



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

**LEVANTAMIENTO DE PARÁMETROS
PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE
CUENCAS PLUVIALES NO CONTROLADAS
EN LA IX^a REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda.

S.I.T N° 199

SANTIAGO, DICIEMBRE 2009

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Industrial Sr. Sergio Bitar H.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Pedro Rivera I.

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Miguel Ángel Caro H.

RODHOS ASESORÍAS Y PROYECTOS LTDA.

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil MBA Sra. Damaris Orphanópoulos S.

Profesionales Participantes
Ing. Civil Sr. Pablo Isensee M.
Ing. Civil Hidráulico Sr. Pascal Dumoulin W.
Técnico en Topografía Sr. Betel Leclerc G.
Asistente Sra. Jimena Velásquez P.

**LEVANTAMIENTO DE PARÁMETROS
PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA
DE CUENCAS PLUVIALES NO CONTROLADAS
EN LA IXª REGIÓN DE LA ARAUCANÍA**

INFORME FINAL

INDICE

			Pág.
CAP 1		INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	5
CAP 2		ANTECEDENTES	9
	2.1	SIIR-CNR	9
	2.2	SIG de la Dirección General de Aguas	9
	2.3	Antecedentes de suelos CIREN	10
CAP 3		IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS DE CALIBRACIÓN	12
	3.1	Análisis de estaciones fluviométricas	12
	3.2	Estaciones fluviométricas pre-seleccionadas	27
	3.3	Visita a terreno	29
	3.4	Definición de cuencas para estaciones seleccionadas	30
CAP 4		IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DE CALIBRACIÓN	32
	4.1	Análisis de los períodos de cobertura	32
	4.2	Selección de estaciones pluviométricas para análisis	34
	4.3	Análisis de correlaciones precipitación escorrentía	37
	4.4	Períodos concurrentes	40
	4.5	Patrón de precipitaciones	40
	4.6	Verificación de consistencia de las estaciones seleccionadas	42
	4.7	Cálculo del parámetro A	44
	4.8	Factores de distribución horaria	46

CAP 5		IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES EVAPORIMÉTRICAS DE CALIBRACIÓN	55
	5.1	Análisis de períodos de cobertura y relleno	55
	5.2	Patrón de evaporación y corrección de estadísticas	58
	5.3	Cálculo del parámetro B	59
	5.4	Factores de distribución horarios	60
CAP 6		HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO	63
	6.1	Parámetros geomorfológicos	63
	6.2	Parámetros del HUS	65
	6.3	Ordenadas del HUS	67
CAP 7		OBTENCIÓN DEL PARÁMETRO K DE EMBALSE	68
CAP 8		PARÁMETROS INICIALES DE SUELO	70
CAP 9		CALIBRACIÓN DEL MODELO SIMED	77
	9.1	Relleno de las estadísticas diarias	78
	9.2	Proceso de calibración	79
	9.3	Resultados de la calibración	82
CAP 10		REGIONALIZACIÓN DE PARÁMETROS	87
CAP 11		SIG Y MAPA	94
CAP 12		CONCLUSIONES	96
	12.1	Conclusiones respecto de los parámetros	96
	12.2	Conclusiones sobre el aspecto conceptual del modelo	97
	12.3	Conclusiones sobre el aspecto formal del modelo	98
	12.4	Conclusiones generales del estudio	98
ANEXO		ANEXO DIGITAL Y MAPA	100
	2.3	Coberturas suelos CIREN	
	3.1.1	Gráficos caudales medios mensuales QMM_IX	
	3.1.2	Gráficos caudales mensuales versus precipitaciones mensuales QMM_PMM_IX	
	3.1.3	Gráficos caudales medios diarios QMD_IX	
	3.3	Fotos Terreno	
	4.1	Gráficos QMD-PMD	
	4.2	Correlaciones QMD-PMD	

	4.3	Patrón precipitaciones	
	4.8	Precipitaciones CD horarios	
	5.2.1	Patrón evaporación	
	5.2.2	Evaporación diaria definitiva	
	6.1	HUS	
	7.1	Cálculo K	
	8	Parámetros de suelos	
	9.2	Calibración	
	11	SIG	

CAPÍTULO 1**INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

El presente estudio llamado “Levantamiento de parámetros para la modelación de cuencas pluviales no controladas en la IXª Región de la Araucanía”, fue licitado por la Dirección General de Aguas a través de Chilecompras, y ha sido desarrollado por Rodhos Asesorías y Proyectos Ltda, supervisado por la División de Estudios y Planificación.

El objetivo del presente estudio es aplicar y calibrar una herramienta existente de modelamiento hidrológico llamada SIMED, o Simulación de Escorrentía Diaria, concebido para generar o sintetizar información diaria de caudales cuencas o subcuencas sin control fluviométrico, en la IXª región del país.

Este requerimiento responde a la necesidad de la DGA de mejorar y agilizar la forma de constituir derechos de agua, debido a la creciente demanda por el recurso hídrico. En tal escenario, es necesario contar con herramientas adecuadas para abordar el mandato de asignar derechos de agua superficiales donde no hay control fluviométrico. En el mismo sentido, se están utilizando modelos de mayor envergadura, para cuya aplicación es de gran utilidad contar con modelos de generación de aporte desde las subcuencas, como es el SIMED.

El modelo hidrológico de simulación de escorrentía diaria llamado SIMED está siendo desarrollado aproximadamente desde el año 2001, a partir del MPL, que es un modelo de generación de caudales mensuales. Interesa, en la presente consultoría, aplicar el modelo SIMED, hacer sugerencias para su mejoramiento y evaluar la posibilidad de regionalizar los parámetros de calibración resultantes para estaciones seleccionadas de la IXª Región.

El modelo SIMED se calibra en base a nueve parámetros, los que interesa determinar para cada una de las cuencas y subcuencas pluviales de las regiones señaladas. Como el modelo se puede calibrar sólo en algunas cuencas, (las que cuentan con la información suficiente de entrada y con medición de caudales de salida), el objetivo del presente trabajo es el de estudiar y analizar la posibilidad de regionalizar los parámetros calibrados hacia el resto de las cuencas, a través de transposiciones y estimaciones basadas fundamentalmente en la similitud de los suelos, siendo también el tipo de suelo el que da origen a los parámetros iniciales de calibración.

Como resultado final del trabajo se generó un mapa con la identificación de las subcuencas estudiadas, con la identificación de todas las restantes subcuencas pluviales de la región, y con coberturas tipo .shp que contienen los parámetros de calibración del modelo en cada una de ellas. Es importante destacar que los valores iniciales de los parámetros de suelo se asignaron de acuerdo con el tipo de suelo encontrado en las cuencas de calibración, y que éstos prácticamente no se modificaron en el proceso de calibración, salvo levemente la permeabilidad vertical Khid. Tampoco se modificaron los

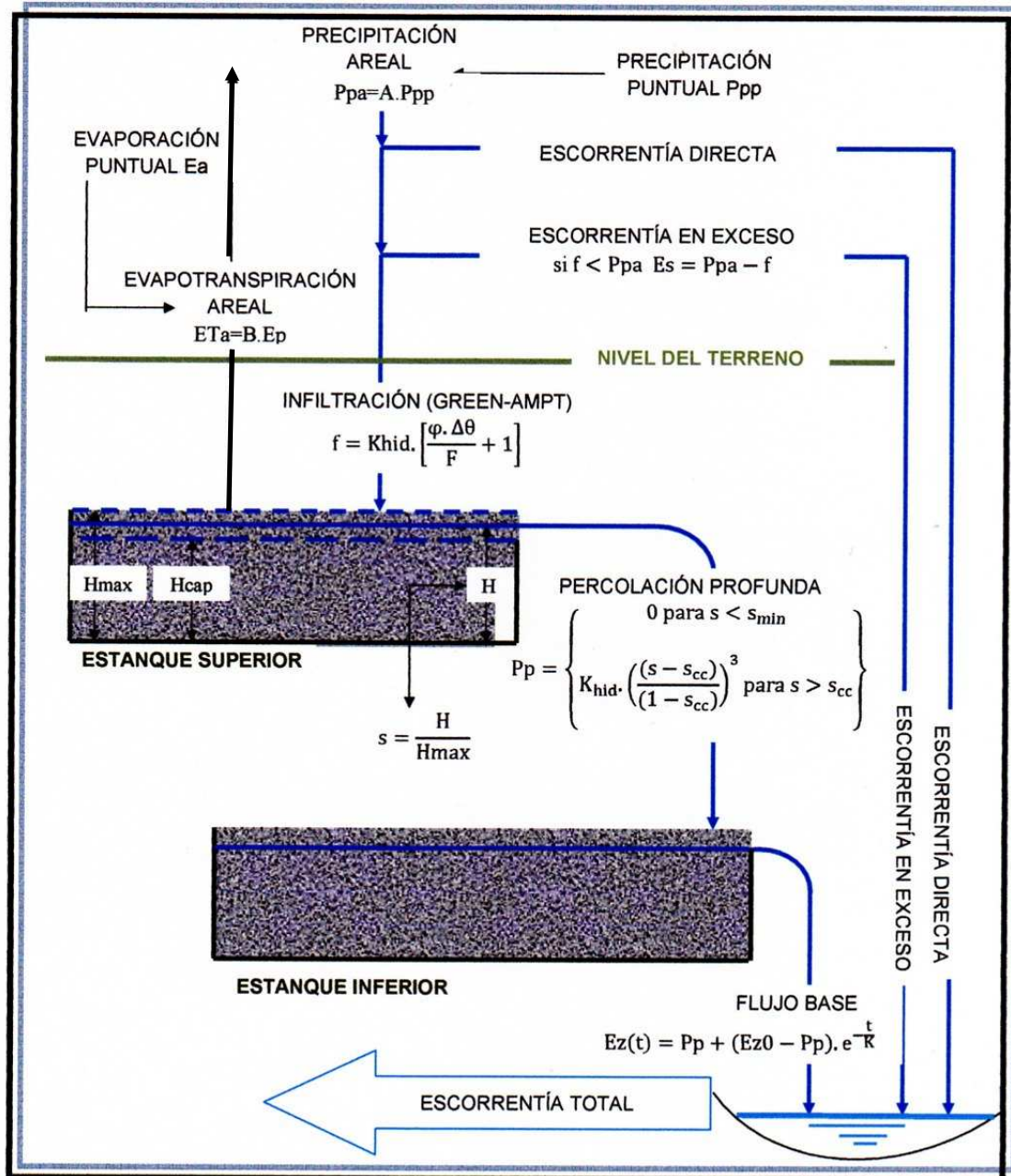
parámetros A y B, salvo en algunas ocasiones, y sólo muy levemente, el parámetro A. Fundamentalmente sólo se modificaron los parámetros K de embalse y la altura H del suelo, difíciles de estimar a nivel de cuenca, y que, en efecto, constituyen los parámetros de calibración.

Por su significado, de ambos parámetros es difícil hacer una transposición regional, de modo que los parámetros regionales de K y Hsuelo entregados en este estudio deben considerarse parámetros iniciales, y debe considerarse su calibración en algún punto de cierre.

Es del caso señalar que en el estudio antecedente, llamado “Levantamiento de parámetros para la modelación de cuencas pluviales no controladas en las regiones VII y VIII”, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica, que incluyó los estudios anteriores realizados con los modelos SIMED y Sacramento; como también estudios de suelos y estudios españoles de evaporación horaria. Dicha revisión está informada en forma completa en el señalado estudio, por lo que, de acuerdo con lo indicado por la Inspección Fiscal, no se incluyó en el presente estudio. Solamente se presenta la Figura N° 1.1, que muestra el concepto de funcionamiento del modelo SIMED, que no ha cambiado desde el estudio de levantamiento de parámetros anterior.

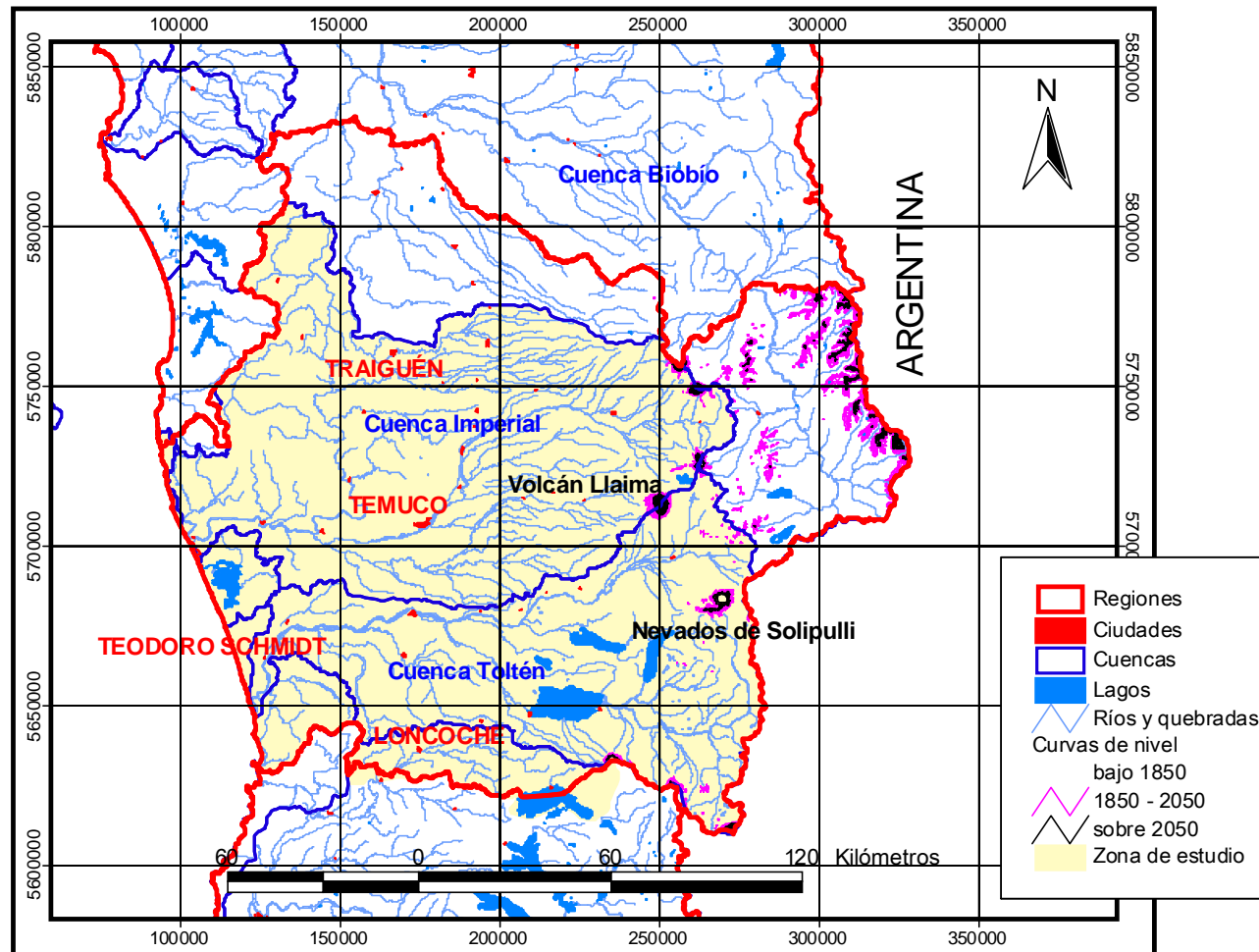
Por último, también es importante señalar que una parte de la IXª Región, correspondiente a la cuenca del río Biobío, y algunas zonas menores de las cuencas costeras entre Paicaví y río Imperial, fue cubierta en el estudio anterior de las regiones VII y VIII, de modo que el alcance geográfico del presente estudio no corresponde a la IXª Región en su totalidad, sino que a las cuencas Imperial, Toltén, subcuenca Las Cruces y las cuencas costeras correspondientes, como lo muestra la Figura N° 1.2.

Figura N° 1.1
Diagrama conceptual del modelo SIMED



Fuente: Método para la determinación de los valores iniciales de los parámetros del modelo SIMED, Miguel Angel Caro, XVIII Congreso Chileno de Hidráulica, 2007.

Figura N° 1.2
Área de estudio



CAPÍTULO 2**ANTECEDENTES****2.1 SIIR-CNR**

La Comisión Nacional de Riego (CNR) puso a disposición de la Dirección General de Aguas (DGA), para el presente trabajo, alguna información de su Sistema de Información Geográfica (SIG) llamado SIIR, correspondiente a la Región IX. Este SIG aporta solamente las coberturas gráficas, porque las bases de datos no contienen información de utilidad. Aquí se reseña la información puesta a disposición por la CNR.

Agroclima

Contiene información sobre código del distrito agroclimático y área en su base de datos. No contiene ninguna información climática.

Canales

Es una cobertura en que aparecen los canales, sin nombre ni datos que permitan identificarlos.

Embalses grandes (mayores que 50.000 m³)

La cobertura de embalses trae la ubicación de los embalses, pero no aporta identificación ni datos de ningún tipo en su base de datos.

Embalses pequeños (menores que 50.000 m³)

Al igual que la cobertura de embalses grandes, contiene la ubicación física de los embalses, pero no trae ninguna información que permita identificarlos.

Bocatomas

Se presenta la ubicación de la bocatoma y solamente un código asociado en su base de datos.

Ley 18450

Esta cobertura aporta en su base de datos el código del proyecto, sin otra información que permita identificarlo.

2.2 SIG DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

A su vez, la DGA también puso a disposición de este trabajo la información que contiene su Sistema de Información Geográfico. Estas coberturas son muy completas, pues traen en su base de datos mucha información de nombres, además de información técnica de

diversa naturaleza. Se señalan a continuación, con sus respectivas fuentes, las coberturas que serán incorporadas al SIG definitivo de este estudio. Todas se manejan en Dátum PSAD 56 Huso 19.

Curvas de nivel

Esta cobertura tiene indicación de cotas en su base de datos (cada 25 m).

Fuente Instituto Geográfico Militar (IGM)

Se encuentran digitalizadas las coberturas de caminos, ciudades, regiones, comunas y curvas de nivel, en base a la cartografía 1:250.000 del IGM, y por lo tanto aparecen con el detalle de esa escala.

Estaciones DGA

Se encuentran las coberturas con la ubicación de todas las estaciones fluviométricas, pluviométricas, evaporimétricas, meteorológicas, de calidad de aguas y de medición de niveles subterráneos, con indicación acerca de su vigencia. Estas coberturas sirvieron para identificar las estaciones de las cuales se solicitó la información estadística para alimentar el modelo de simulación.

