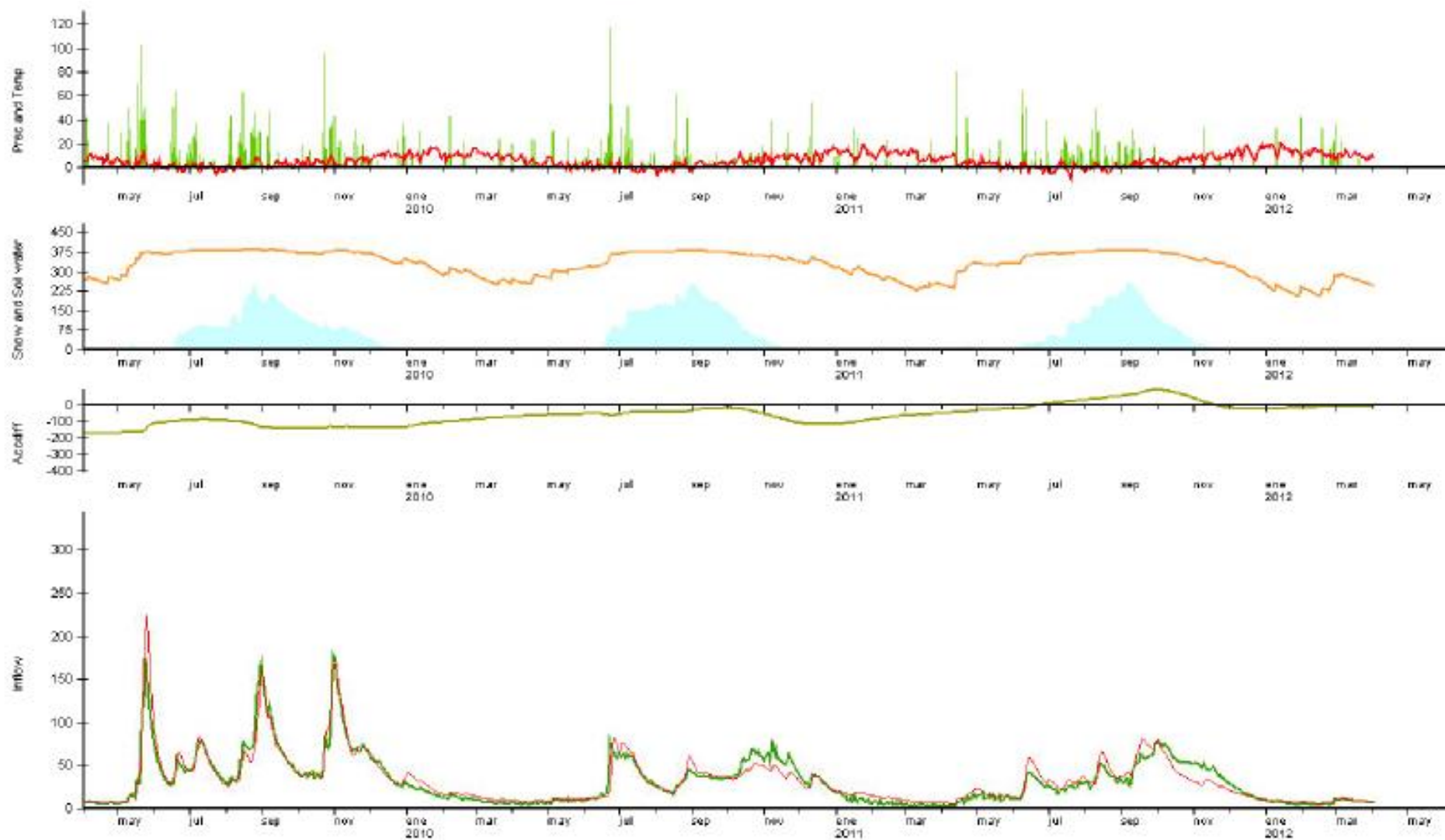


Fig 9-40: Santa Rosa - 2009-2012.