Balance hídrico

Estas coberturas se refieren a todas las variables hídricas estudiadas y analizadas en el estudio del Balance Hídrico de la DGA (1987). Hay isolíneas de precipitaciones máximas, precipitaciones medias anuales, temperatura media anual, evaporación y evapotranspiración media anual y escorrentía anual.

Hidrogeología

Estas coberturas son todas las desarrolladas en el Mapa Hidrogeológico Nacional (1984). Además, se ha agregado una cobertura con los acuíferos restringidos o prohibidos a noviembre de 2005.

2.3 ANTECEDENTES DE SUELOS CIREN

Se averiguó acerca de los antecedentes de suelos que posee CIREN, y se adquirieron varias coberturas, con el objetivo de usarlas en la extrapolación espacial de los parámetros de calibración.

Las coberturas adquiridas fueron:

- Textura
- Granulometría
- Profundidad
- Capacidad de uso
- Pendiente

La información entregada por CIREN contiene solamente la caracterización espacial según los rangos establecidos para cada característica, y la asociación con dicha característica en la base de datos.

Las coberturas adquiridas se entregan en el Anexo Digital 2.3 Coberturas de Suelos CIREN.

CAPÍTULO 3 IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS DE CALIBRACIÓN

Dada su concepción, el modelo SIMED representa el comportamiento natural de cuencas pluviales. Esto significa que simula el escurrimiento de una cuenca a partir de la precipitación, la evaporación y los parámetros propios de la cuenca, en las condiciones asumidas para modelar. Por esta razón, para calibrar el modelo, se requiere hacerlo en una cuenca cuyas condiciones puedan ser captadas y representadas por los parámetros de modelación.

Lo señalado significa que las cuencas de calibración deben, en lo posible, estar libres de intervenciones antrópicas (canales, trasvases, lagos, embalses u otros), que distorsionen el comportamiento del escurrimiento resultante.

Por otro lado, la calibración del modelo exige trabajar en cuencas con control meteorológico (pluviométrico o pluviográfico y evaporimétrico), además del fluviométrico.

Adicionalmente, es necesario señalar que, para facilitar la regionalización de los parámetros de suelo, y procurando que ellos mantengan una relación con la realidad, es conveniente que las cuencas sean homogéneas, condición que es más fácil de lograr cuando se seleccionan cuencas pequeñas. Si bien esta condición no es necesaria, puesto que al calibrar el modelo, los parámetros finales de calibración representan un tipo de suelo promedio, es altamente conveniente seleccionar cuencas con suelos homogéneos.

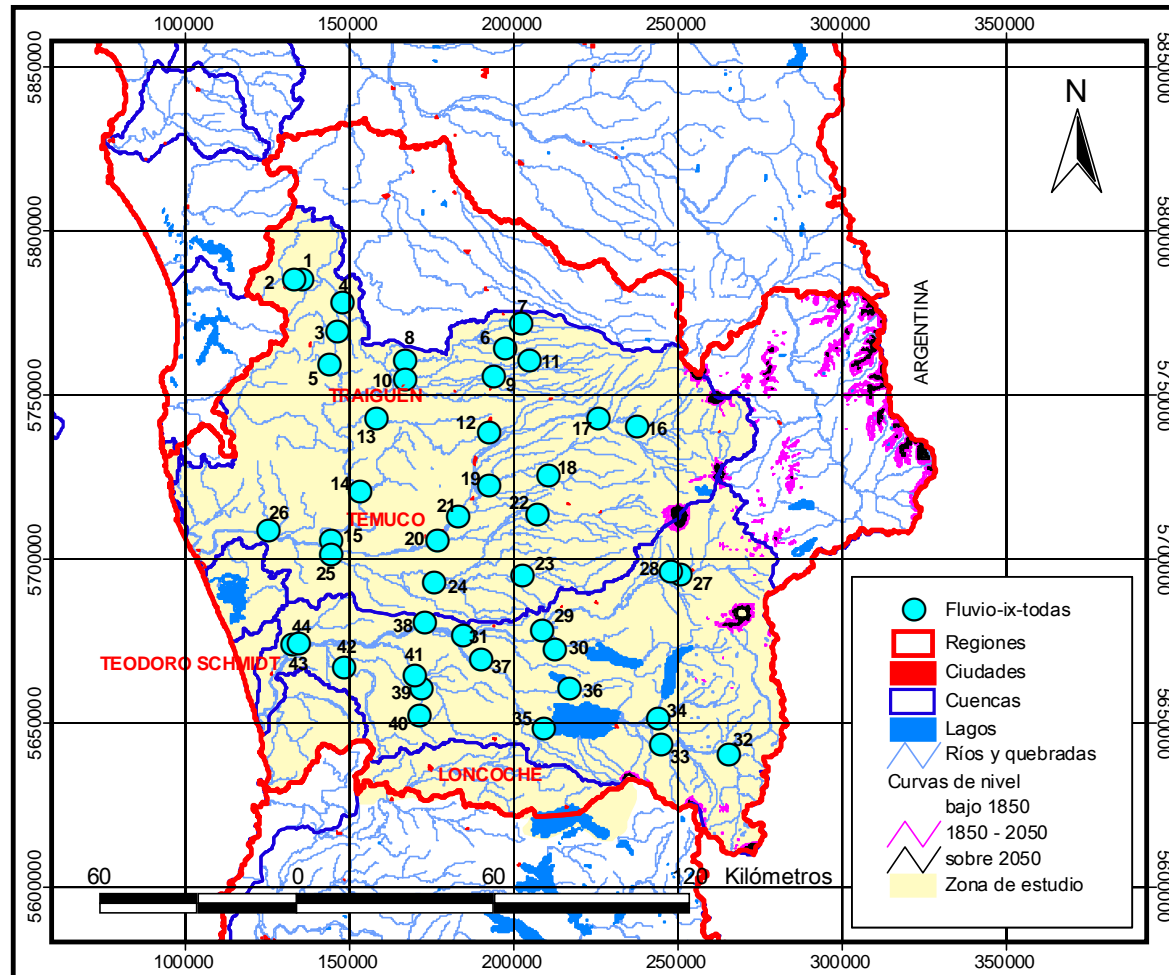
Por lo anteriormente señalado, es necesario entonces, identificar las cuencas pluviales, no intervenidas, homogéneas y con un adecuado control fluviométrico, para luego proceder a la calibración del modelo.

3.1 ANÁLISIS DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS

Las estaciones fluviométricas de la DGA existentes el área de estudio son las que se presentan en la Figura N° 3.1. Son en total 44 estaciones, y se detallan en el Cuadro N° 3.1.

La selección de estaciones para calibrar se efectuó en varios pasos, que se presentan a continuación.

Figura N° 3.1
Estaciones fluviométricas DGA



a) Descarte por período

El primer análisis que se realizó, se refiere al período en que existen estadísticas diarias en cada una de las estaciones, y la calidad de tales estadísticas. Para eso, en el Cuadro N° 3.1 se presenta el análisis de cada una de las estadísticas. En dicho cuadro, los años completos se señalan con una c, años con 11 meses completos con una b, y años con 10 meses completos con una a. Los números de 1 a 9 señalan la cantidad de meses completos. Años sin información o con todos sus meses incompletos, quedan vacíos.

En el Cuadro N° 3.1 se aprecia que hay algunas estaciones con estadísticas muy cortas, y otras incompletas.

Se seleccionó todas aquellas estaciones con estadísticas completas en al menos 2 períodos de 5 años, aunque ambos períodos fueran inconexos.

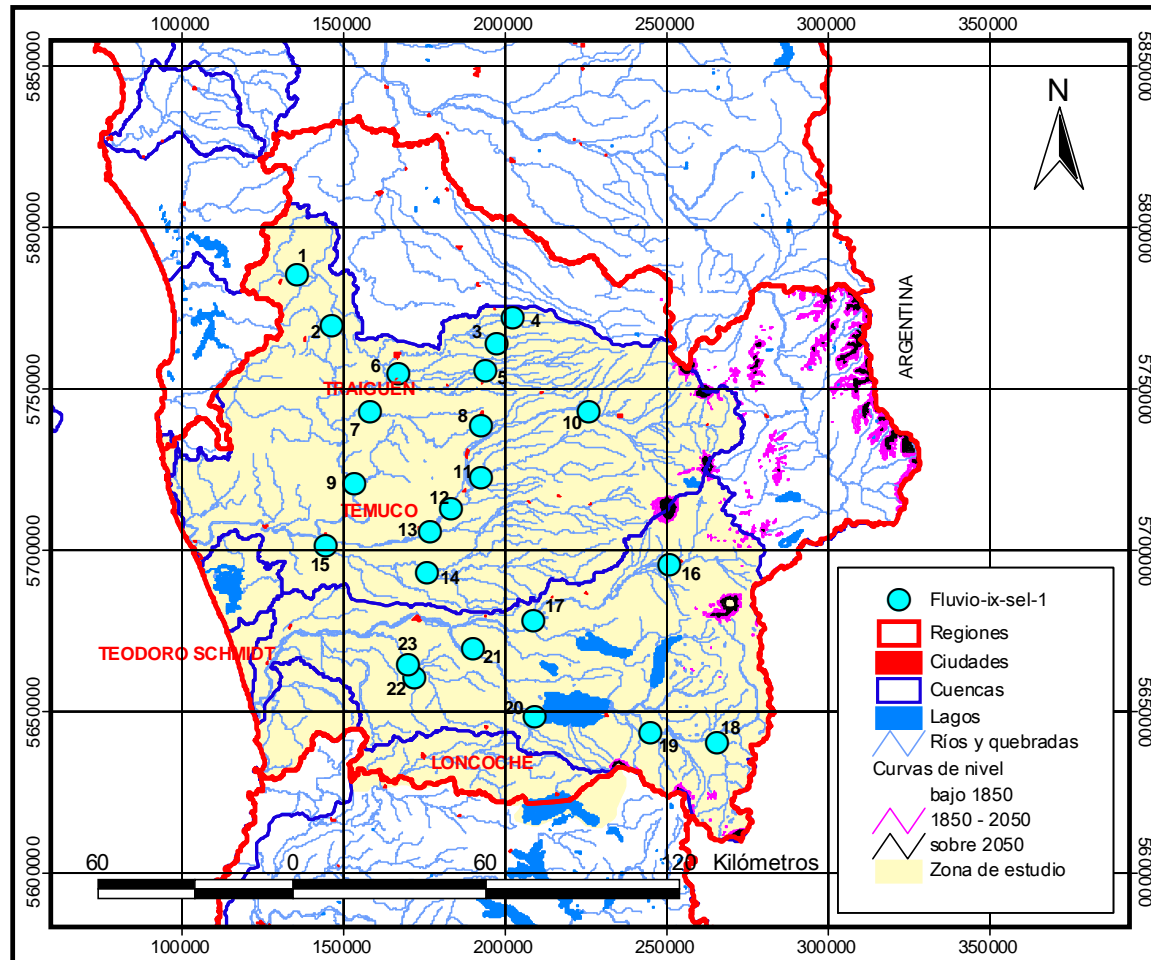
En la última columna del cuadro se anota cuáles son las estaciones seleccionadas, y los períodos completos de datos fluviométricos diarios con que cuentan. En el Cuadro N° 3.2 y en la Figura N° 3.2 se presentan las estaciones resultantes de esta primera selección, que son 23, y cuya cobertura correspondiente se llama fluvio-ix-sel-1.

Es necesario recordar que este análisis no considera la vigencia actual de las estaciones. No es necesario que estén vigentes en la actualidad, sólo es necesario que cuenten con una estadística de buena calidad, apta para calibración.

Cuadro N° 3.2
Estaciones fluviométricas Selección 1, y período asociado

Estación seleccionada Sel 1	Período
Río Allipén en Melipeuco	1996-2005
Río Cautín en Almagro	1975 - 2002
Río Cautín en Cajón	1952-1961 y 1983 - 2006
Río Cautín en Temuco	1926 - 1931
Río Cholchol en Cholchol	1987 - 2006
Río Dumo en Santa Ana	1987 - 2006
Río Quillen en Longitudinal	1960- 1968 y 1976 a 1982
Río Toltén en Coipúe	1960 - 1968 y 1976 - 1980
Río Toltén en Villarrica	1980 - 2001
Río Traiguén en Victoria	1985 - 1993 y 1995 - 2006
Río Trancura en Curarrehue	1972 a 1976 y 1993 - 1999
Estero Chufquén en Chufquén	ene 2002 - dic 2006
Estero Puyehue en Quitratúe	ene 1977 - nov 2005
Río Allipén Los Laureles	ene 1997 - dic 2006
Río Cautín en Rariruca	ene 1987 - dic 2006
Río Donguil en Gorbea	ene 1994 - dic 2001
Río Lumaco en Lumaco	ene 1983 - dic 2001
Río Muco en Puente Muco	ene 1980 - dic 2006
Río Purén en Tranamán	jul 1988 - jul 2004
Río Quepe en Quepe	ene 1975 - dic 1998
Río Quillén en Galvarino	ene 1970 - dic 2001
Río Quino en Longitudinal	ene 1986 - dic 2006
Río Trancura antes río Llafenco	jul 1974 - abr 2003

Figura N° 3.2
Estaciones fluviométricas Sel 1 (fluvio-ix-sel-1)



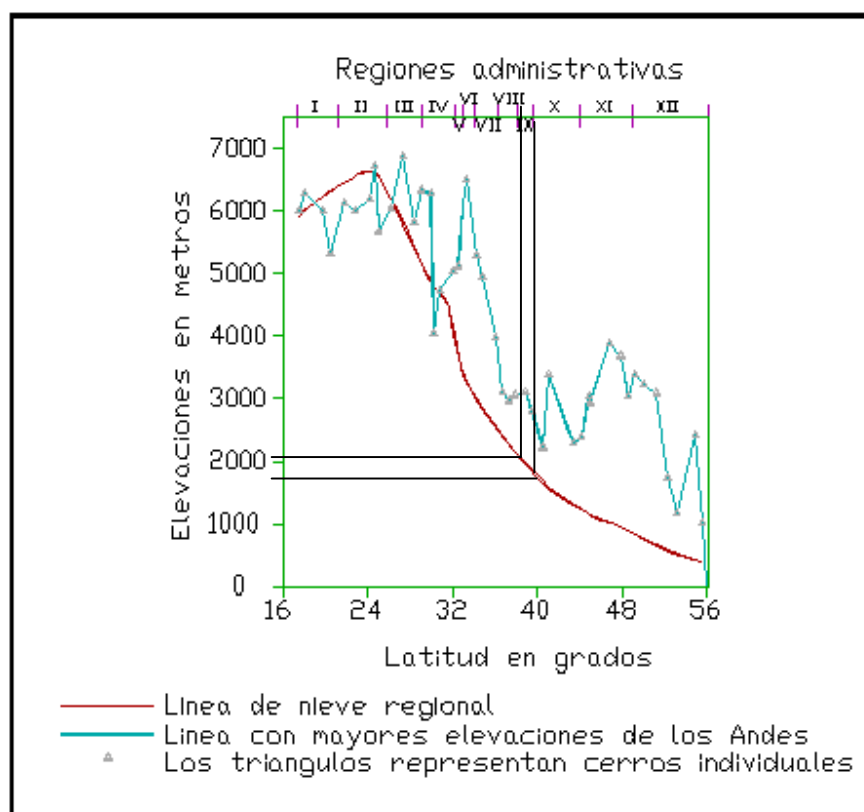
b) Descarte de estaciones francamente nivales

Se identificó la línea de nieve, para descartar todas las estaciones fluviométricas que controlan cuencas francamente nivales.

La línea de nieve se obtuvo de un estudio realizado en 1995 por Gino Casassa, para el Laboratorio de Glaciología, proyecto conjunto de la Universidad de Chile y del Centro de Estudios Científicos de Valdivia, y temporalmente publicado en la página www.glaciologia.cl.

A lo largo de Chile, la línea de nieve presenta la evolución que se muestra en la Figura N° 3.3

Figura N° 3.3
Evolución de la línea de nieve a lo largo de Chile
(Casassa, 1995)



Según se puede observar, a medida que se avanza hacia el sur, en la IX^a Región la línea de nieve varía entre las cotas 2050 y 1850. Estas curvas de nivel se presentan marcadas en las Figuras N° 3.1 y 3.2.

Se puede observar en dichas Figuras, que las cuencas bajo análisis (Imperial y Toltén) no tienen alcance cordillerano de importancia, por lo que ninguna de las estaciones podría presentar un régimen francamente nival. En efecto, las áreas que se encuentran sobre la línea de nieve, son muy reducidas, y no afectan mayormente a ninguna de las estaciones.

Esta observación se corroboró con el análisis de los gráficos de caudales medios mensuales, que se adjunta en el archivo del Anexo 3.1.1 QMM_IX.dwg del Anexo Digital, donde se observa que ninguna estación presenta régimen nival, sino que todas tienen un régimen predominantemente pluvial.

De esta forma, no hay estaciones que puedan descartarse por ser de naturaleza nival.

c) Descarte de estaciones pluvionivales o mixtas

Para saber si hay estaciones con comportamiento mixto, se analizaron, en primera instancia, los gráficos de caudales medios mensuales QMM_IX.dwg del Anexo Digital 3.1.1.

A partir de ese análisis, se observa que hay dos estaciones con comportamiento predominantemente pluvial, pero ocasionalmente influido por derretimiento, que son las estaciones

- Allipén en Melipeuco y
- Trancura en Curarrehue.

El comportamiento levemente mixto descubierto en los datos mensuales, se confirmó a través de la observación de los gráficos conjuntos de caudal y precipitación mensual, que se presentan en el Anexo Digital 3.1.2, QMM_PMM_IX.dwg. En estos gráficos, conjuntos, realizados para cinco estaciones de posible influencia nival, se observó que para estas dos estaciones efectivamente se nota una descoordinación entre precipitaciones y caudales, las que pueden atribuirse a una influencia nival. La Figura 3.4, extractada de dicho archivo, ejemplifica lo señalado.

Finalmente, también se graficaron los datos de caudales diarios, que se presentan en el Anexo Digital 3.1.3, QMD_IX.dwg. Lo que se observa en estos gráficos, es que en ambas estaciones, las recesiones están aumentadas, y no muestran un comportamiento similar a las demás estaciones. La Figura N° 3.5, extractada de dicho archivo, ejemplifica lo señalado.

Figura N° 3.4
Valores mensuales de precipitaciones en Puesco
y caudales en Trancura en Curarrehue

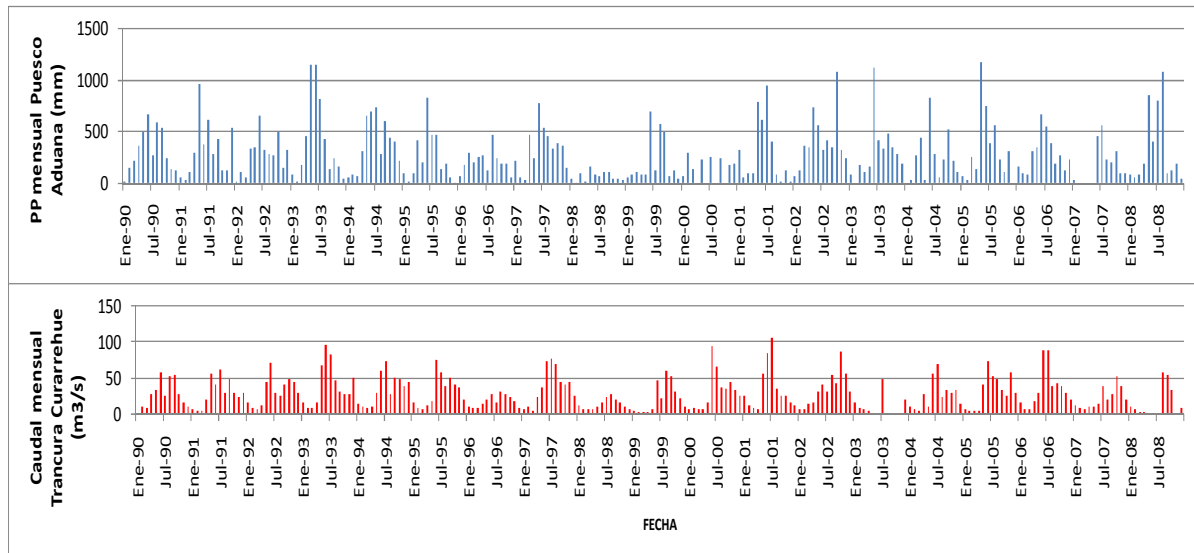
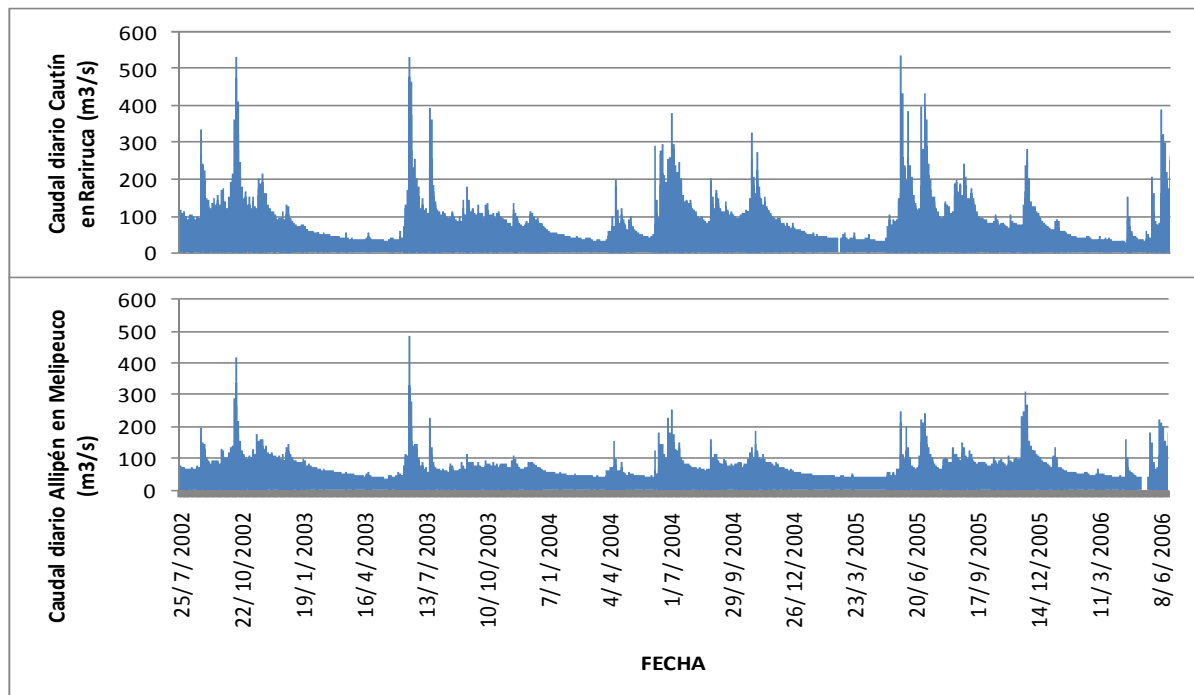


Figura N° 3.5
Caudales diarios en Allipén en Melipeuco y Cautín en Rariruca (m³/s)



d) Descarte de estaciones alteradas

En la zona de estudio se detectan dos conceptos de alteración de las estadísticas: los lagos y el riego.

La cuenca del río Toltén es la primera cuenca de la llamada región de los lagos de Chile, y evacúa tres lagos: El Colico, el Caburgua y el Villarrica. Todas las estaciones fluviométricas que se encuentran aguas abajo de uno de los grandes lagos, están alteradas por el almacenamiento, y no responden a los fundamentos conceptuales del modelo SIMED.

Las estaciones que se encuentran en esta condición son las siguientes:

- Toltén en Villarrica
- Toltén en Coipúe

Por el otro concepto de alteración, el del riego, se descartan las estaciones

- Cautín en Temuco
- Cautín en Cajón
- Cautín en Almagro

porque quedan aguas abajo de las grandes tomas de los canales del río Cautín.

También se podría ver algo influida por una bocatoma la estación

- Purén en Tranamán,

la que, sin embargo, no se descarta a priori. El efecto de esta extracción se mitiga hacia aguas abajo, y se estima que la estación Lumaco en Lumaco ya no presentaría afectación por este concepto.

e) Descarte de estaciones de cuencas muy pequeñas y bajo caudal

Entre las estaciones analizadas a nivel de caudal medio diario, Anexo Digital 3.1.3 QMD_IX.dwg, hay tres cuyas estadísticas muestran caudales medios diarios muy reducidos, los cuales corresponden a cuencas aportantes muy pequeñas. Estas estaciones, por lo tanto, pueden estar más fuertemente alteradas por el riego. Ellas son:

- Río Dumo en Santa Ana
- Río Traiguén en Victoria
- Río Quillen en Longitudinal

Estas estaciones han quedado descartadas del grupo de estaciones a calibrar.

f) Descarte de estaciones que cubren varios tipos de suelos

Para la calibración de las estaciones se asume que la cuenca corresponde a un determinado tipo de suelo. Por lo tanto, lo ideal es seleccionar las estaciones de modo que

las cuencas correspondientes presenten pocas variaciones de suelo o pocos tipos de suelo, para facilitar la regionalización de los parámetros. Para ello, se ha representado en SIG la información adquirida en CIREN sobre los tipos de suelo. Las características más relevantes, que son textura y granulometría, además de la capacidad de uso, se representan en las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8, donde se han incluido las 23 estaciones de la selección 1, y las subcuencas de la DGA. A partir de estas figuras, es posible detectar que hay una estación cuya cuenca abarca diferentes tipos de suelos, y que por lo tanto no es muy apta para calibración. Se trata de:

- Río Cholchol en Cholchol, que abarca cordillera de la Costa (suelos moderadamente finos, con texturas francosas y arcillosas, capacidad de uso VI y VII) y valle central (suelos medios caracterizados por trumaos, capacidad de uso I y II).

Las demás estaciones aún no descartadas representan cuencas relativamente homogéneas en cuanto a tipo de suelo.

Figura N° 3.6
Textura de suelos, estaciones Sel 1 y subsubcuencas correspondientes

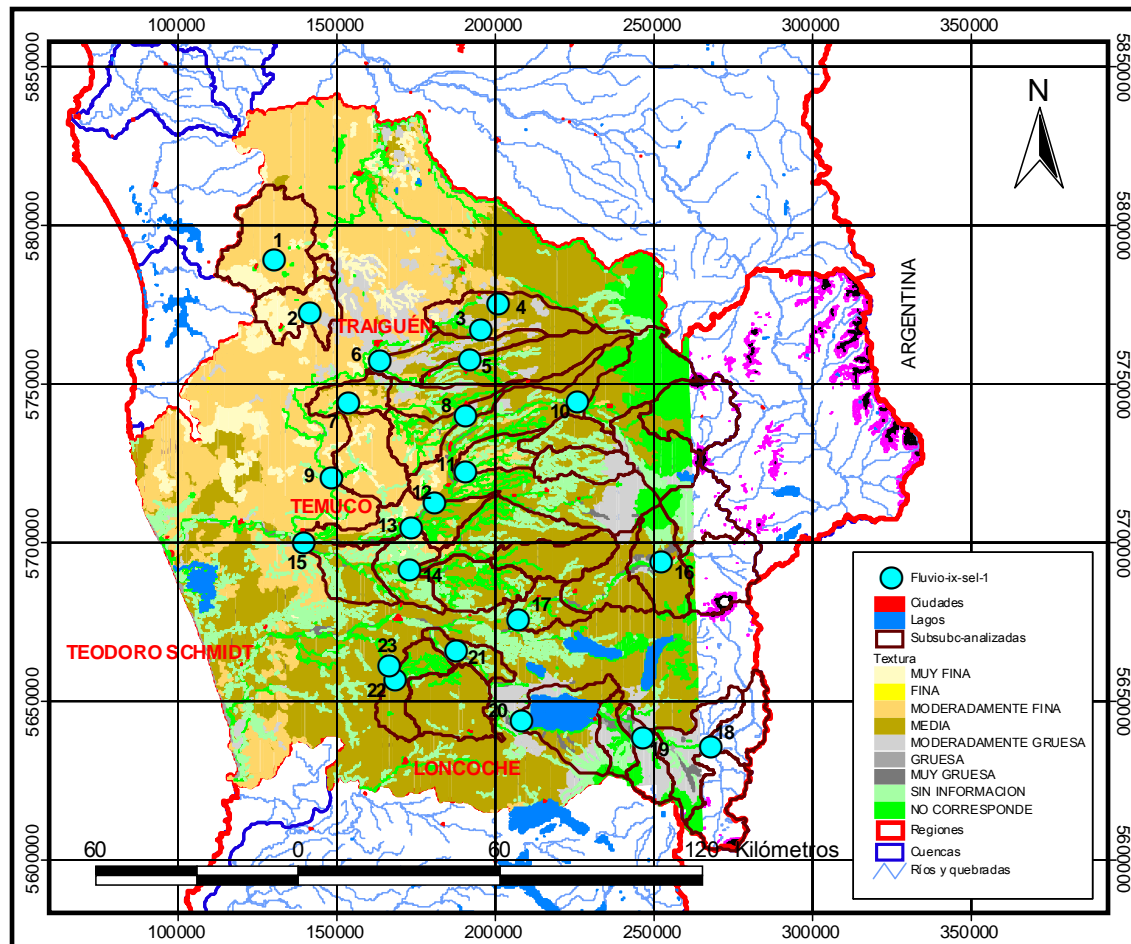


Figura N° 3.7
Granulometría de suelos, estaciones Sel 1 y subsubcuencas DGA

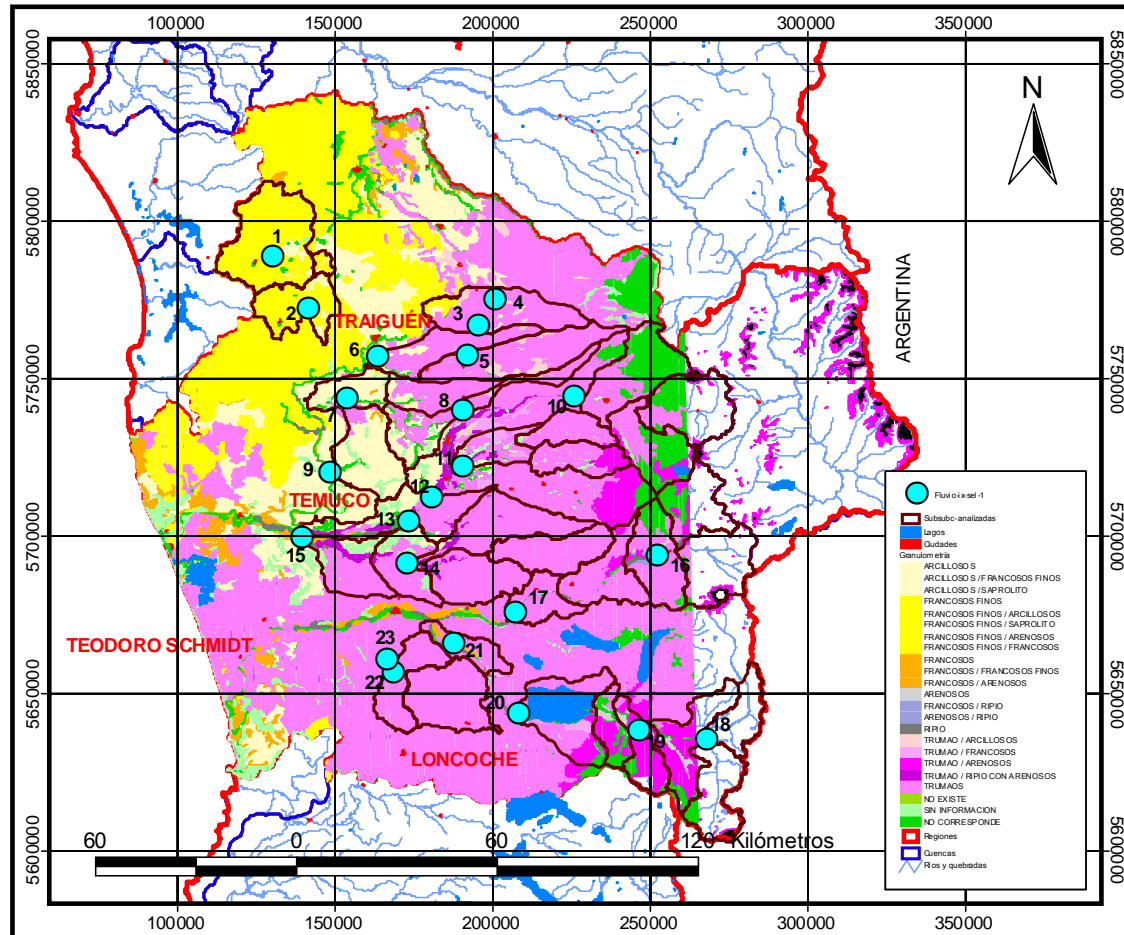
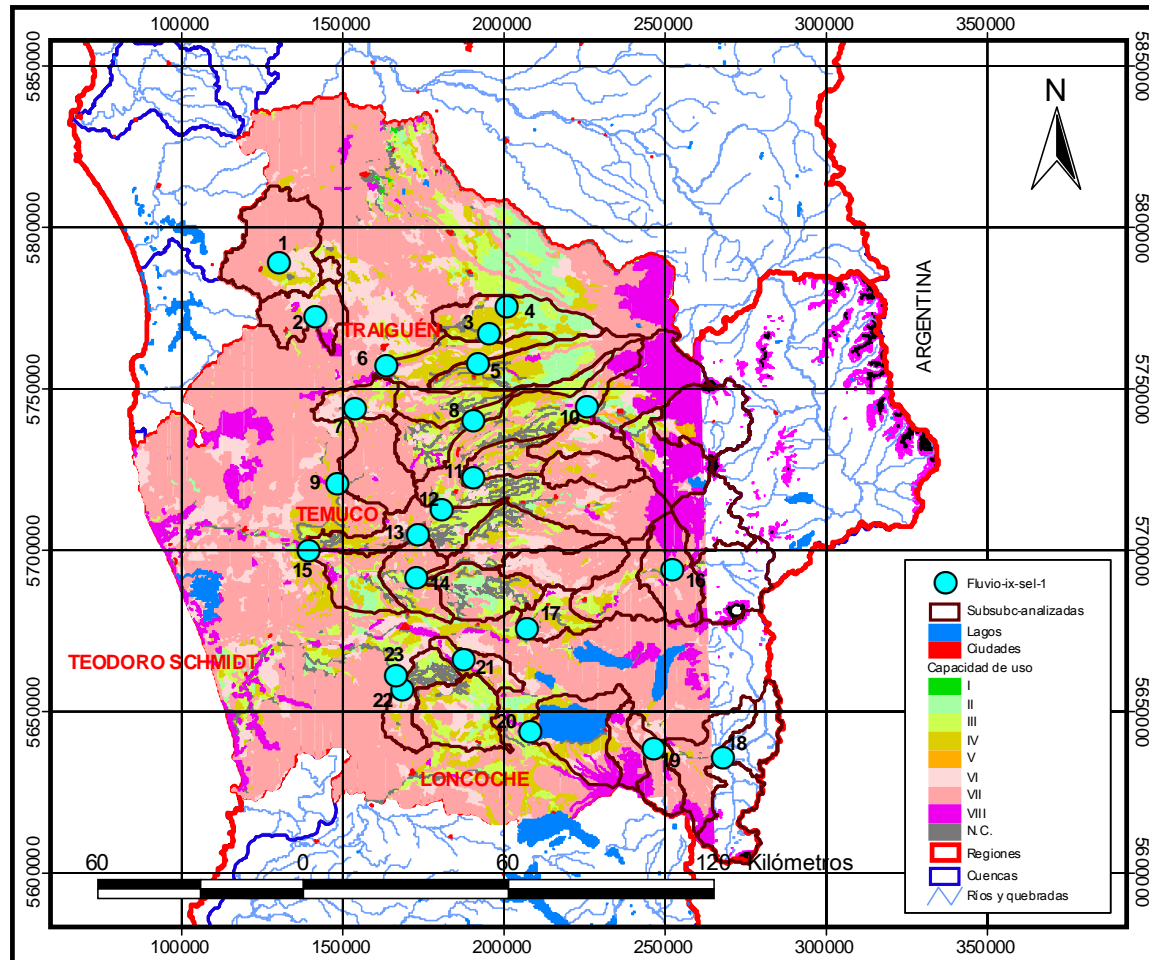


Figura N° 3.8
Capacidad de uso de suelos, estaciones Sel 1 y subcuencas DGA



g) Descarte de estaciones que incluyen o son incluidas por otras

Hay algunos casos en que la cuenca aportante a una estación incluye completamente la cuenca correspondiente a otra. Son los casos de.