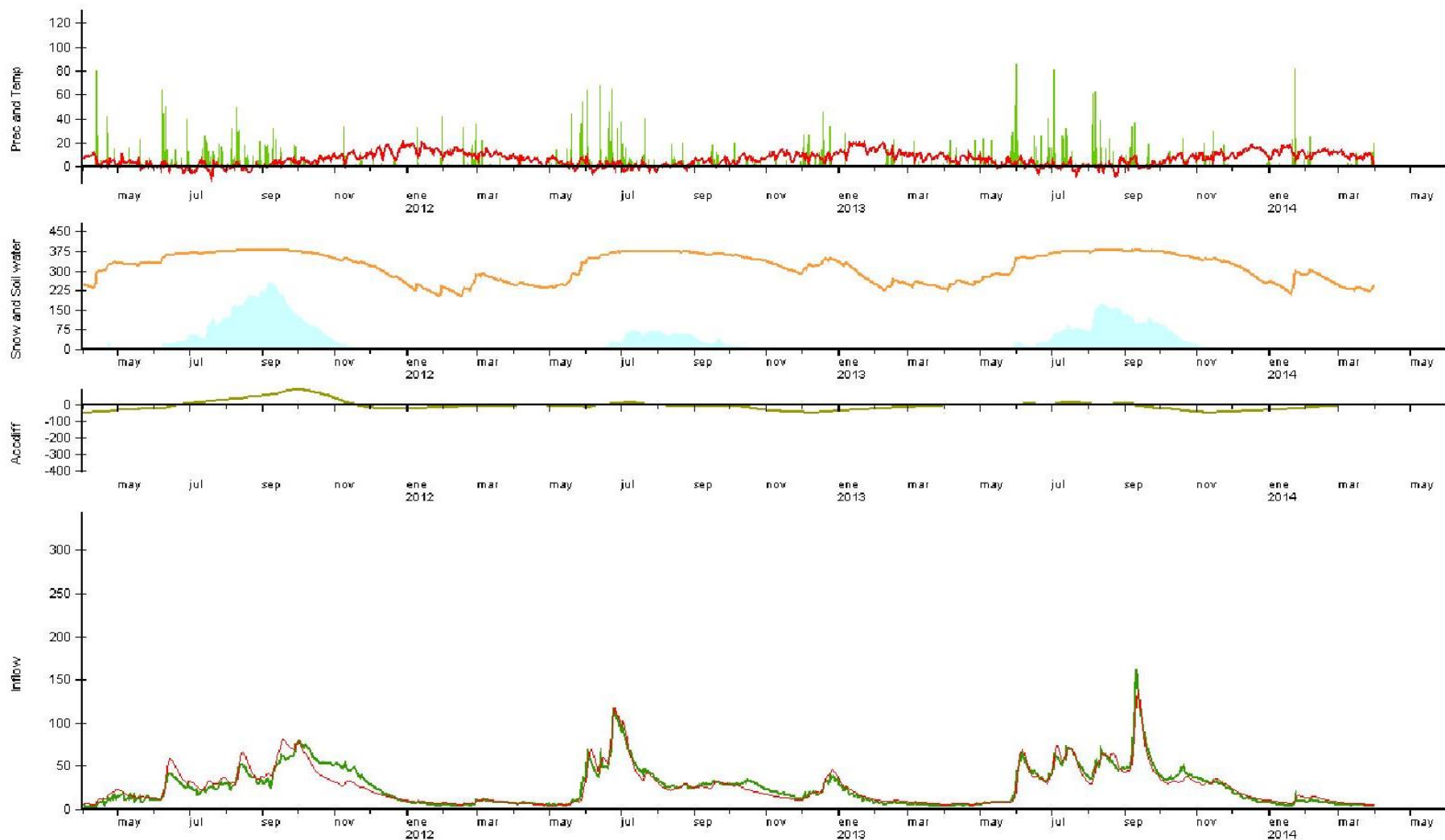


Fig 9-41: Santa Rosa - 2012-2015.

- Estación Puente Malleo.

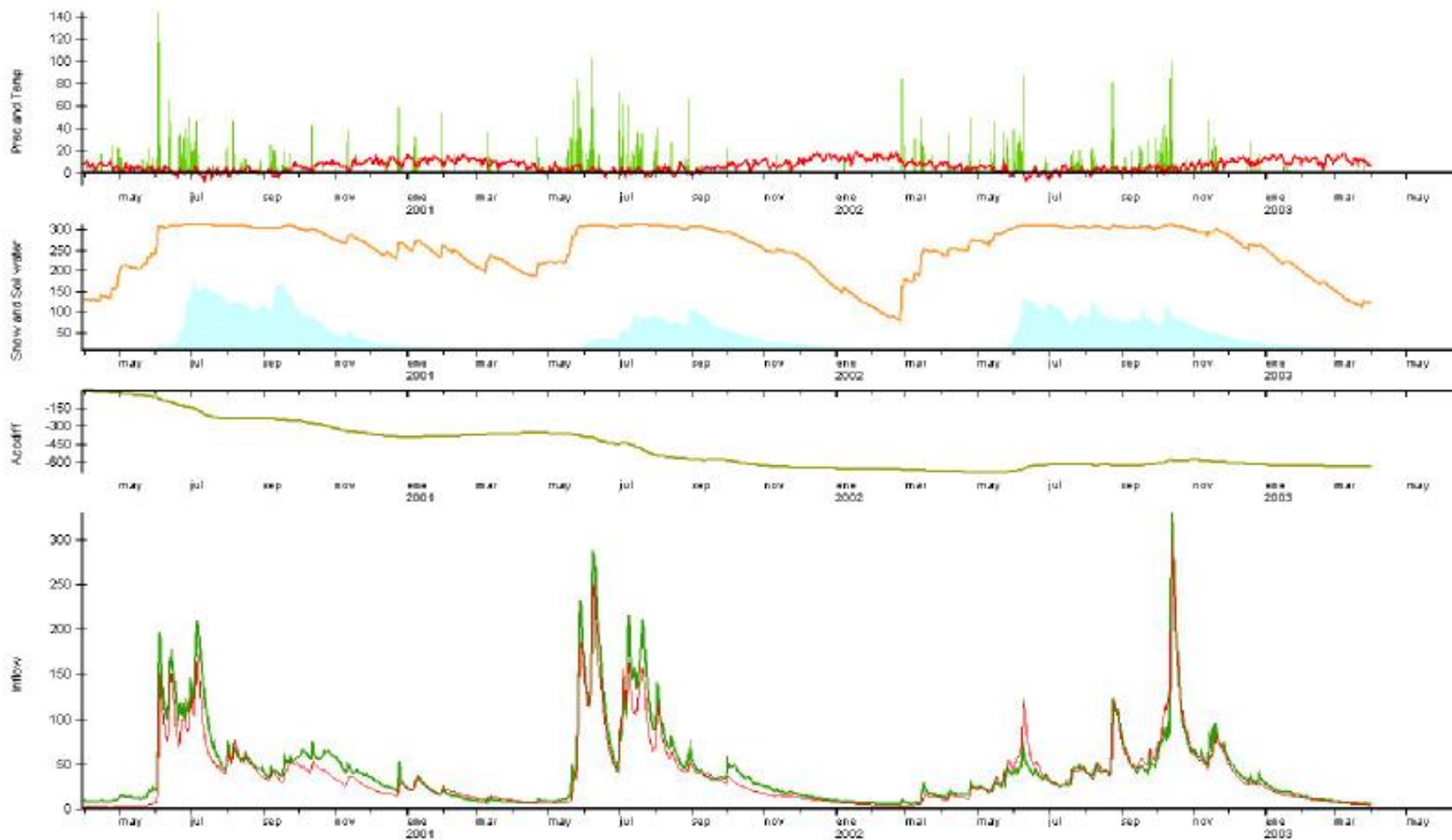


Fig 9-42: Puente Malleo - 2000-2003.

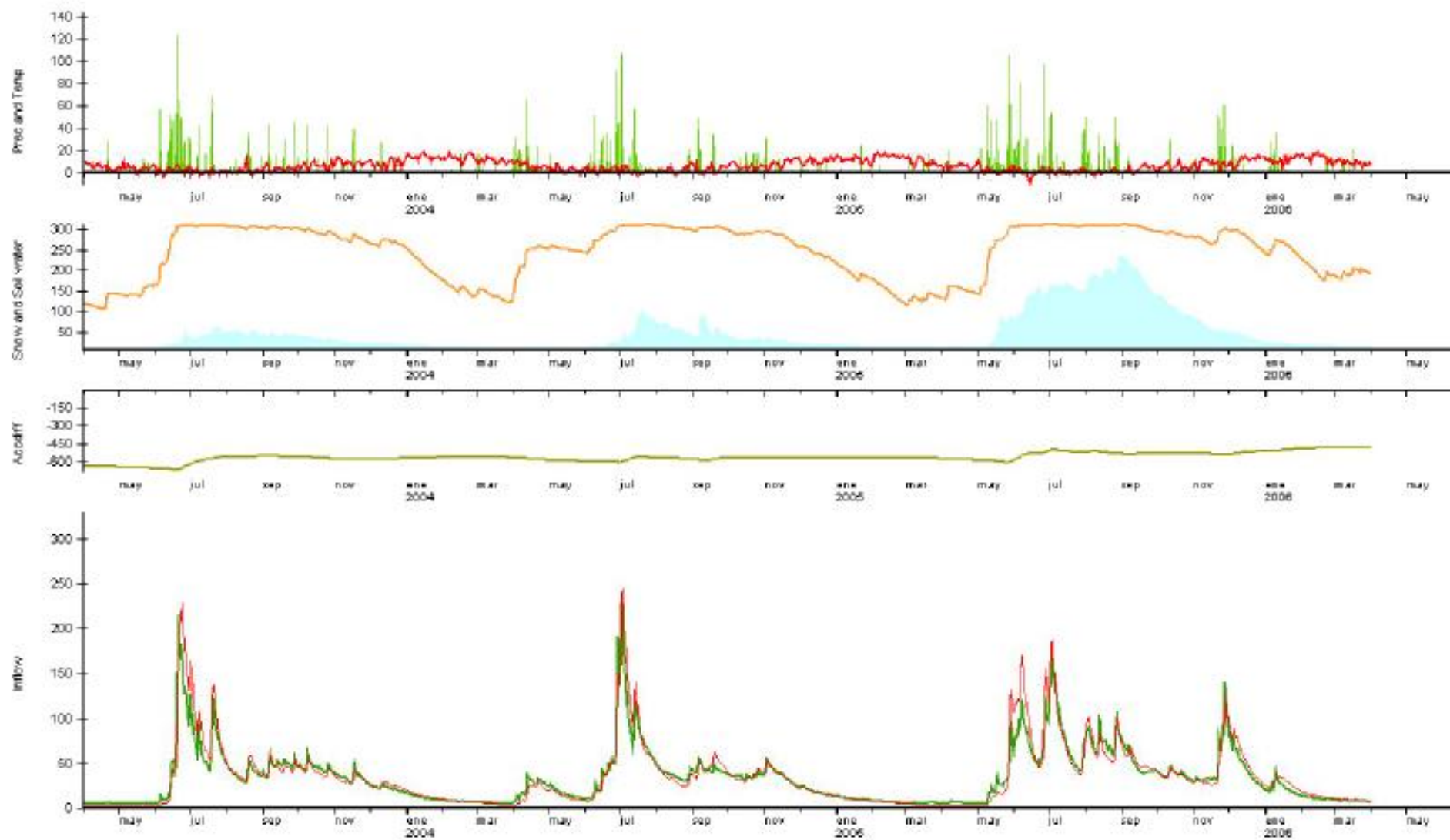


Fig 9-43: Puesto Malleo - 2003-2006.