- Río Lumaco en Lumaco que incluye Purén en Tranamán
- Estero Chufquén en Chufquén, que incluye Quino en Longitudinal
- Río Dónquil en Gorbea que incluye Estero Puyehue en Quitratúe

En los tres casos, los suelos de las cuencas pequeñas o grandes son de naturaleza similar en cuanto a textura y granulometría del suelo. La decisión acerca de cuál de las dos finalmente considerar para la calibración se hizo depender de la calidad de la correlación de caudales con las precipitaciones de las estaciones del entorno.

En el primer caso, se correlacionó la estación pluviométrica Lumaco en Lumaco con las precipitaciones de Traiguén y de Tranamán, resultando muy buena la correlación con Tranamán, mientras que para la estación pluviométrica Purén en Tranamán, ambas correlaciones, tanto con Traiguén como con Tranamán, resultaron peores. Por esta razón, entre ambas, se seleccionó Lumaco en Lumaco.

La selección de Quino (Chufquén) en Chufquén frente a Quino en Longitudinal, se apoyó en las correlaciones con la precipitación (estación Las Mercedes en el primer caso, y Las Mercedes, Laguna Malleco y Malalcahuello en el segundo caso), que resultaron razonablemente buenas para Quino en Chufquén, y muy malas para Quino en Longitudinal.

En cuanto al río Dónquil en Gorbea, que incluye el Estero Puyehue en Quitratúe, se decidió definir, con fines experimentales, una cuenca y ambas subcuencas:

- Dónquil en Gorbea
- Puyehue en Quitratúe
- Dónquil en Gorbea sin Puyehue en Quitratúe,

para analizar los parámetros resultantes de las tres, y poder apreciar qué relación guardan entre ellos.

3.2 ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS PRE-SELECCIONADAS

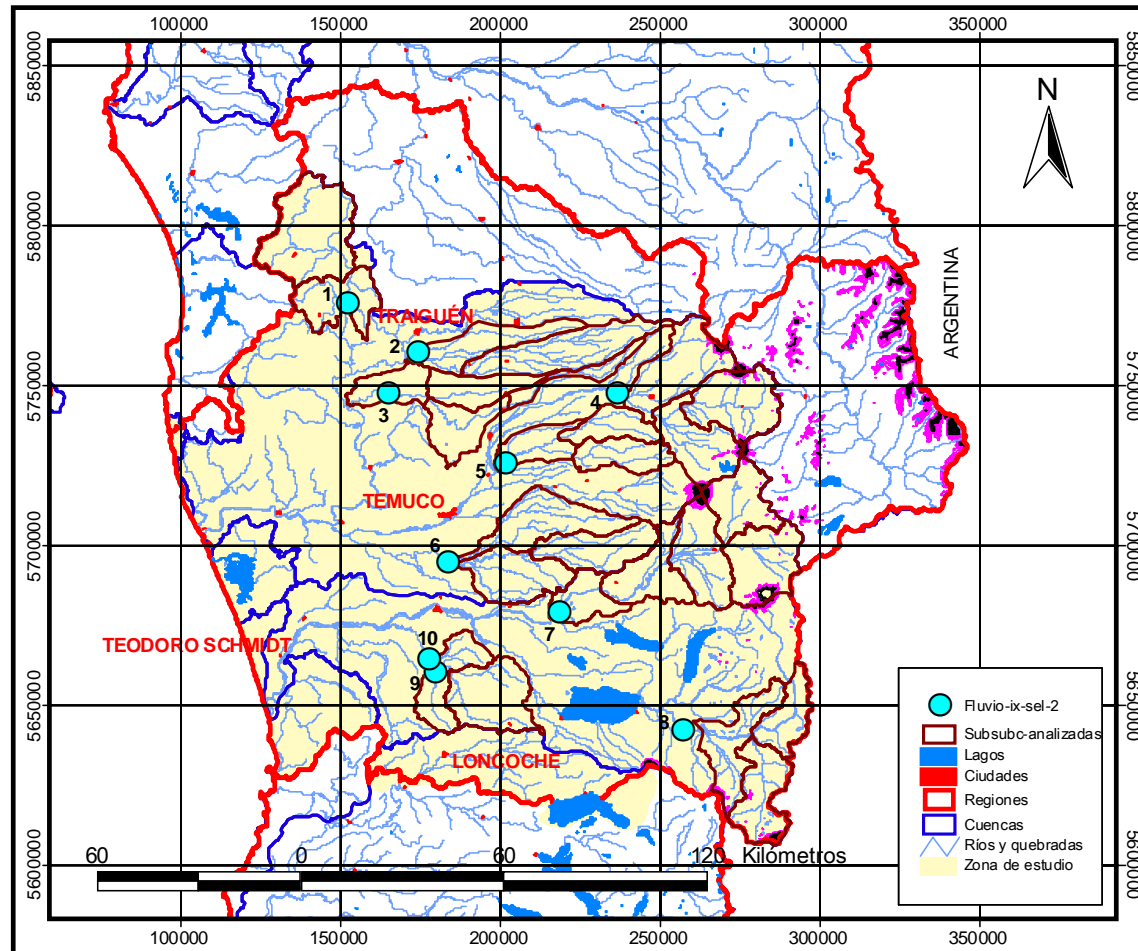
Las estaciones fluviométricas que aprobaron todos los criterios anteriores sin ser descartadas, son las que se muestran en el Cuadro N° 3.3 y Figura N° 3.9. Estas estaciones se visitaron en terreno, para verificar la bondad de las estadísticas correspondientes.

Según se puede apreciar con ayuda de las Figuras N° 3.6, 3.7 y 3.8, las estaciones seleccionadas cubren todas las clases de suelos, desde precordilleranos pasando por el valle central hasta la cordillera de la costa.

Cuadro N° 3.3
Estaciones fluviométricas seleccionadas en gabinete Sel-2

Estación seleccionada sel 2	Período
Estero Chufquén en Chufquén	ene 2002 - dic 2006
Estero Puyehue en Quitratúe	ene 1977 - nov 2005
Río Allipén Los Laureles	ene 1997 - dic 2006
Río Cautín en Rariruca	ene 1987 - dic 2006
Río Donguil en Gorbea	ene 1994 - dic 2001
Río Lumaco en Lumaco	ene 1983 - dic 2001
Río Muco en Puente Muco	ene 1980 - dic 2006
Río Quepe en Quepe	ene 1975 - dic 1998
Río Quillén en Galvarino	ene 1970 - dic 2001
Río Trancura antes río Llafenco	jul 1974 - abr 2003

Figura N° 3.9
Estaciones fluviométricas seleccionadas en gabinete (fluvio-ix-sel-2.shp)



3.3 VISITA A TERRENO

Con el objetivo de verificar esta selección de estaciones, y confirmar que ellas fueran aptas y estuvieran midiendo adecuadamente los caudales, se visitó en terreno todas las estaciones de la Selección 2, en una campaña que duró desde el 14 hasta el 17 de Septiembre de 2009.

Las estaciones se inspeccionaron visualmente, pero también se conversó con personal de la DGA Regional, encargado de las estaciones, para conocer mayores detalles acerca de la calidad de las estadísticas.

El resultado de la visita a terreno fue el siguiente:

- La estación Purén en Tranamán está suspendida, ahora se trasladó hacia aguas arriba, se encuentra 4 km antes de Purén, en el camino Los Sauces a Purén, y se llama Purén en Purén. Sin embargo, ésta no sería una buena estación, pues una bocatoma de canal ubicada unos 800 m aguas abajo, que tiene una barrera en el río, peraltaría el nivel del agua en la estación. La antigua estación en Tranamán tiene sus caudales afectados por la extracción de esta bocatoma. Esta fue una razón adicional para descartar esta estación para calibración, y en vez de ella, decidir por Lumaco en Lumaco.
- Quepe en Quepe tiene un cauce con mucha intervención de extracción de áridos. Hay frecuentes cambios de la curva de descarga que no siempre han sido adecuadamente registrados. La estación ha cambiado de emplazamiento varias veces, hace cuatro años una crecida se llevó el instrumental. Actualmente se mide en el puente de la Ruta 5. Hidrológicamente no se mide de acuerdo con la norma, porque sólo tiene una medición de velocidad al 60% de la profundidad. Se quiere trasladar la estación.
Por lo señalado, esta estación fue descartada como estación de calibración.

En cuanto a las demás estaciones pluviométricas de la selección 2, se puede decir que ellas no presentan crecidas nivales, sólo pluviales, son estables, no presentan problemas de medición, y no tienen influencia importante de canales de riego (salvo Allipén en Los Laureles, que tiene aguas arriba el canal Allipén que extrae 16 m³/s). En algunas estaciones se embanca el limnómetro, o la sección, durante el estiaje, pero en general se consideran buenas estaciones.

En cuanto a las estaciones pluviométricas, según se informó en la Región, todas ellas son buenas estaciones y no presentan problemas de medición.

Nota:

En la Región, se ha corregido el nombre de la estación Chufquén en Chufquén, que en realidad controla el río Quino cerca de la localidad de Chufquén, por lo que ahora se

llama Río Quino en Chufquén. En la región se informó que la estación en Chufquén es mejor que la de Quino en Longitudinal.

En el archivo 3.3 Fotos Terreno del Anexo Digital, se entrega el material fotográfico de las estaciones fluviométricas visitadas en terreno.

Con esta visita, se completó la definición preliminar de estaciones de calibración, que se llamará Estaciones seleccionadas Sel-3, y que serían las que se muestran en el Cuadro N° 3.4:

Cuadro N° 3.4
Estaciones fluviométricas seleccionadas post terreno Sel-3

Estación seleccionada sel 3	Período
Río Lumaco en Lumaco	ene 1983 - dic 2001
Río Quino en Chufquén	ene 2002 - dic 2006
Río Quillén en Galvarino	ene 1970 - dic 2001
Río Cautín en Rariruca	ene 1987 - dic 2006
Río Muco en Puente Muco	ene 1980 - dic 2006
Río Allipén Los Laureles	ene 1997 - dic 2006
Río Trancura antes río Llafenco	jul 1974 - abr 2003
Río Donguil en Gorbea	ene 1994 - dic 2001
Estero Puyehue en Quitratúe	ene 1977 - nov 2005
Río Dónguill sin Puyehue	ene 1994 - dic 2001

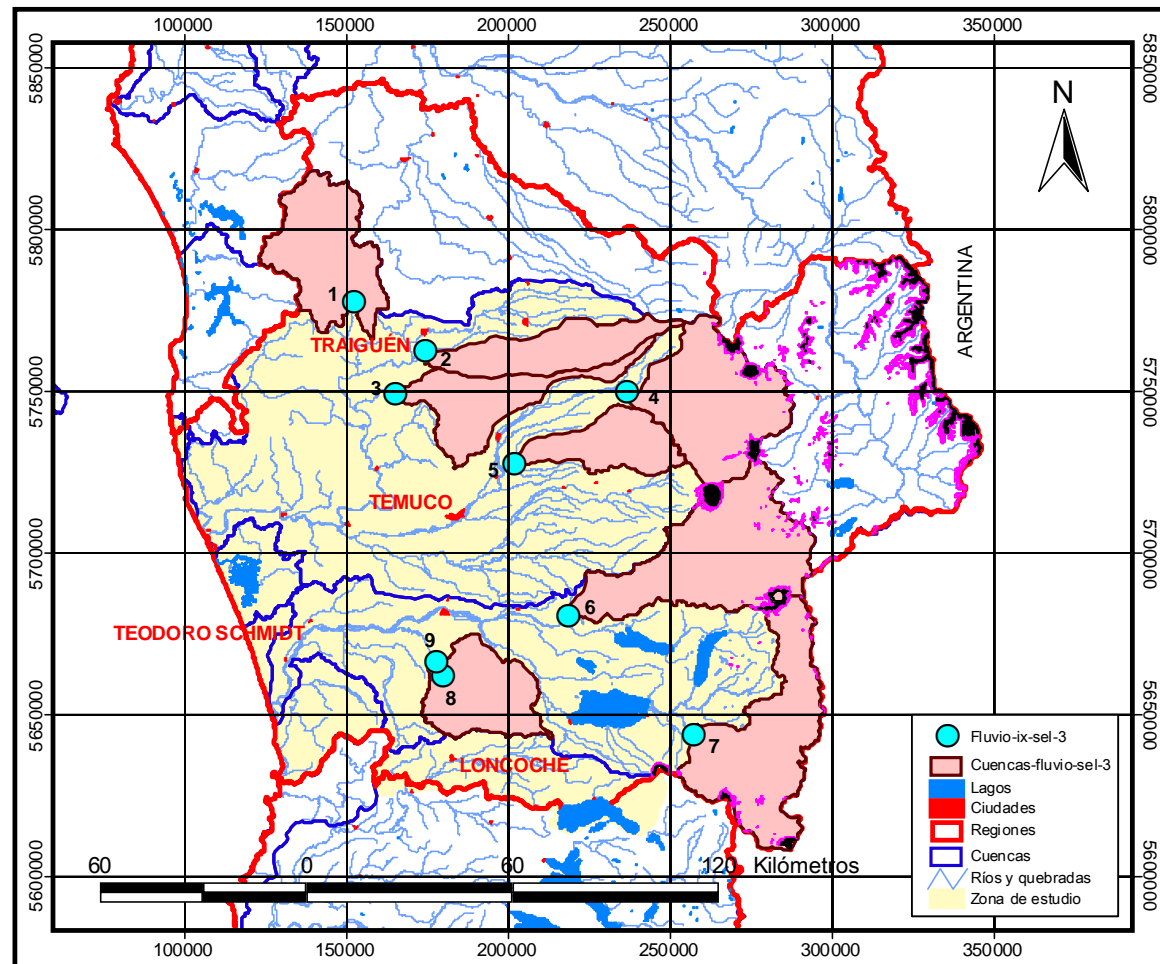
* Nota: La estación Dónguill sin Puyehue no es una estación física de la DGA, sino que se refiere a una estadística que se obtiene por diferencia entre Dónguill en Gorbea y Puyehue en Quitratúe.

3.4 DEFINICIÓN DE CUENCAS PARA ESTACIONES SELECCIONADAS

Una vez definidas las cuencas aptas para calibración, se procedió a definir las cuencas aportantes correspondientes, con el fin de identificar las estaciones pluviométricas y evapométricas más aptas para la simulación.

El trazado de las cuencas de calibración es el que se muestra en la Figura N° 3.10 adjunta.

Figura N° 3.10
Cuencas de calibración de las estaciones Fluvio-sel-3



CAPÍTULO 4 IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DE CALIBRACIÓN

Para que una estación pluviométrica siga en la lista de las aptas para calibración, deben cumplir algunas condiciones las estaciones pluviométricas (o pluviográficas) cercanas o representativas que se usarán para la calibración. Las condiciones que dichas estaciones deben cumplir, son las siguientes:

- deben tener registros simultáneos, para generar la información de entrada al modelo.
- los valores de precipitación deben explicar el comportamiento de los caudales.

4.1 ANÁLISIS DE LOS PERÍODOS DE COBERTURA

Al, igual que para las estaciones pluviométricas, se efectuó un análisis de los períodos cubiertos por todas las estaciones pluviométricas/gráficas.

El resultado de dicho análisis se encuentra en el Cuadro 4.1, en el cual se señalan los años completos con una c, los años con 11 meses completos con una b, los años con 10 meses completos con una a, y los demás años con la cantidad de meses completos en cifras.

Se observa que todas las estaciones seleccionadas tienen períodos de al menos 10 años de estadísticas completas. Esto se logró al dejar fuera del análisis las siguientes estaciones, que tienen estadísticas muy cortas (4 años o menos):

- Cautín en Rari Ruca DCP
- Cautín en Cajón DCP
- Perquenco
- Parque Nahuelbuta

4.2 SELECCIÓN DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS PARA ANÁLISIS

Del conjunto de estaciones con estadísticas largas se seleccionaron las estaciones pluviométricas que se encuentran en el entorno de las cuencas de cada una de las estaciones fluviométricas. Se seleccionaron las estaciones cercanas, para escoger dentro de ellas, la que mejor explica el comportamiento diario observado de los caudales.