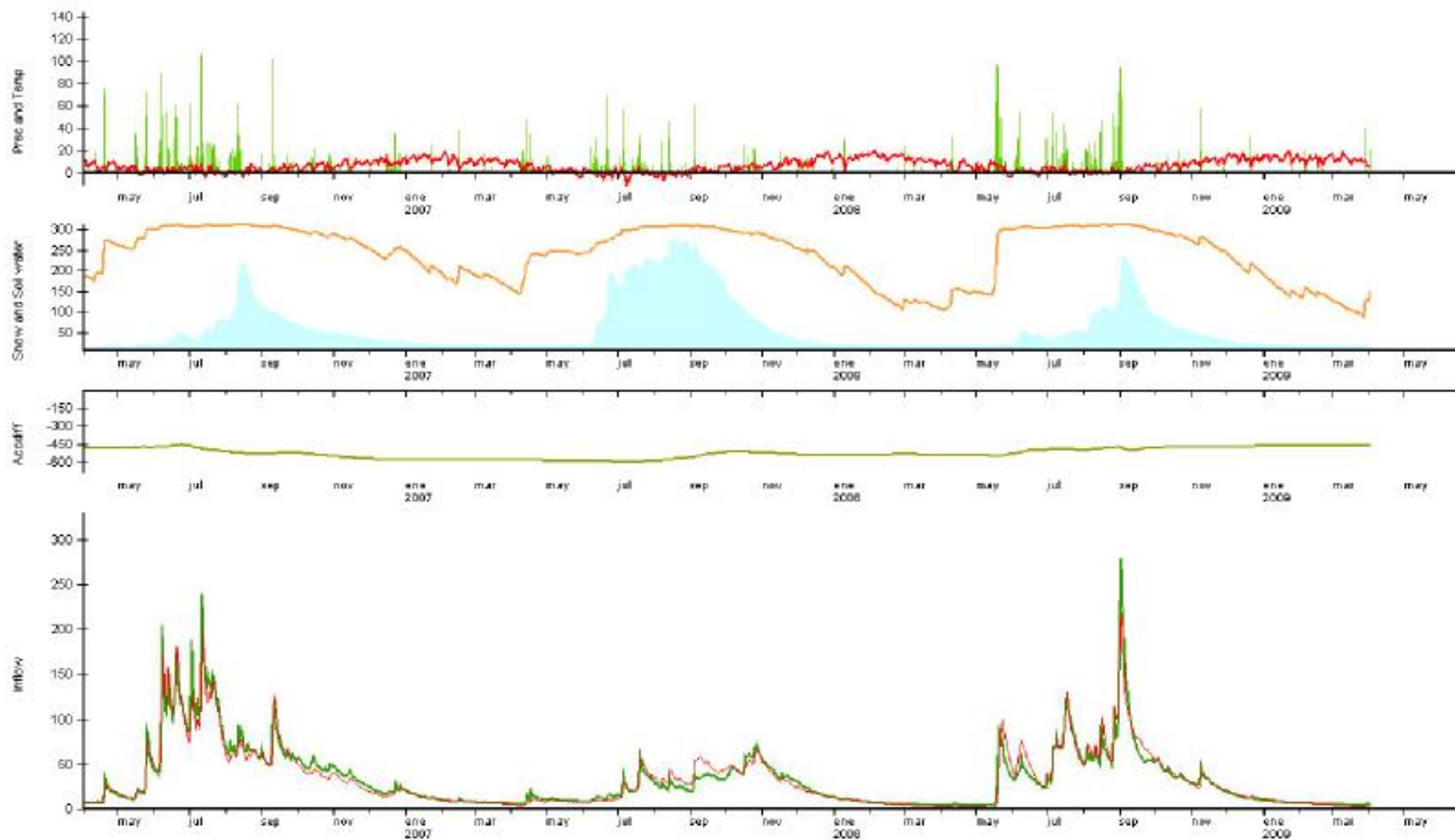


Fig 9-44: Puente Malleo - 2006-2009.

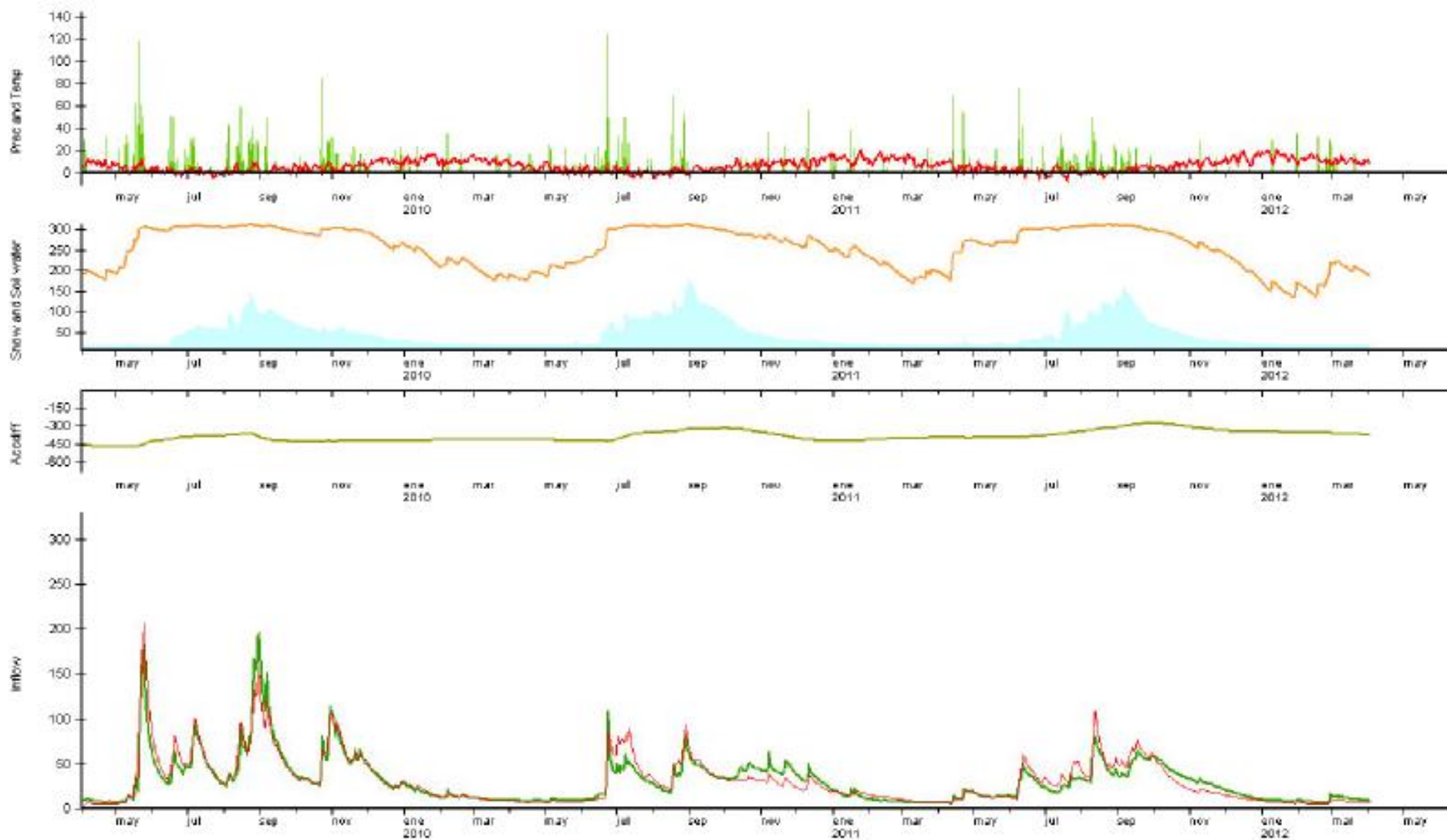


Fig 9-45: Puesto Malleo - 2009-2012.