La estadística de cada estación fluviométrica se graficó en conjunto con la estadística de las estaciones pluviométricas cercanas. Los grupos de gráficos son los siguientes, y se presentan en la carpeta 4.1 Gráficos QMD-PMD del Anexo Digital :

- Lumaco en Lumaco con:
 - o Traiguén
 - o Tranamán

- Quino en Chufquén
 - o Las Mercedes
 - o Tranamán
 - o Traiguén
 - o Lautaro

- Quillén en Galvarino con:
 - o Quillén
 - o Lautaro

- Cautín en Rariruca con:
 - o Laguna Malleco
 - o Curacautín
 - o Rariruca
 - o Malalcahuello
 - o Manzanar

- Muco en Puente Muco con:
 - o Curacautín
 - o Vilcún
 - o Cherquenco

- Allipén en Los Laureles con:
 - o Cunco
 - o Quecheregua
 - o Los Laureles
 - o Tricauco
 - o Malalcahuello

- Trancura antes río Llafenco con:
 - o Llafenco
 - o Curarrehue
 - o Puesco Aduana

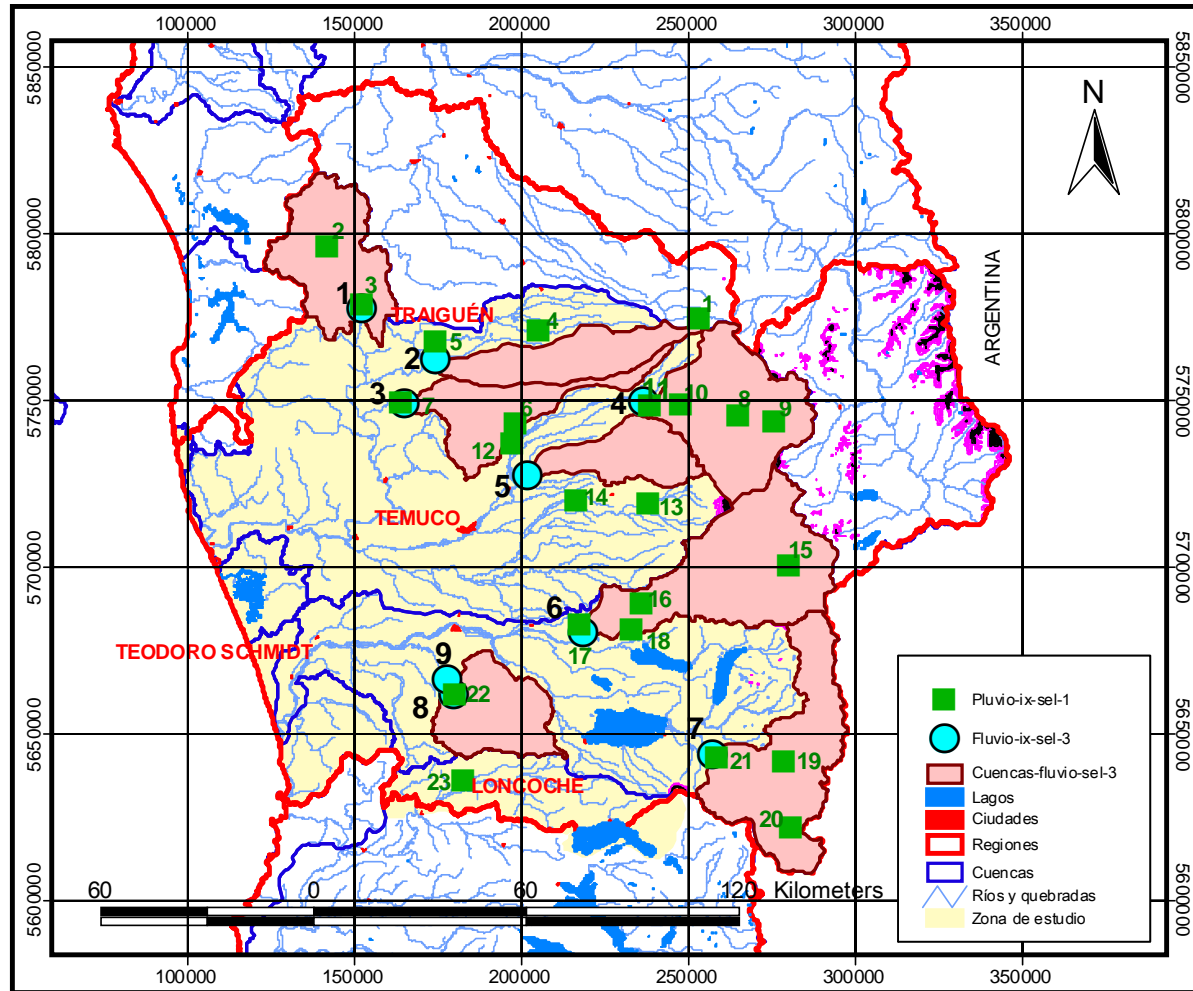
- Dónguila en Gorbea con:
 - o Loncoche
 - o Quitratúe

- Puyehue en Quitratúe con:
 - o Quitratúe
 - o Loncoche

El análisis visual de estos grupos permitió hacer una selección preliminar de las estaciones pluviométricas que mejor explican el comportamiento de la estación fluviométrica asociada. Los gráficos en los que se basó el análisis preliminar visual, se presentan en la carpeta 4.1 Gráficos QMD-PMD del Anexo Digital.

El conjunto de 23 estaciones pluviométricas seleccionadas se presenta en una cobertura llamada pluvio-ix-sel-1.shp, en la Figura N° 4.1.

Figura N° 4.1
Primera selección de estaciones pluviométricas (pluvio-ix-sel-1.shp)



4.3 ANÁLISIS DE CORRELACIONES PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA

El análisis anterior, fundamentalmente visual, se complementó y se amplió, en base al establecimiento de una correlación entre las precipitaciones en una estación explicativa, y los caudales transformados en mm de escorrentía, a partir de la precipitación caída en la estación explicativa y la evapotranspiración estimada mediante la fórmula de Turc. De este modo, se puede identificar la estación pluviométrica con la que se produce la mejor correlación.

El análisis realizado se presenta en el archivo 4.2 Correlaciones QMD-PMD del Anexo Digital.

Se puede observar ahí, que, de todas las estaciones pluviométricas analizadas, hay algunas que presentan una muy buena correlación con los caudales que se pretenden explicar a través de ellas. Sin embargo, también se puede observar que hay dos estaciones pluviométricas para las cuales ninguna de las estaciones de precipitación entrega una buena correlación. En estos casos, Quino en Longitudinal y Muco en Puente Muco, aparentemente habría algunos problemas con la medición de caudales, o con las curvas de descarga, o, al tratarse de escurrimientos con régimen de río, puede haber afectaciones de los niveles desde aguas abajo. Lo que se observa, es, que no es posible correlacionar los caudales con las precipitaciones de alguna estación, lo que indica que habrá la misma dificultad cuando se trate de lograr una correlación precipitación-caudal a través del modelo SIMED.

La estación Quino en Longitudinal quedó fuera de análisis por esta razón antes, y por la misma razón se ha decidido dejar fuera también las estación:

- Muco en Puente Muco

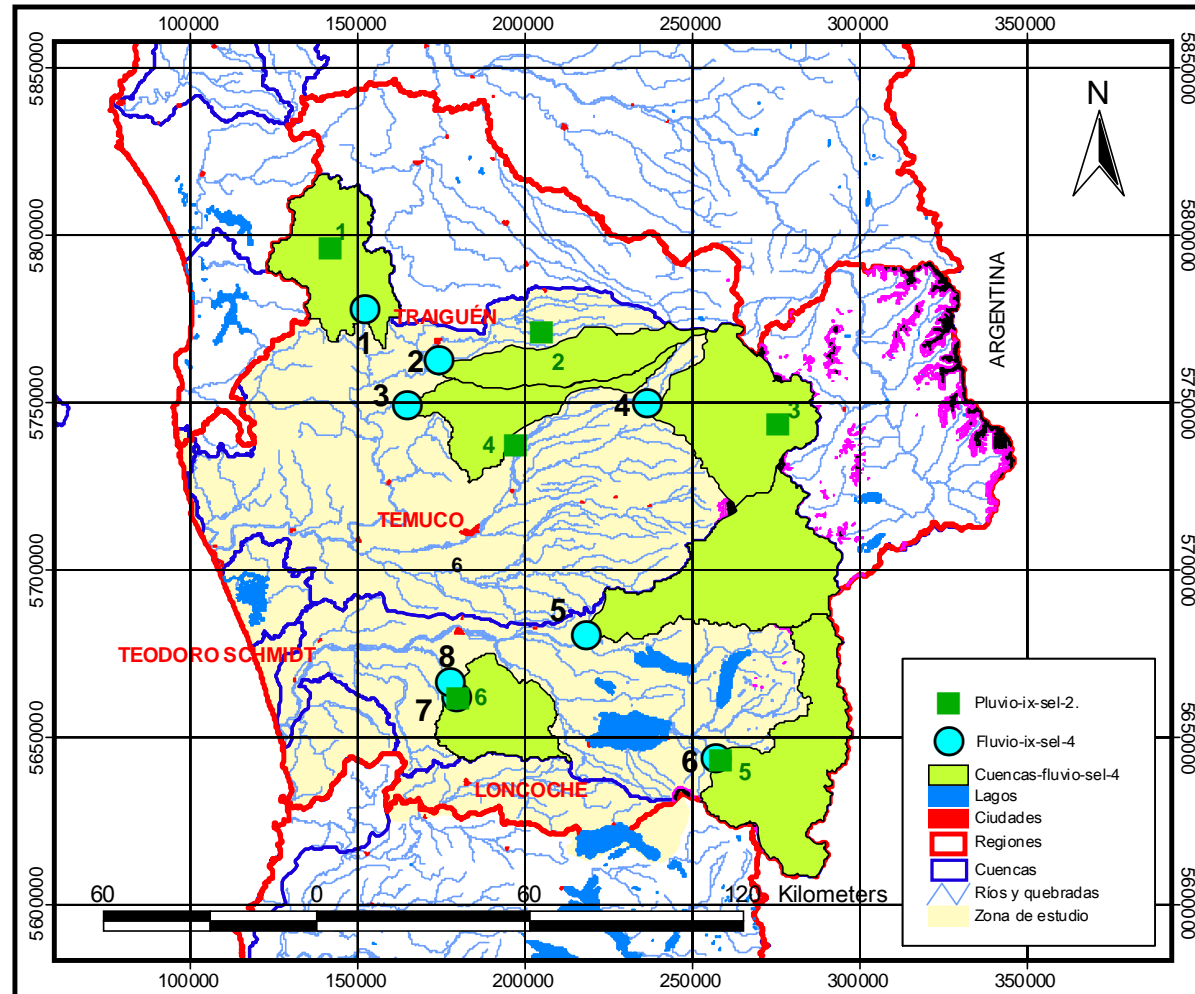
Como resultado de este análisis, se obtuvo la asociación entre estaciones pluviométricas y pluviométricas del Cuadro N° 4.2, que dio lugar a las coberturas fluvio-ix-sel-4 y fluvio-ix-sel-2.shp.

La Figura N° 4.2 muestra la ubicación de las estaciones pluviométricas/gráficas seleccionadas para calibración (fluvio-ix-sel-2.shp), en relación con las estaciones pluviométricas a calibrar (fluvio-ix-sel-4.shp).

Cuadro N° 4.2
Estaciones fluviométricas Sel 4 y pluviométricas asociadas Sel2

Estación fluviométrica seleccionada Sel 4	Estación pluviométrica asociada Sel 2
Rio Lumaco en Lumaco	Tranamán
Estero Quino en Chufquén	Las Mercedes
Río Quillén en Galvarino	Lautaro
Rio Cautín en Rariruca	Malalcahuello
Rio Allipén Los Laureles	Malalcahuello
Rio Trancura antes río Llafenco	Llafenco
Rio Dónguil en Gorbea	Quitratúe
Estero Puyehue en Quitratúe	Quitratúe
Río Dónguil sin Puyehue	Quitratúe

Figura N° 4.2
Ubicación de estaciones pluviométricas (sel-4) y pluviométricas (sel-2) para calibración



4.4 PERÍODOS CONCURRENTES

En el Cuadro N° 4.3 se muestra el periodo de estadísticas completas tanto fluviométricas como pluviométricas, de forma tal que se obtiene, en la última columna, el período concurrente dentro del cual se tomarán los años para calibrar y validar el modelo.

Cuadro N° 4.3
Períodos concurrentes Caudales diarios – Precipitaciones diarias

Estación fluviométrica seleccionada Sel 4	Período caudales	Estación pluviométrica asociada Sel 2	Período precipitaciones	Período Conjunto
Río Lumaco en Lumaco	ene 1983 - dic 2001	Tranamán	ene 1989 - dic 2006	ene 1989 - dic 2001
Estero Quino en Chufquén	ene 2002 - dic 2006	Las Mercedes	ene 1986 - dic 2005	ene 2002 - may 2006
Río Quillén en Galvarino	ene 1980 - dic 2001	Lautaro	ene 1955 - dic 1999	ene 1980 - dic 1999
Río Cautín en Rariruca	ene 1987 - dic 2006	Malalcahuello	ene 1997 - dic 2006	ene 1997 - dic 2006
Río Allipén Los Laureles	ene 1983 - dic 2000	Malalcahuello	ene 1989 - dic 2006	ene 1989 - dic 2000
Río Trancura antes río Llafenco	jul 1974 - abr 2003	Llafenco	ene 1975 - dic 2006	ene 1975 - abr 2003
Río Dónguila en Gorbea	ene 1989 - dic 2001	Quitratúe	ene 1976 - dic 2006	ene 1989 - dic 2001
Estero Puyehue en Quitratúe	ene 1977 - nov 1991 ene 1994 - dic 2001	Quitratúe	ene 1976 - dic 2006	ene 1977 - nov 1991 ene 1994 - dic 2001
Río Dónguila sin Puyehue	ene 1994 - dic 2001	Quitratúe	ene 1976 - dic 2006	ene 1994 - dic 2001

4.5 PATRÓN DE PRECIPITACIONES

Para verificar la calidad de las estadísticas de las estaciones seleccionadas, se recopiló la estadística de precipitaciones anuales de las siguientes estaciones:

- Tranamán
- Lumaco
- Mercedes
- Traiguén
- Galvarino
- Quillen
- Cherquenco
- Rariruca
- Malalcahuello
- Lautaro
- Vilcún
- Cunco
- Quecheregua

- Los Laureles
- Curarrehue
- Llafenco
- Quitratue
- Villarrica

De ellas, se seleccionaron ocho estaciones, con las que se generó el Patrón 1. Estas estaciones fueron las siguientes.

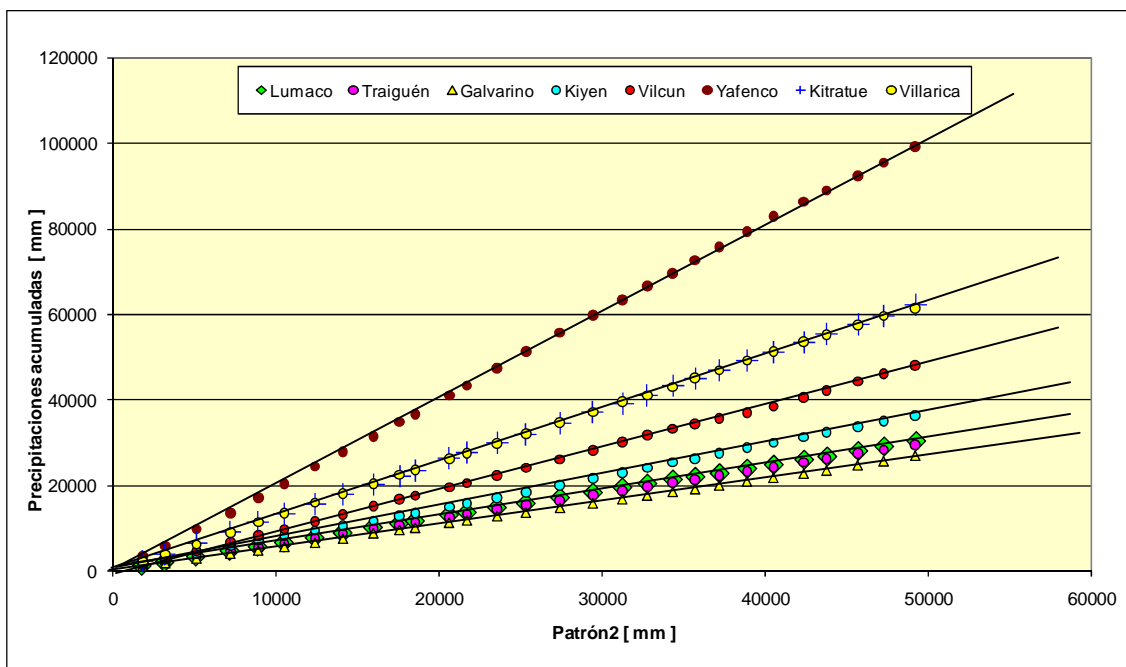
- Lumaco
- Traiguén
- Galvarino
- Quillen
- Vilcún
- Cunco
- Llafenco
- Quitratúe

Comprobando el comportamiento de cada estación versus este patrón, se observó que la estación Cunco presenta desviaciones no menores.

Eliminando la estación Cunco del Patrón 1, y reemplazándola por la estación Villarrica, se generó el Patrón 2, nuevamente con 8 estaciones. Comprobando el comportamiento de cada estación integrante versus este patrón, se obtuvo un comportamiento aceptable para cada una de ellas, por lo que se dio por conforme el Patrón.

Los cálculos se presentan en el archivo 4.3 Patrón Precipitaciones del Anexo Digital. También se efectuó una cobertura SIG con las estaciones del patrón de precipitaciones, *precipitaciones_patrón.shp*, que se entrega en el Anexo Digital **11**. SIG. En la Figura N° 4.3 adjunta, se muestra el resultado del comportamiento de cada una de las estaciones integrantes.

Figura N° 4.3
Estaciones integrantes del Patrón 2



4.6 VERIFICACIÓN DE CONSISTENCIA DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS

A continuación se efectuó el análisis de consistencia de las seis estaciones pluviométricas seleccionadas, contra el patrón. Este análisis se efectuó en el mismo archivo 4.3 Patrón Precipitaciones, hoja Precipitaciones 2, y el gráfico final se presenta en la Figura N° 4.4 adjunta.

Al respecto, se puede observar que todas las estaciones tienen un comportamiento adecuado, salvo Malalcahuello, que presenta un desplazamiento el año 2007. Este comportamiento se individualiza en la Figura N° 4.5. Pero como esta estación será utilizada sólo hasta 2006, no fue necesario corregir la estadística.