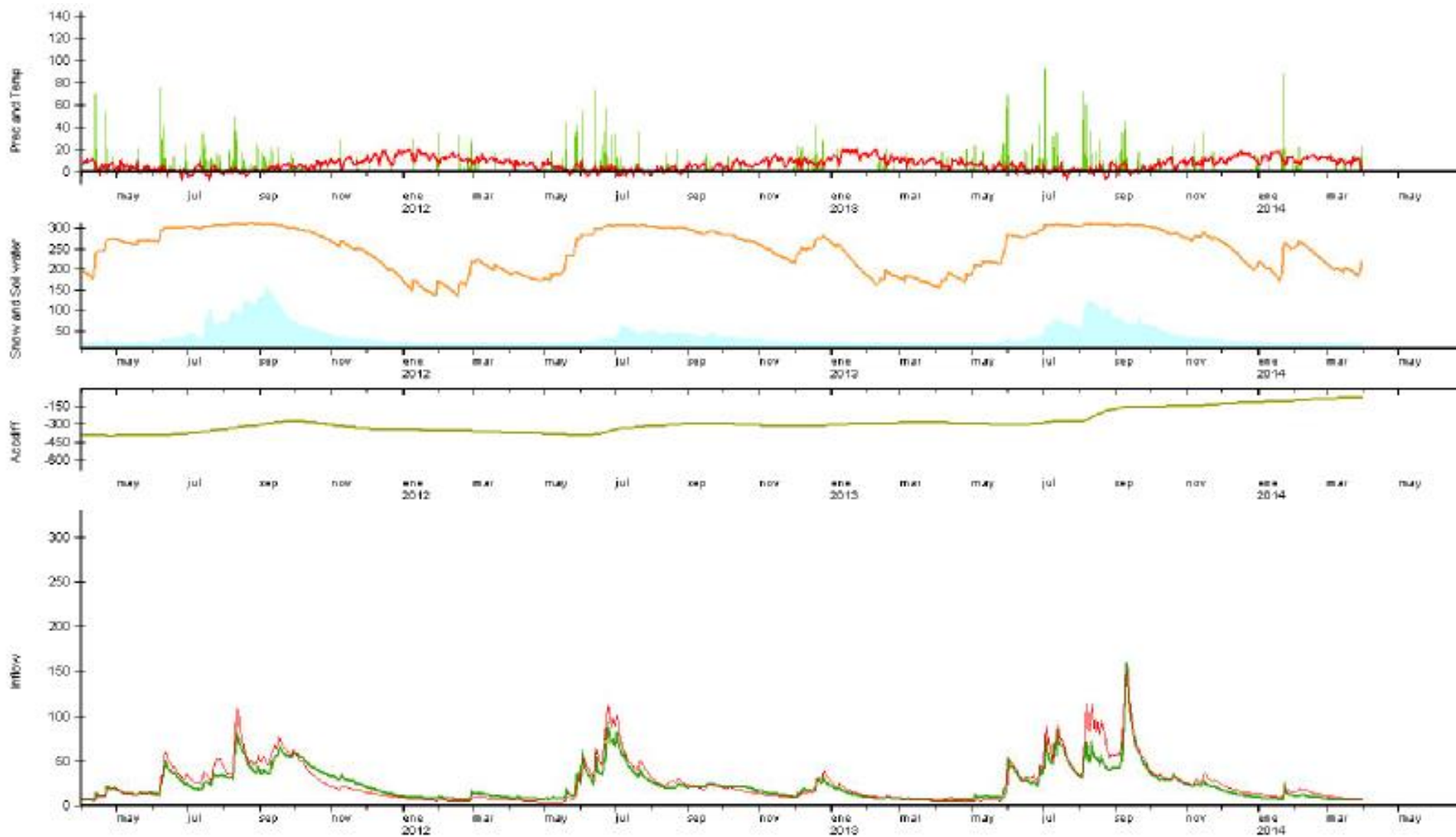


Fig 9-46: Puente Malleo - 2012-2015.