Figura 4.4
Verificación de estaciones contra el patrón 2

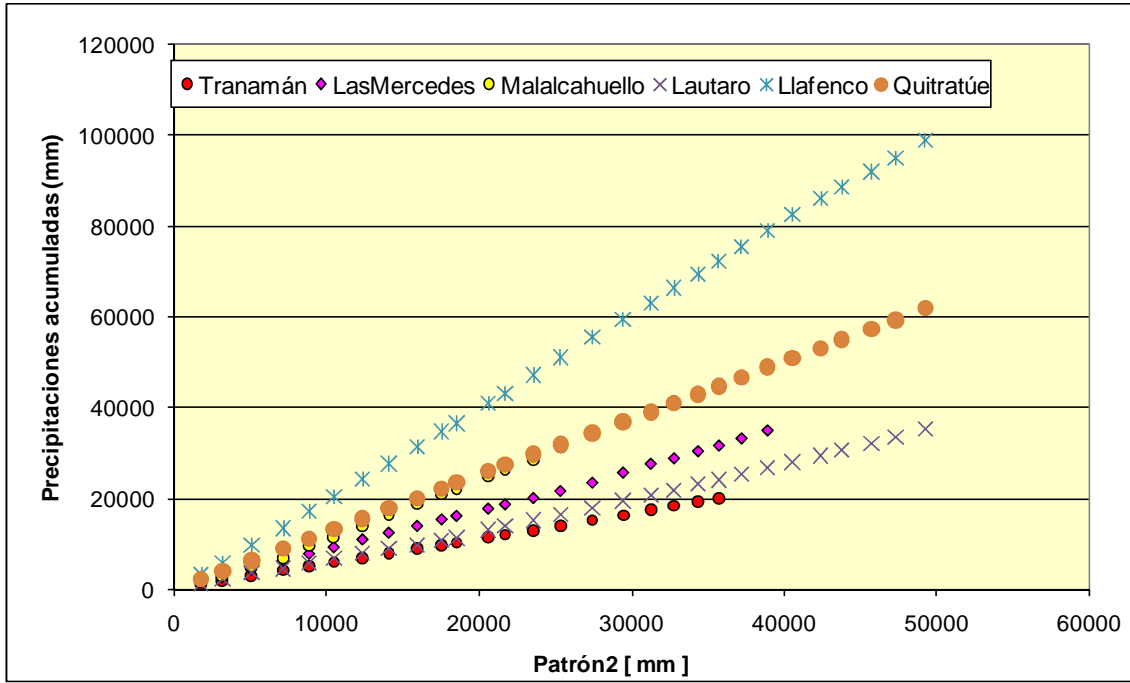
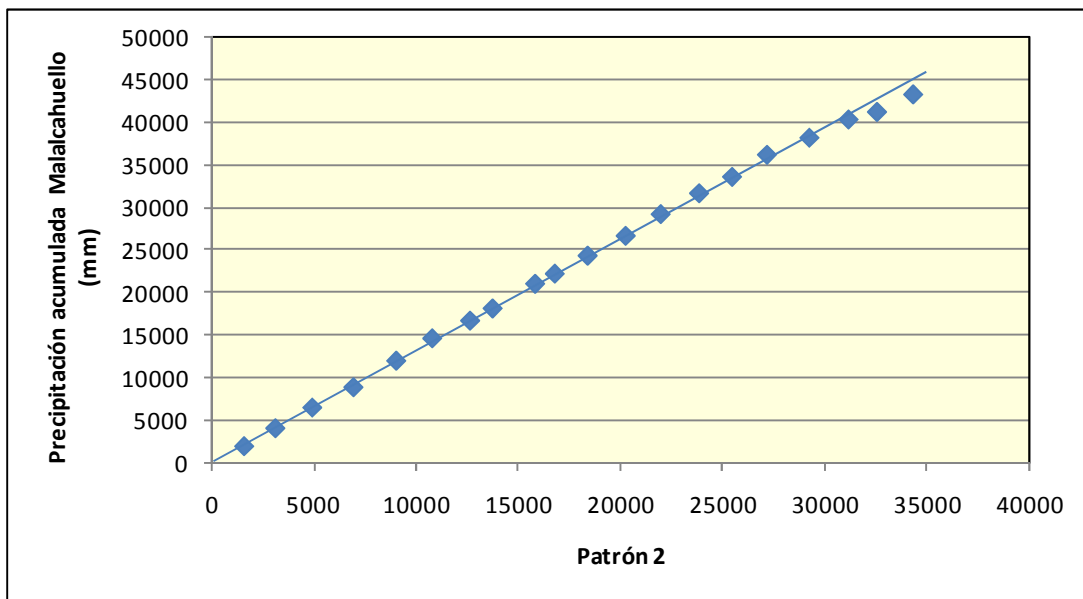


Figura N° 4.5
Malalcahuello versus patrón 2



4.7 CÁLCULO DEL PARÁMETRO A

El parámetro A es el factor que multiplica la precipitación puntual de la estación explicativa asociada, para obtener la precipitación areal sobre la cuenca, que es la que genera el caudal medido.

Hay dos formas de obtener el parámetro A:

- Obteniendo la precipitación media sobre la cuenca a partir del trazado de isohietas o de polígonos de Thiessen, obteniendo la precipitación media en la estación, y calculando el cociente entre ambas.
- También se obtiene el parámetro A al hacer una correlación entre precipitaciones y caudales. Se parte de las precipitaciones en la estación índice y de los caudales en la estación fluviométrica que representa la cuenca completa. A partir de las precipitaciones en la estación índice, y de la relación de Turc, se obtiene la escorrentía correspondiente a las lluvias de la estación índice. El factor A, que multiplica las lluvias de la estación índice, se obtiene por tanteo, y es el que reproduce la escorrentía en la estación de control con una pendiente igual a 1.

El procedimiento de cálculo es el siguiente: Para cada año del registro común de lluvias y caudales, la lluvia de la estación índice se multiplica por el factor A para obtener la lluvia media sobre la cuenca, luego se calcula la escorrentía según Turc usando dicha lluvia media y la temperatura media anual adoptada, que fue de 8°C de acuerdo con las isolíneas del Balance Hídrico. Las dos series de escorrentías anuales, Turc y observada, se comparan entre sí a través de un diagrama XY en Excel, determinando la recta de mejor ajuste que pase por el origen. Se determina la pendiente de la recta y el coeficiente R^2 . Se varía el factor A hasta encontrar el valor que conduce a una recta a 45° como debe ser. Si R^2 no resulta satisfactorio, el caudal de la cuenca no está bien explicado por la precipitación de la estación seleccionada, y hay que buscar otra, o una combinación de estaciones.

Todos los valores y los procedimientos de cálculo, se encuentran en el archivo 4.2 Correlaciones PMD-QMD.

En base a las correlaciones analizadas, se obtienen los siguientes factores de A para las duplas Estación Pluviométrica-Estación Fluviométrica seleccionadas para calibración:

Cuadro N° 4.4
Parámetro A

Estación fluviométrica seleccionada Sel 4	Estación pluviométrica asociada Sel 2	A
Río Lumaco en Lumaco	Tranamán	1.0120
Estero Quino en Chufquén	Las Mercedes	0.9879
Río Quillén en Galvarino	Lautaro	1.0654
Río Cautín en Rariruca	Malalcahuello	1.2322
Río Allipén Los Laureles	Malalcahuello	1.4083
Río Trancura antes río Llafenco	Llafenco	0.8966
Río Dónquil en Gorbea	Quitratúe	0.8870
Estero Puyehue en Quitratúe	Quitratúe	0.9196
Río Dónquil sin Puyehue	Quitratúe	0.8640

4.8 FACTORES DE DISTRIBUCIÓN HORARIA

a) Selección de estaciones pluviográficas

De acuerdo con lo señalado y analizado en el estudio “Levantamiento de parámetros para la modelación hidrológica de cuencas no controladas de la VIIª y VIIIª Región”, los factores de distribución horaria se obtienen de la distribución característica de la lluvia a lo largo del día, y no de la lluvia dentro de una tormenta.

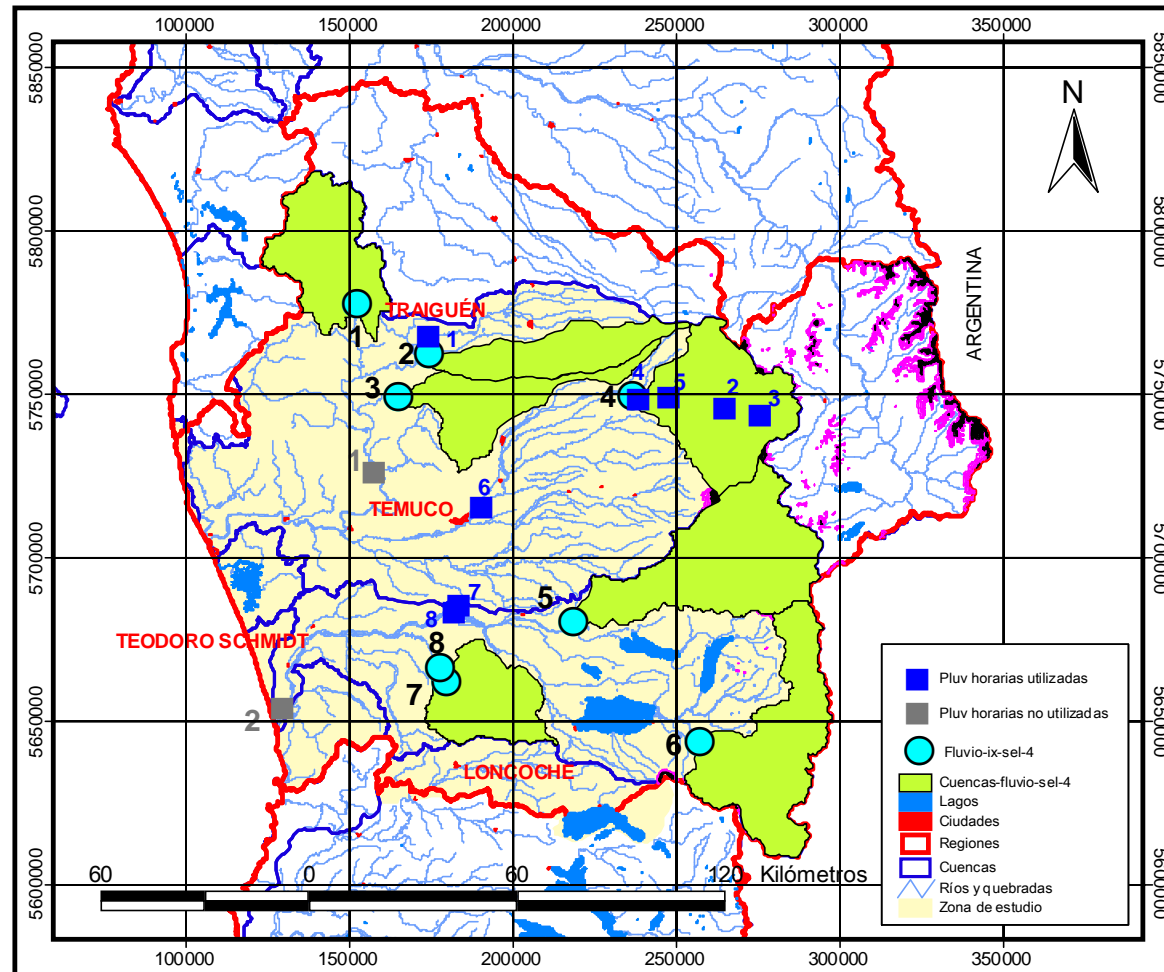
Esta distribución se obtiene de las estaciones pluviográficas, que en la IXª Región son nueve. Su ubicación se muestra en la Figura N° 4.6.

El análisis de estas nueve estaciones dio por resultado que no se usarán las estaciones Río CholChol en CholChol ni Toltén, por encontrarse fuera o lejos de las cuencas de calibración.

De esta forma, las estaciones utilizadas para obtener la distribución horaria en las cuencas de calibración, son las siguientes siete, que se destacan en la misma Figura N° 4.6:

Traiguén
Manzanar
Malalcahuello
Curacautín
Cautín en Rariruca
Cautín en Cajón
Freire Sendos

Figura N° 4.6
Estaciones pluviográficas con estadística horaria para obtención de CD



b) Día representativo de la serie

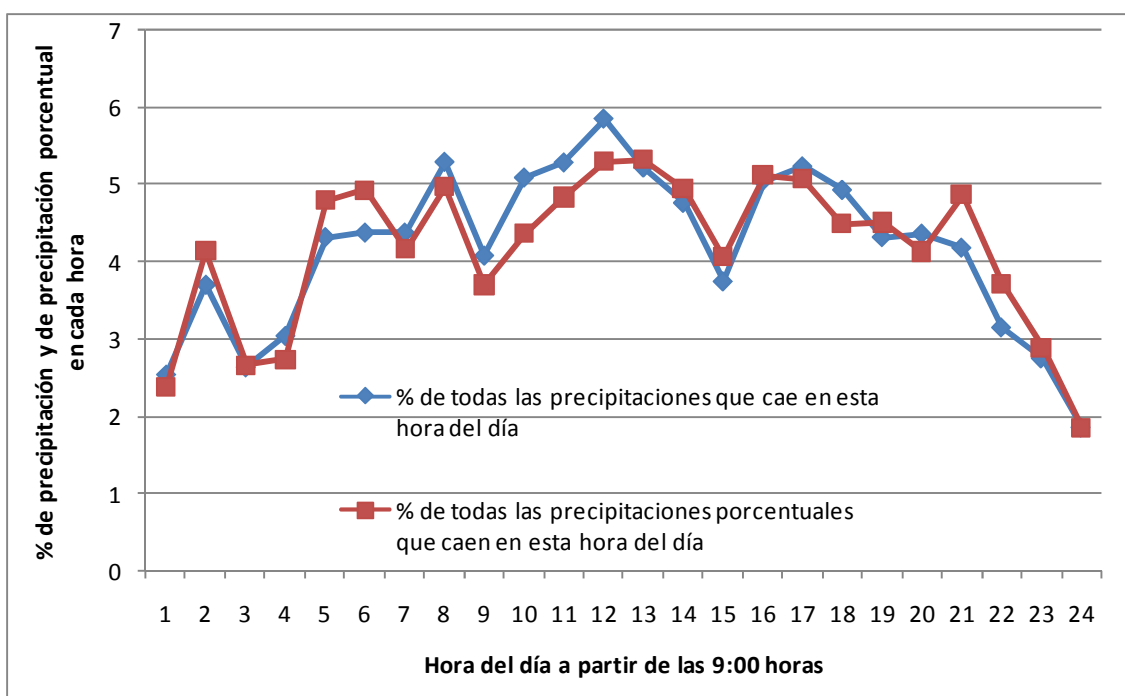
Para distribuir las lluvias diarias de una estación, en lluvia horaria, el modelo SIMED utiliza como primer dato de entrada el monto de la lluvia total diaria. El modelo distingue entre días de lloviznas (entre 0 y 1 mm al día), de lluvias (mayores que 1 hasta 10 mm al día) y de tormentas (sobre 10 mm al día), y les da un tratamiento distinto. Como segundo dato de entrada, el modelo recibe los factores de distribución horarios de la lluvia diaria, para cada uno de los tipos de día de que se trate, o sea, recibe factores de distribución horaria para días de lloviznas, lluvias y tormentas.

El análisis de cada estación se inicia ordenando los días de acuerdo con su precipitación total diaria. De este modo, se juntan todos los días de llovizna, lluvia y tormenta. Para cada tipo de día, el análisis es el mismo.

Para todos los días de un mismo tipo de precipitación, se suman las precipitaciones de cada hora, y esta suma se expresa como porcentaje de la suma total de precipitación caída (mm) en el total de los días analizados. De aquí se obtiene una curva de distribución horaria de mm caídos, como la de la Figura N° 4.7. Esta curva varía según la estación y según el tipo de día.

Paralelamente, se calcula para los mm de cada hora, sus factores de distribución (porcentajes) con respecto a la lluvia total diaria. Se suman los factores de distribución de cada hora del día, y esta suma se expresa como porcentaje de la suma total de factores de distribución sobre el total de días analizados. Se obtiene una curva de distribución horaria de los factores de distribución, que también se presenta en la Figura N° 4.7. Esta curva de distribución de los % caídos en cada hora, resulta similar, aunque no igual, a la curva distribución de los mm caídos en cada hora.

Figura N° 4.7
Distribución horaria del total de lluvias, en valores y en porcentaje
Ejemplo: Tormentas de Freire Sendos



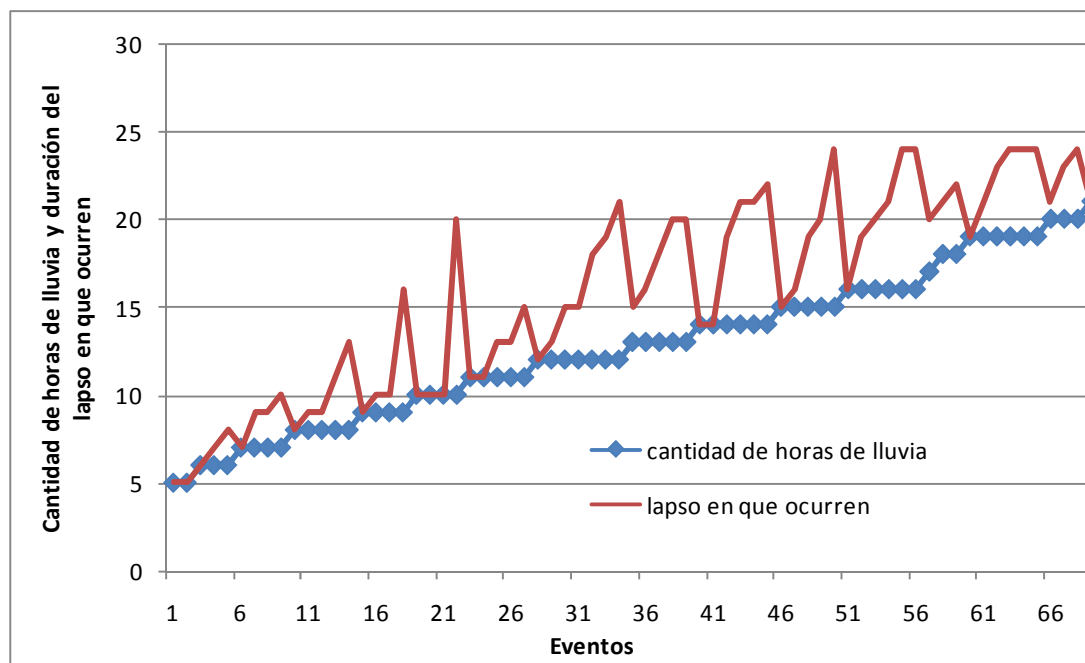
A continuación, en la misma planilla de los factores de distribución porcentual de las precipitaciones a lo largo del día, se registra, para cada día, los siguientes datos:

- la cuenta de horas de lluvia a lo largo del día
- el lapso total dentro del cual ocurren las horas efectivas de lluvias a lo largo del día

Así, por ejemplo, un día cualquiera, puede llover 5 horas, concentradas en 5 horas, o distribuidas en más horas, por ejemplo, 8 horas.

Para obtener un día representativo de la serie de días de un mismo tipo de precipitación, se calcula la mediana de la cantidad de horas de lluvia efectiva, y, para la cantidad resultante de horas, la mediana del lapso en que ellas ocurren. Así, entonces, se obtiene un día representativo para el tipo de lluvia analizado, que puede ser, por ejemplo, un día con 13 horas de precipitación, distribuidas durante un lapso de 18 horas, como se puede observar en la Figura N° 4.8, para las precipitaciones mayores que 10 mm en la estación Freire Sendos.