• **Estación Huechahue.**

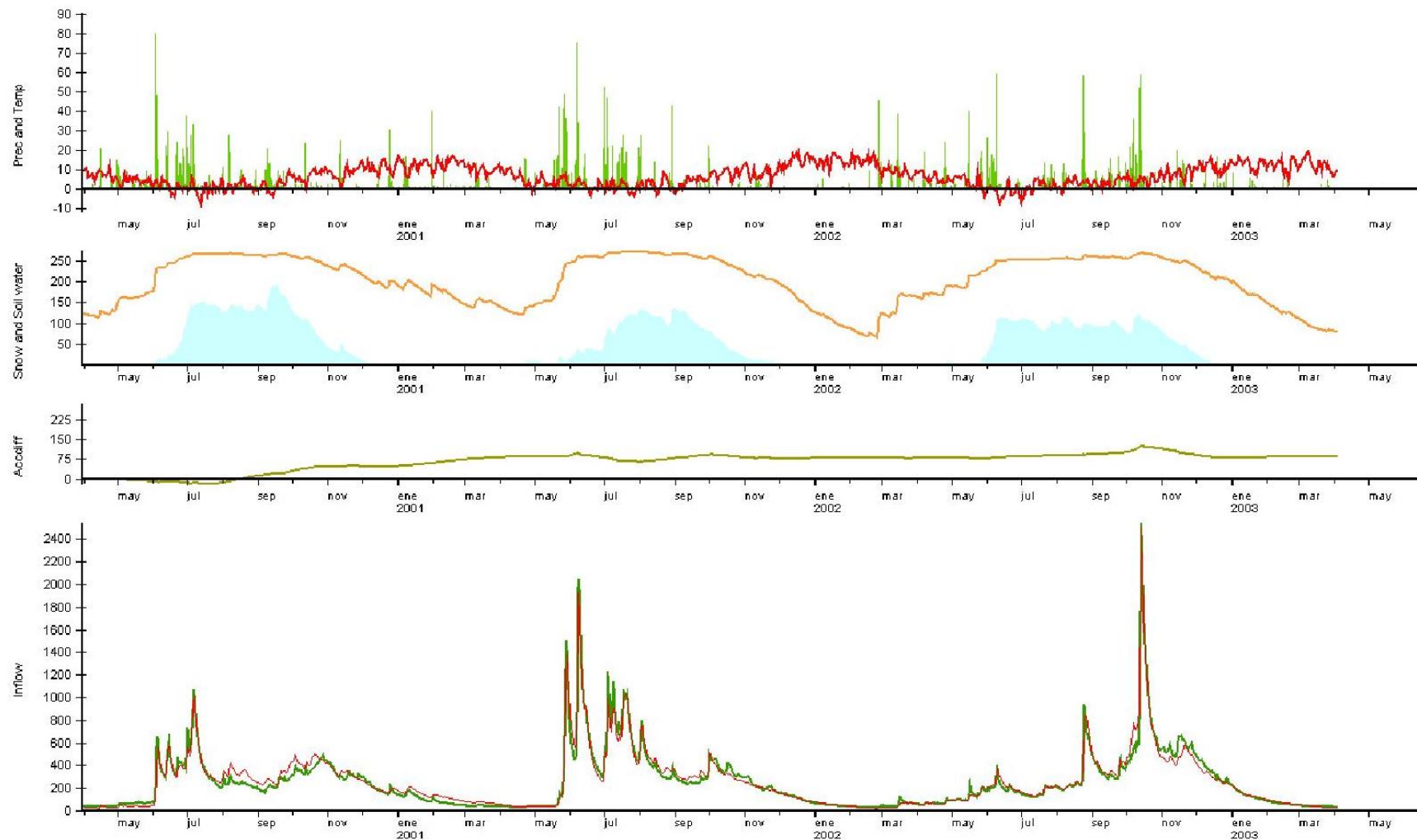


Fig 9-47: Huechahue - 2000-2003.

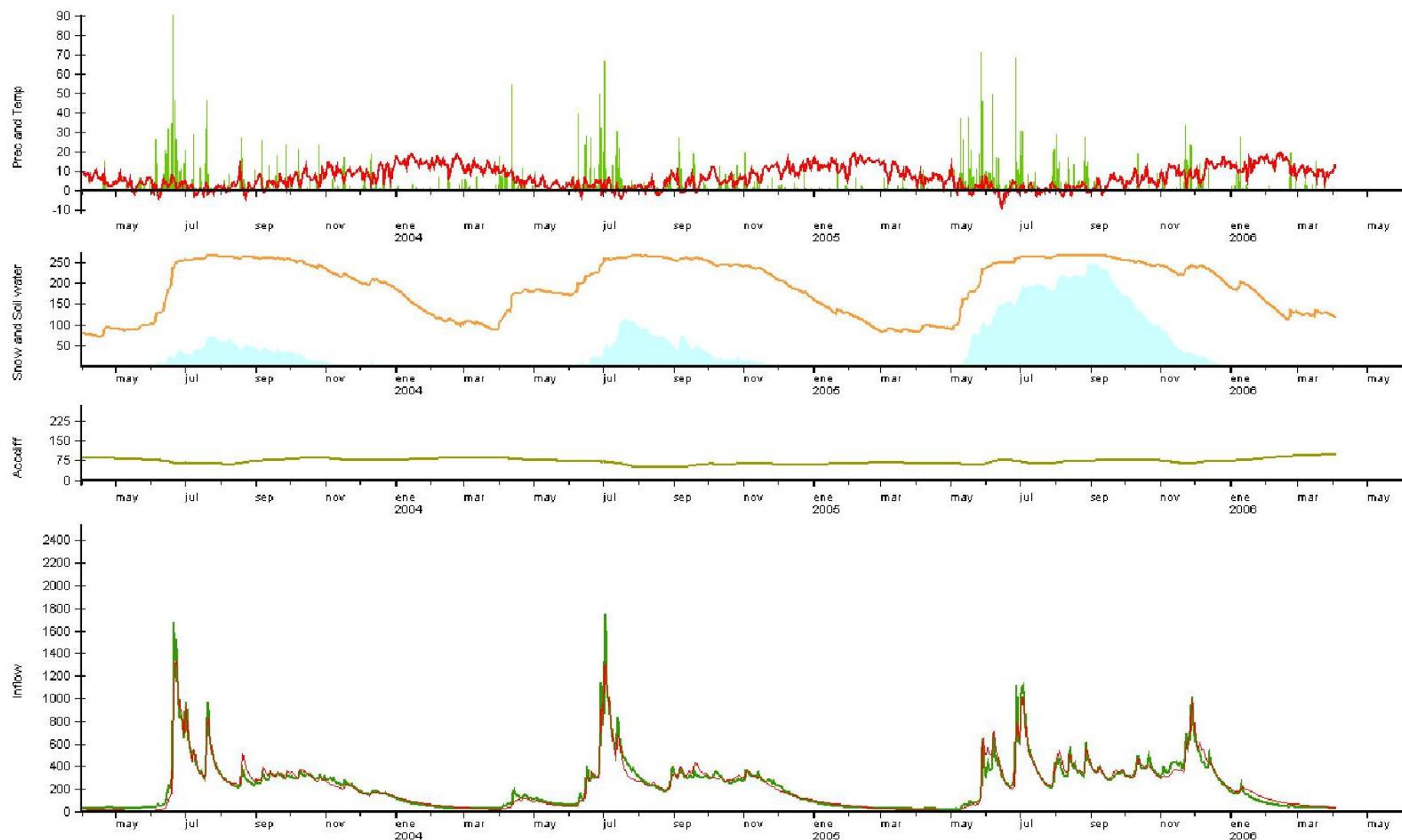


Fig 9-48: Huechahue - 2003-2006.

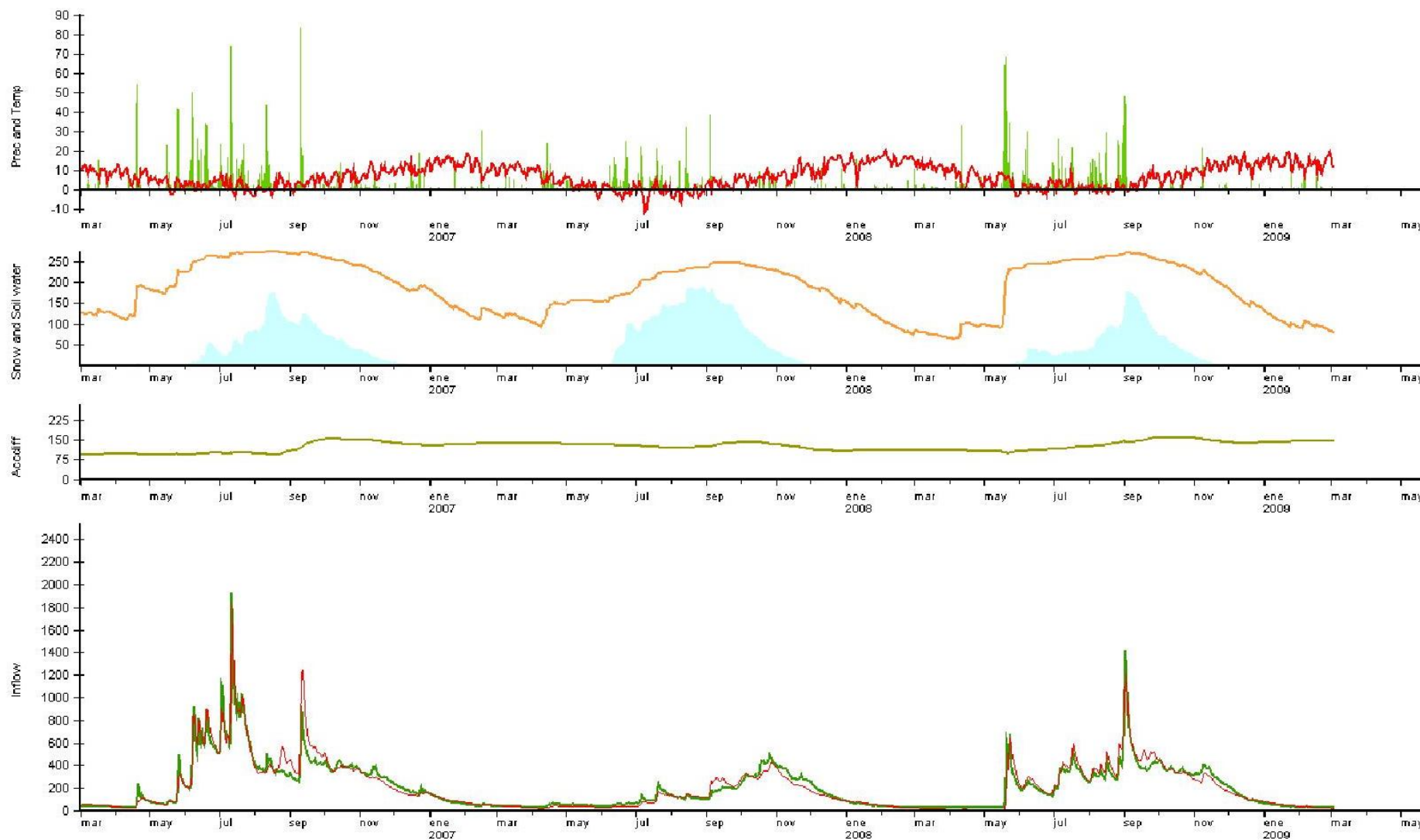


Fig 9-49: Huechahue - 2006-2009.