Figura N° 4.8
Ejemplo: Días de tormenta (pp > 10 mm) en estación Freire Sendos
para selección de un día representativo



La cantidad efectiva de horas de lluvia representativa de cada tipo de día, y el lapso representativo en que dichas lluvias ocurren, se presentan en el Cuadro N° 4.5.

Cuadro N° 4.5
Cantidad de horas de lluvia y lapso en que ocurren

Estación Pluviográfica	Llovizna		Lluvia		Tormenta	
	hasta 1 mm		sobre 1 hasta 10 mm		sobre 10 mm	
	cant horas	lapso	cant horas	lapso	cant horas	lapso
Traiguén	2	2	6	8	14	19
Malalcahuello+ Manz	2	2	6	6	14	16
Curacautín	2	2	7	9	14	20
Cautín en Rariruca	1	1	5	8	13	19
Cautín en Cajón	1	1	5	10	12	19
Freire Sendos	2	2	6	9	13	18

Toda la información de detalle de cada estación, a partir de la cual se obtuvieron estos antecedentes, se encuentra en la planilla 4.8 Prec CD Hor del Anexo Digital.

c) Ubicación de las horas de lluvia dentro del día

Con el dato de ambas medianas, se vuelve a las curvas de distribución horaria (Figura 4.7), específicamente a la curva de los factores de distribución porcentual, y se ubica sobre la curva de distribución la lluvia de las características que indican las medianas, por ejemplo, la lluvia de 5 horas distribuidas en 10 horas, escogiendo el lapso de 10 horas de mayor precipitación. Dentro de ese lapso, se escogen las cinco horas de mayor precipitación, y se asigna a cada una de ellas el valor porcentual que le corresponde, sumando 1 entre las cinco horas seleccionadas.

d) Factores de distribución horarios resultantes

En el Cuadro N° 4.6, se presentan los factores de distribución que se obtienen para cada estación pluviográfica seleccionada, y para cada tipo de día. En dicho cuadro, presentado con colores tipo raster, se aprecia que las lloviznas tienen una clara tendencia de producirse en la mañana, entre las 9 y las 10 horas. Las lluvias tienen una tendencia a producirse de madrugada y mañana. En cuanto a las tormentas, su distribución está mejor distribuida a lo largo del día.

Cuadro N° 4.6
Factores de distribución horarios de la precipitación

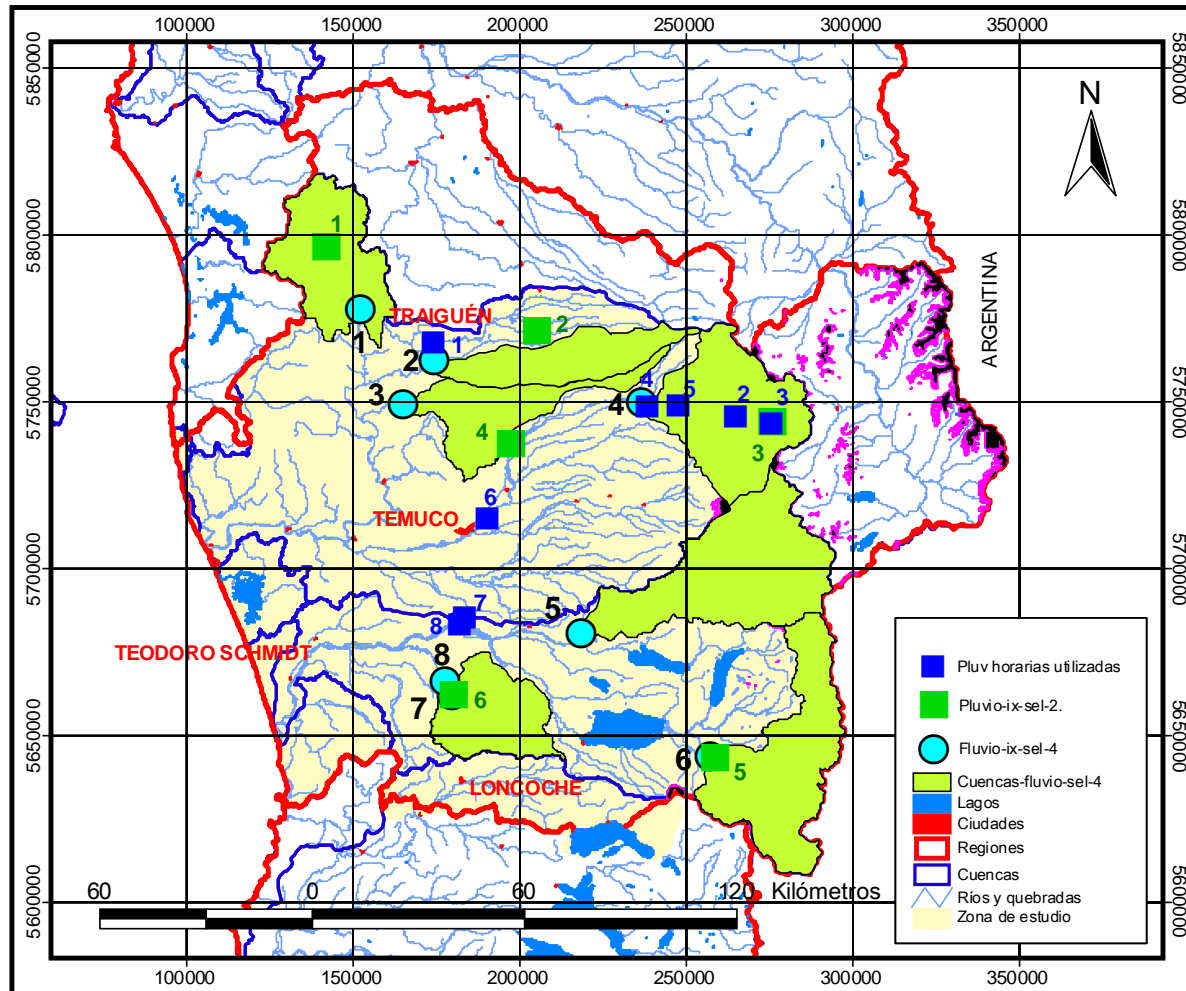
Estación pluviográfica	Tipo precip	Hora																							
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7	8
Traiguén	< 1mm	0.656	0.344	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1 a 10 mm	0.266	0.19	0.134	0.131	0	0	0.134	0.144	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 mm	0	0	0	0	0.06	0	0.062	0.073	0	0.073	0.085	0.07	0.071	0.078	0	0.067	0.062	0	0.064	0.079	0.085	0.071	0	0
Malacahuello+ Manz	< 1mm	0.866	0.134	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1 a 10 mm	0.242	0.253	0.144	0.109	0.13	0.123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 mm	0	0	0.078	0.072	0.07	0.072	0.072	0.07	0.091	0.086	0.069	0.054	0	0	0.059	0.061	0.064	0.08	0	0	0	0	0	0
Curacautín	< 1mm	0.38	0.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1 a 10 mm	0.234	0.212	0.162	0.117	0	0.136	0	0.139	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 mm	0	0	0	0	0	0	0.067	0.071	0.062	0.075	0.061	0.062	0.065	0.052	0	0	0	0.056	0.068	0.077	0.086	0.096	0.102	
Cautín en Rariruca	< 1mm	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1 a 10 mm	0.263	0.187	0.145	0.221	0	0	0.183	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 mm	0	0	0	0	0	0	0.065	0.073	0.065	0	0.076	0.069	0.098	0.094	0.087	0.085	0	0	0.069	0	0	0.073	0.077	0.069
Cautín en Cajón	< 1mm	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1 a 10 mm	0.238	0.203	0	0.191	0	0.188	0	0.18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 mm	0	0	0	0	0	0.083	0	0.094	0.078	0.078	0.078	0.075	0	0.089	0	0	0	0	0.083	0.08	0.092	0.089	0.08	
Freire Sendos	< 1mm	0.805	0.195	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1 a 10 mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.126	0.155	0.152	0.187	0.205	0.175
	10 mm	0	0	0	0	0.076	0.078	0	0.079	0	0	0.076	0.084	0.084	0.078	0	0.081	0.081	0.071	0.071	0.065	0.078	0	0	0

En el Cuadro N° 4.7 se señalan las estaciones de calibración, a las que se aplicarán los factores de distribución obtenidos en las estaciones pluviográficas. La ubicación relativa entre ellas se puede apreciar en la Figura N° 4.9.

Cuadro N° 4.7
Asociación entre estaciones pluviométricas de calibración y estaciones pluviográficas

Estación pluviométrica seleccionada Sel 4	Estación pluviométrica asociada Sel 2	Estación pluviográfica asociada
Río Lumaco en Lumaco	Tranamán	Traiguén
Estero Quino en Chufquén	Las Mercedes	Traiguén
Río Quillén en Galvarino	Lautaro	Cautín en Cajón
Río Cautín en Rariruca	Malalcahuello	Malalcahuello
Río Allipén Los Laureles	Malalcahuello	Malalcahuello
Río Trancura antes río Llafenco	Llafenco	Malalcahuello
Río Dónguila en Gorbea	Quitratúe	Freire
Estero Puyehue en Quitratúe	Quitratúe	Freire
Río Dónguila sin Puyehue	Quitratúe	Freire

Figura N° 4.9
Ubicación estaciones pluviométricas y pluviográficas asociadas



CAPÍTULO 5 IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES EVAPORIMÉTRICAS

5.1 ANÁLISIS DE PERÍODOS DE COBERTURA Y RELLENO

Las estaciones evaporimétricas presentes en las cuencas de estudio son en total 11, y se presentan en la cobertura llamada evap-ix-todas.shp, de la Figura 5.1. El análisis de los períodos que cubren las estadísticas de estas estaciones, se presenta en el Cuadro N° 5.1 adjunto.

En dicho cuadro, se señalan los años completos con una c, los años con 11 meses completos con una b, los años con 10 meses completos con una a, y los demás años con la cantidad de meses completos en cifras.

Según se puede apreciar en dicho cuadro, las estadísticas de evaporación en esta región son pocas e incompletas. Lo señalado muestra que en esta región no es posible hacer depender la cantidad de estaciones de calibración, ni la longitud de los períodos de calibración, de la existencia de estadísticas concurrentes de evaporación, porque no las hay.

Por esta razón, se consideró lo más razonable, rellenar la estadística diaria de tres estaciones, ubicadas en las cuencas de calibración, de modo de contar con estadísticas de evaporación diaria en períodos concurrentes con los de las estaciones fluviométricas seleccionadas.

Las estaciones de evaporación más completas, que se escogieron para ser rellenadas, fueron las siguientes.

- Traiguén
- Manzanar-Malalcahuello
- Pucón

El relleno se efectuó de acuerdo con los siguientes criterios:

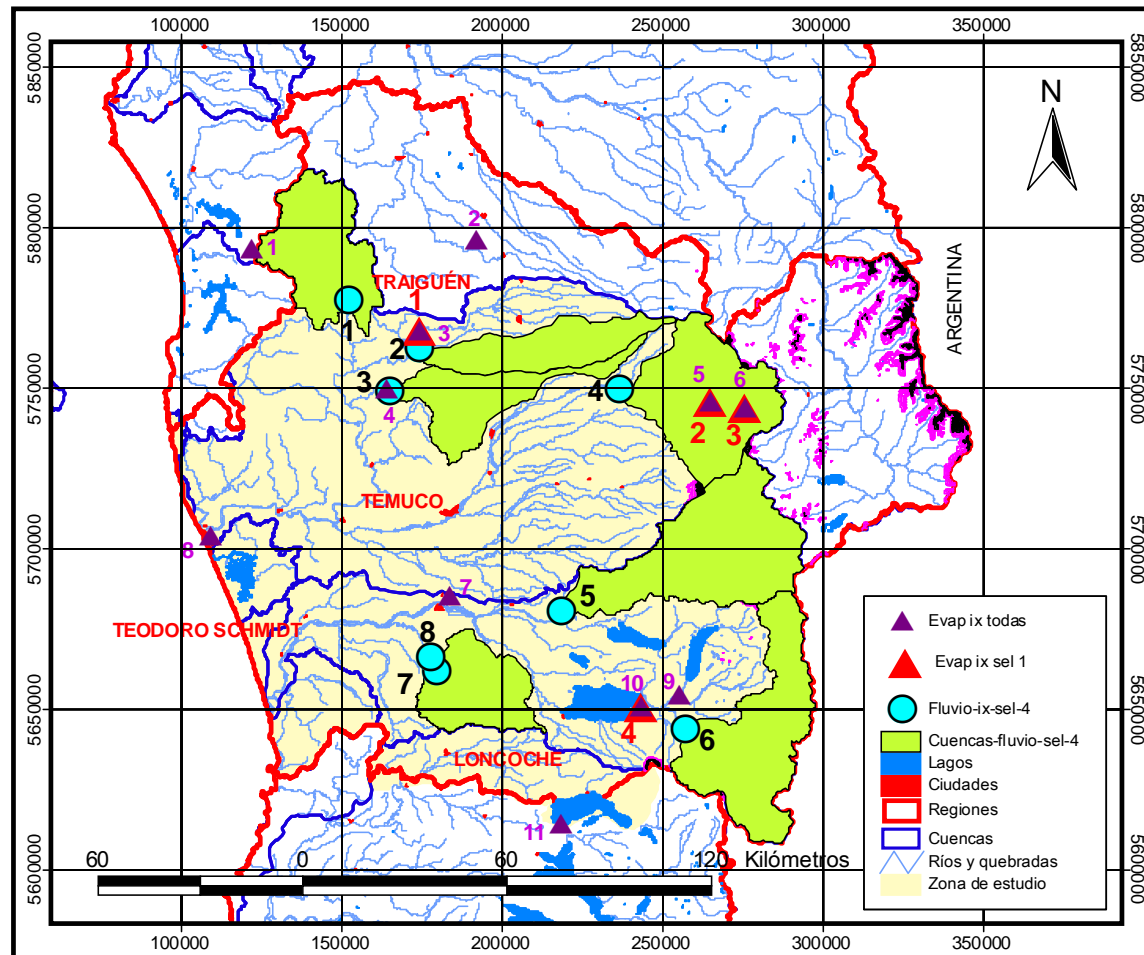
- Se ingresó un valor cero en los días sin dato y con precipitación.
- Se graficaron las series mensuales completas para detectar errores en los meses incompletos o inexistentes.
- De la evolución de las series, y en base a cada tipo de año observado en dicha serie, se rellenaron los datos mensuales faltantes y se corrigieron los datos mensuales de meses incompletos.
- En base al dato mensual corregido, se rellenaron los datos diarios de todo el mes, o los datos faltantes en el caso de meses incompletos.

Cuadro N° 5.1
Análisis de estadísticas de evaporación

Nombre estación evaporimétrica	1970									1980									1990									2000																																																
	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																						
ERCILLA VIDA NUEVA																																							7	b	b	9	9	a	a	b	b	7																												
FREIRE SENDOS										1	3	9	b	b	b	4																																																												
LAGO CALAFQUEN															5	4	2	a	b	5	1	1		7	6	a	b	b	c	c	c	c	c	c	c	b	3																																							
PUCON														4	7	4	8	b	b	7	7	b	9	b	c	7	7	a	a	a	b	9	7	8	5	a																																								
OJOS DE CABURGA																																								5	8	3	5																																	
CONTULMO																	1	9	9	3	3	8	7	8	b	c	b	c	c	b	c	c	c	c	c																																									
TRAIGUEN										2	2	1	1	4	3	2	1	c	a	c	9	a	3	8	b	c	a	a	c	8	8	c	c	c	b	a	9																																							
GALVARINO										2	2	1	4	3	2	1	3																																																											
MANZANAR	2	2	1			1	7	2	1					1		1																																																												
MALALCAHUELLO																																								2	4	3	5	8	9	8	8	9	a	5	5	6	4	4	8	5	6																			
PUERTO SAAVEDRA										1	2	2	2	2	3	3	1	4	b	9	b																						1	1	2	3	3	a	9	b	c	c	c	c	8																					

 estaciones rellenas

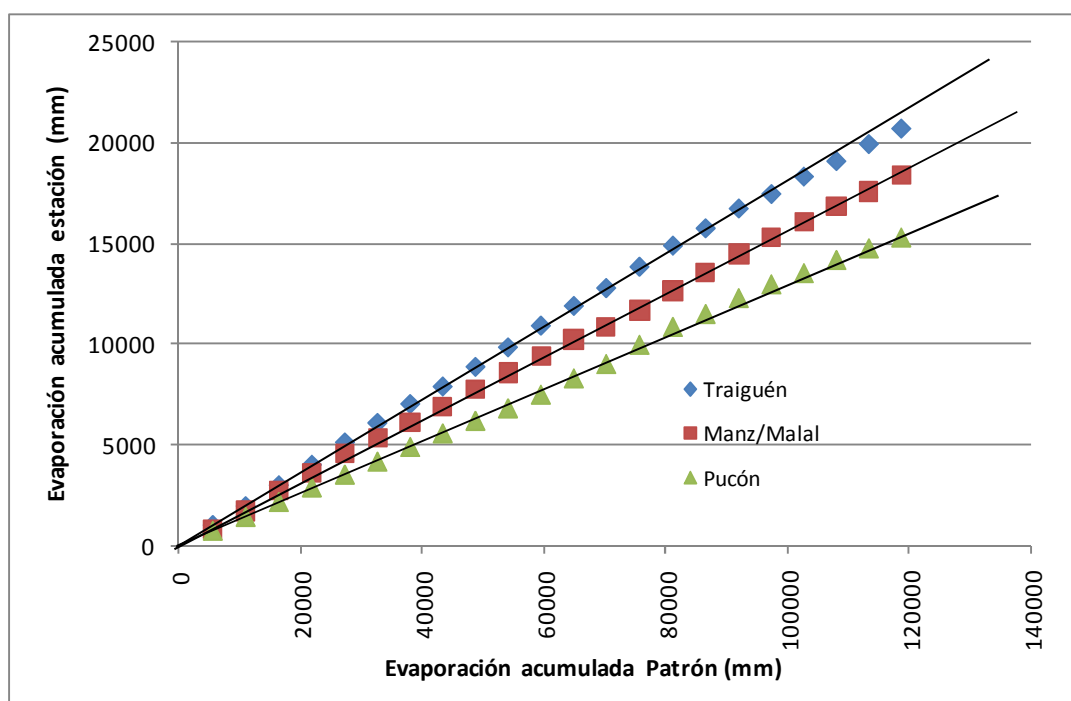
Figura N° 5.1
Ubicación estaciones evaporimétricas de la región



5.2 PATRÓN DE EVAPORACIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTADÍSTICAS

Con las tres estaciones rellenas se estableció un patrón, y se verificó cada una de ellas contra este patrón. El comportamiento resultante es el que se observa en la Figura N° 5.2, en que se aprecia que de las estaciones seleccionadas, Pucón y Manzanar/Malalcahuello tienen un comportamiento lineal, mientras que Traiguén presenta una desangulación los últimos 5 años. Por tratarse de un cambio sistemático, se optó por corregir la estadística, lo que se logró multiplicando los valores correspondientes por 1.2.