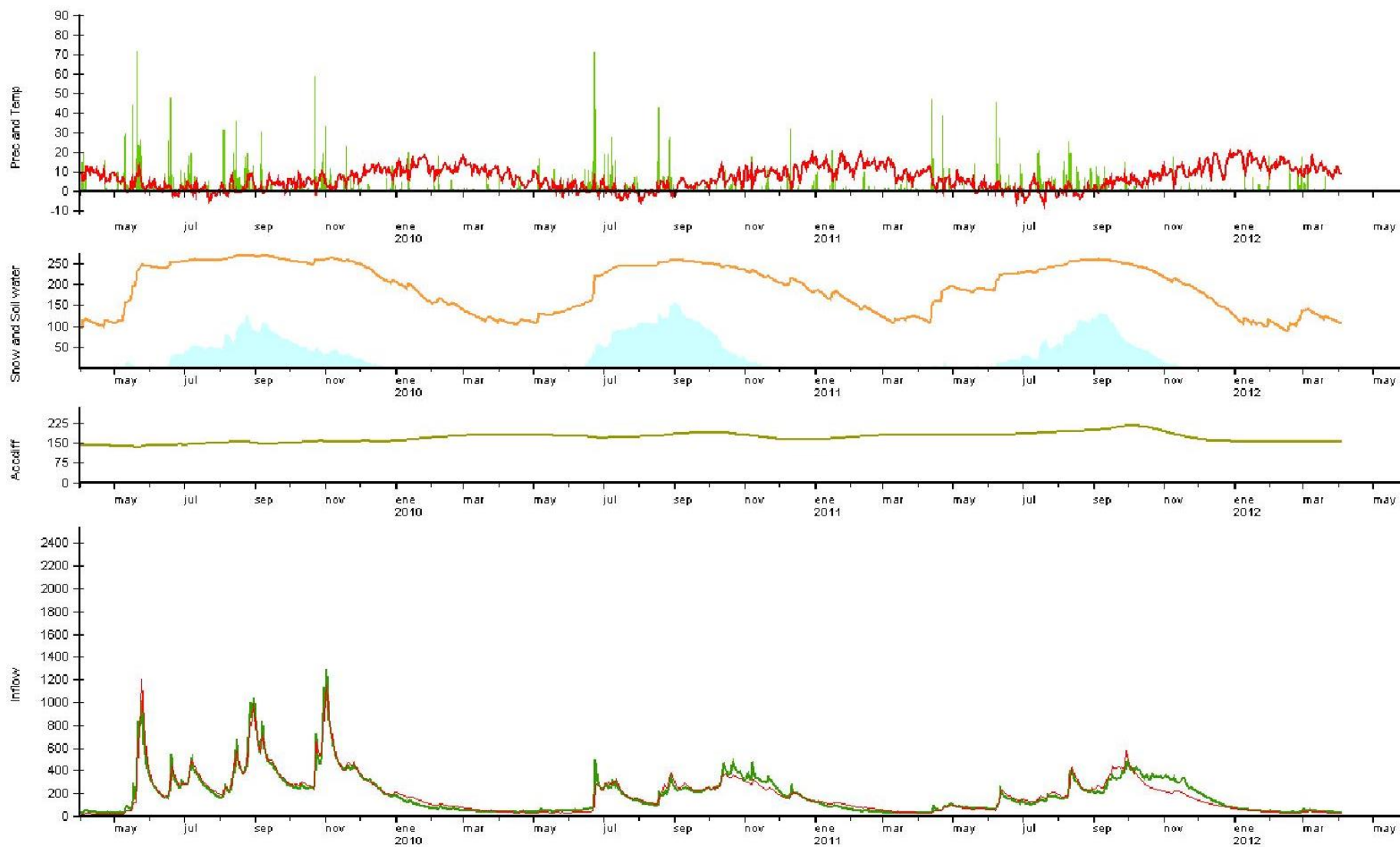


Fig 9-50: Huechahue - 2009-2012.

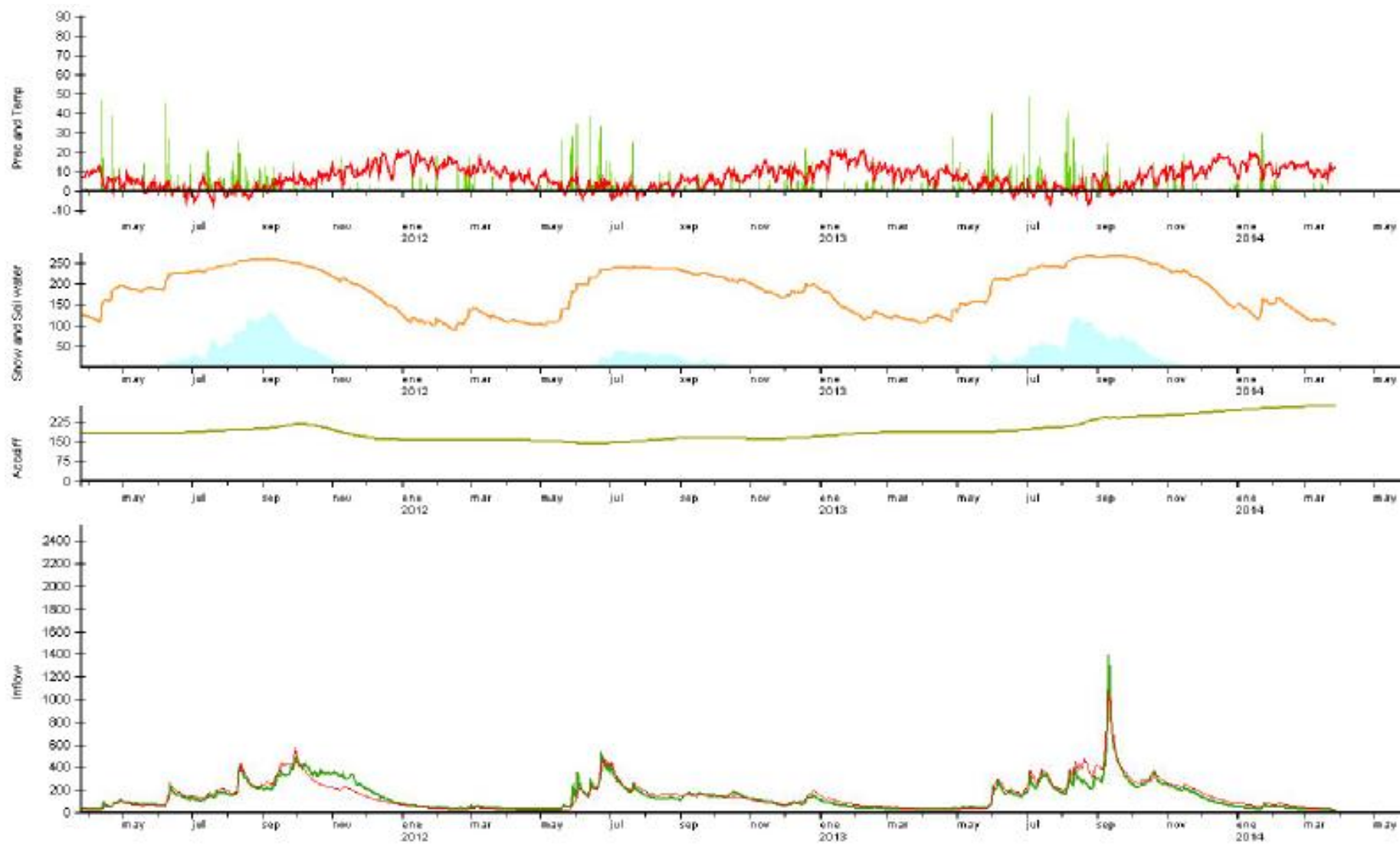


Fig 9-51: Huechahue - 2012-2015.