Figura N° 5.2
Patrón de evaporación



El patrón de evaporación se entrega en el archivo 5.1 Patrón Evaporación.xls, del Anexo Digital. La cobertura SIG correspondiente es la misma evap-ix-sel-1.shp, que también se llama evaporación_patrón.shp.

Las estadísticas rellenas y corregidas para el período 1980-2006, o 1985-2006, según el caso, se entregan en la carpeta 5.2 Evap diaria definitiva del Anexo Digital. Las estaciones evaporimétricas rellenas se presentan en la cobertura evap-ix-sel-1.shp, de la misma Figura 5.1 adjunta.

5.3 CÁLCULO DEL PARÁMETRO B

El parámetro B se obtiene como el cociente entre la evaporación areal de la cuenca de calibración, y la evaporación puntual en la estación evaporimétrica asociada.

a) Asociación de estaciones de evaporación con cuencas de calibración

De acuerdo con lo que se observa en la Figura N° 5.1, con fines de calibración se ha procedido a asociar a cada cuenca una estación evaporimétrica. La asociación realizada es la siguiente:

Cuadro N° 5.2
Asociación entre cuencas de calibración y estaciones evaporimétricas

Estación fluviométrica seleccionada Sel 4	Estación evaporimétrica asociada
Río Lumaco en Lumaco	Traiguén
Estero Quino en Chufquén	Traiguén
Río Quillén en Galvarino	Traiguén
Río Cautín en Rariruca	Manzanar/Malalcahuello
Río Allipén Los Laureles	Manzanar/Malalcahuello
Río Trancura antes río Llafenco	Manzanar/Malalcahuello
Río Dónguila en Gorbea	Pucón
Estero Puyehue en Quitratúe	Pucón
Río Dónguila sin Puyehue	Pucón

b) Cálculo de la evaporación media anual puntual, media areal y parámetro B

Para cada una de las 3 estadísticas rellenas y verificadas, asociadas a las 9 cuencas de calibración, se obtuvo la evaporación media puntual para el período que pudo ser obtenido en cada caso.

El dato de evapotranspiración media areal se obtuvo en base a la información de las curvas isoevapotranspiración del Balance Hídrico, disponible en forma de una cobertura Arcview (evapotranspiración.shp), y su intersección con las cuencas de calibración.

Todos los valores calculados se encuentran resumidos en el Cuadro N° 5.3 adjunto.

Cuadro N° 5.3
Obtención del parámetro B

Estación fluviométrica seleccionada Sel 4	Estación evaporimétrica asociada	Evaporación promedio estación (mm)	Evapotranspiración promedio cuenca (mm)	B
Río Lumaco en Lumaco	Traiguén	978	535	0.547
Estero Quino en Chufquén	Traiguén	978	590	0.603
Río Quillén en Galvarino	Traiguén	978	600	0.614
Río Cautín en Rariruca	Manz/Malalcahuello	837	522	0.624
Río Allipén Los Laureles	Manz/Malalcahuello	837	521	0.622
Río Trancura antes río Llafenco	Manz/Malalcahuello	837	487	0.582
Río Dónguila en Gorbea	Pucón	694	600	0.865
Estero Puyehue en Quitratúe	Pucón	694	600	0.865
Río Dónguila sin Puyehue	Pucón	694	600	0.865

5.4 FACTORES DE DISTRIBUCIÓN HORARIOS

Para determinar los factores de distribución horaria de la evaporación diaria, se realizó una búsqueda de fuentes de datos, que se presenta en el capítulo 2.4 del estudio anterior, “Levantamiento de parámetros para la modelación hidrológica de cuencas no controladas en las regiones VII y VIII”. La búsqueda dio por resultado, que hay datos de evaporación horaria para California, que son los que se han usado tradicionalmente para alimentar el modelo Sacramento, y en España, Murcia, donde en la Universidad de Cartagena se han desarrollado mediciones horarias de la evaporación para lograr su modelamiento en función de diversos parámetros meteorológicos.

En Chile no hay mediciones de evaporación horaria. Consultas específicas a la Universidad de Chile y de Talca, dieron resultados negativos. Por esta razón, aquí se exponen los factores resultantes de las investigaciones en el extranjero, con la recomendación de iniciar este tipo de medición en algunas regiones del país.

En el Cuadro N° 5.4 se presentan los valores de distribución horaria de California y Murcia. En Murcia se obtuvieron valores para cada estación del año. En el mismo cuadro se presenta la distribución propuesta, que consiste en una combinación lineal de las distribuciones de California y del verano (agosto) de Murcia, ésta última desplazada en tres horas hacia atrás, para adecuarse a las horas de luz del verano chileno. Se seleccionó la distribución de verano de Murcia por ser la más parecida a la de California, y por haber dado ésta buenos resultados en estudios anteriores.

En la Figura N° 5.3 se observan todas las distribuciones recopiladas, y en la Figura N° 5.4 está la distribución propuesta para el presente estudio, comparada con la distribución de California.

Figura N° 5.3
Distribución horaria de la evaporación. FD recopilados

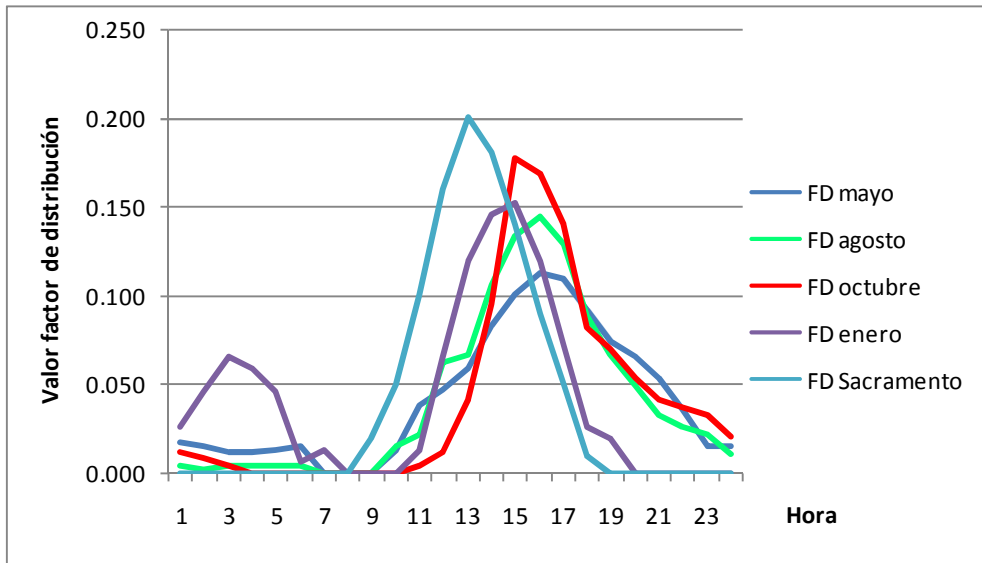
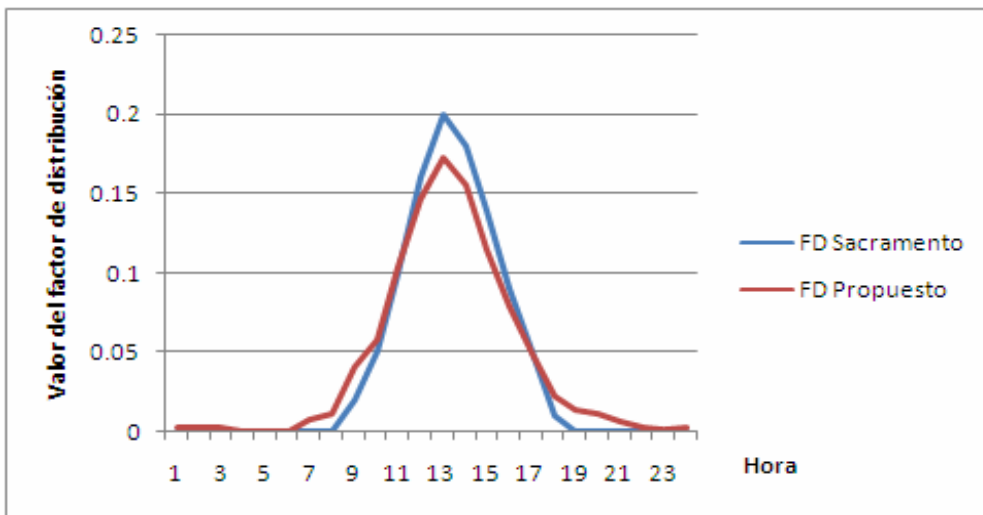


Figura N° 5.4
Factores de distribución horaria propuestos



Cuadro N° 5.4
Factores de distribución horarios para evaporación, recopilados y propuestos

Hora	España				California	Chile
	FD mayo	FD agosto	FD octubre	FD enero	FD Sacramento	FD Propuesto
1	0.018	0.004	0.012	0.026	0	0.002
2	0.015	0.002	0.008	0.046	0	0.002
3	0.012	0.004	0.004	0.066	0	0.002
4	0.012	0.004	0.000	0.060	0	0.000
5	0.013	0.004	0.000	0.046	0	0.000
6	0.015	0.004	0.000	0.007	0	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.013	0	0.008
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.011
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.02	0.041
10	0.013	0.016	0.000	0.000	0.05	0.058
11	0.039	0.022	0.004	0.013	0.1	0.103
12	0.047	0.062	0.012	0.066	0.16	0.147
13	0.059	0.067	0.041	0.119	0.2	0.172
14	0.083	0.106	0.095	0.146	0.18	0.154
15	0.101	0.133	0.177	0.152	0.14	0.114
16	0.113	0.144	0.169	0.119	0.09	0.078
17	0.110	0.129	0.140	0.073	0.05	0.049
18	0.092	0.089	0.082	0.026	0.01	0.022
19	0.074	0.067	0.070	0.020	0	0.013
20	0.065	0.049	0.053	0.000	0	0.011
21	0.053	0.033	0.041	0.000	0	0.006
22	0.036	0.027	0.037	0.000	0	0.002
23	0.015	0.022	0.033	0.000	0	0.001
24	0.015	0.011	0.021	0.000	0	0.002

CAPÍTULO 6**HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO**

El modelo SIMED requiere para su funcionamiento, como dato de entrada, las ordenadas del hidrograma unitario correspondiente a la cuenca, generado por una precipitación de 1 mm y de 1 hora de duración.

Por ello fue necesario obtener, para cada una de las cuencas de calibración, su hidrograma unitario. Se trabajó con los hidrogramas unitarios sintéticos (HUS).

6.1 PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS

La determinación del HUS de una cuenca se basa en sus parámetros geomorfológicos. Los parámetros requeridos son los siguientes:

- A = Área de la cuenca
- Cg = Ubicación del centroide de la cuenca
- Hmáx = Cota máxima
- Hg = Cota del centroide
- Hsal = Cota de salida
- L = Longitud del cauce principal en km
- Lg = Longitud del cauce desde el centroide de la cuenca hasta la salida
- Lo = Longitud de la primera curva de nivel dentro de la cuenca
- Ln = Longitud de la última curva de nivel dentro de la cuenca
- Sum = Sumatoria de la longitud de las curvas de nivel, incluyendo la mitad de la más baja y la más alta de la cuenca
- h = Desnivel entre curvas de nivel
- S = Pendiente de Mociornita:

$$S = \frac{h \left(\frac{L_o}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} L_i + \frac{L_n}{2} \right)}{A}$$

Todos los parámetros requeridos se obtuvieron de las coberturas en Arcview facilitadas por la DGA. Dichos parámetros se presentan en el Cuadro N° 6.1 a continuación.

Cuadro N° 6.1
Parámetros geomorfológicos

Nombre estación / cuenca	Area m ²	Hmax msnm	Hg msnm	Hsal msnm	L km	Lg km	h m	Lo m	Ln m	Suma2Li m	S
RIO LUMACO EN LUMACO	1020758331	1400	75	75	68.5	27.0	25	279.000	0.490	9157.190	0.00023
RIO CAUTIN EN RARI-RUCA	1296668824	3050	725	425	65.3	30.3	50	15.780	0.130	7547.620	0.00029
ESTERO QUINO EN CHUFQUEN	708062571	1650	380	200	97.3	52.5	50	2.000	0.340	821.560	0.00006
RIO QUILLEN EN GALVARINO	713196085	950	240	40	104.2	32.1	50	3.820	1.790	1006.640	0.00007
RIO ALLIPEN EN LOS LAURELES	1635458600	3100	440	225	102.6	63.7	50	21.420	0.210	10267.190	0.00031
RIO TRANCURA ANTES RIO LLAFEN	1406931270	3700	400	400	85.6	28.4	50	139.750	0.160	10479.320	0.00037
RIO PUYEHUE EN QUITRATUE	148852050	650	125	100	22.8	11.9	25	63.980	0.420	1087.590	0.00019
RIO DONGUIL EN GORBEA	737155800	750	350	100	63.1	26.9	25	215.440	0.260	3147.970	0.00011
Río DÓNGUIL SIN PUYEHUE	588303749	750	175	100	63.1	24.9	25	215.440	0.260	2060.380	0.00009

Suma 2 Li se refiere a la suma de todas las curvas de nivel, incluidas la primera y última

6.2 PARÁMETROS DEL HUS

Para el cálculo de los parámetros propios del HUS se usaron las relaciones aplicables a cuencas chilenas ubicadas en la zona sur, con áreas comprendidas entre 80 y 4500 km², según los hidrogramas unitarios sintéticos de Arteaga y Benítez:

Zona II: Itata-Chamiza:

$$t_p = 1.315 * \left(\frac{L * L_g}{\sqrt{S}} \right)^{0.241}$$

$$q_p = 171.3 * t_p^{-0.829}$$

$$Tb = 5.45 * t_p^{1.104} \text{ [hrs]}$$

Donde:

t_p = Tiempo de retraso de la cuenca o tiempo al peak en horas, es el lapso transcurrido entre el centroide de la lluvia y el tiempo para el cual se produce el máximo del hidrograma

q_p = Caudal al peak por km² y por mm de agua caída (l/s/km²/mm)

Tb = Tiempo base del hidrograma (horas)

Las relaciones son válidas para lluvias de duración igual a 0.18 veces el tiempo de retraso de la cuenca, es decir, lluvias de duración igual a

$$t_u = \frac{t_p}{5.5} \text{ [hrs]}$$

Para lluvias de duración diferente a 1 hora, se obtiene el hidrograma de crecidas para lluvias de 1 hora de duración, a partir de un ajuste de t_u y del recálculo de los demás parámetros, t_p , T_b y q_p . En el hidrograma de Gray, se ajusta el parámetro γ hasta obtener el valor recalculado de q_p .

En el Cuadro N° 6.2 se presentan los valores adoptados para los parámetros utilizados en la determinación del hidrograma unitario sintético de cada cuenca. Q_p corresponde al caudal al peak por mm de agua caída, y t_s es el tiempo de subida del hidrograma. El detalle de los cálculos, así como el hidrograma unitario completo para la precipitación de

1 hora y de 1 mm, se encuentra para cada cuenca en el archivo 6.1 HUS del Anexo Digital.

Cuadro N° 6.2
Parámetros para el HUS

Estación	tp	qp	Qp	Tb	tu	ts
Cautín en RR	21.84	13.29	17.23	49.28	3.97	23.83
Allipén en LL	28.87	10.54	17.24	60.14	5.25	31.50
Quino en Ch	33.35	9.36	6.63	66.66	6.06	36.38
Lumaco en L.	22.14	13.14	13.41	49.76	4.03	24.15
Quillen en L.	29.41	10.38	7.41	60.94	5.35	32.08
Trancura antes Ll.	22.28	13.07	18.39	49.98	4.05	24.30
Dónguila en G.	23.66	12.43	9.17	52.18	4.30	25.82
Puyehue en Q.	14.25	18.93	2.82	36.33	2.59	15.55

Es necesario hacer notar dos aspectos relacionados con la aplicación del HUS en la modelación de las cuencas:

En primer lugar, todas las cuencas seleccionadas se encuentran en el rango de aplicación del concepto del hidrograma unitario sintético. De acuerdo con los estudios realizados en Chile, el concepto del hidrograma unitario sintético tiene validez en cuencas con áreas entre 10 y 4500 km², sin lagos o embalses que pudieran alterar significativamente la onda de crecida, y con un solo cauce principal. Las cuencas seleccionadas cumplen con estas condiciones.

En segundo lugar, por lo general, los tiempos unitarios de las cuencas no resultan igual a 1 hora. En esos casos, se ha impuesto un tiempo unitario de 1 hora, y se han recalculado todos los demás parámetros del HUS. Este proceder, según la literatura, sería válido para tiempos unitarios no muy diferentes del tiempo unitario de la cuenca. Sin embargo, se pudo constatar que entrega resultados no significativamente diferentes que los que se obtienen del desarrollo del hidrograma en S, debido a lo cual se prefirió aplicar dicho método, en vista de su sencillez.

6.3 ORDENADAS DEL HUS

Para generar las ordenadas del hidrograma unitario a partir de los parámetros calculados, se han utilizado los coeficientes de distribución de Gray.

Con ellos se obtienen los hidrogramas unitarios t, q (tiempo versus caudal unitario específico, $l/s/km^2/mm$) que se entregan en el archivo 6.1 HUS del Anexo Digital.

Como la mayoría de los hidrogramas se han adaptado a partir de tiempos de lluvia diferentes del tiempo unitario, es necesario verificar que el área bajo la curva (q, t) siga correspondiendo al volumen unitario. Para ello se efectuó la integral sobre esta área, se calculó el volumen bajo la curva, y se corrigieron las ordenadas q en forma iterativa.

Por último, se tiene que $Q(t) = q(t) * A$ corresponde al caudal unitario generado en el área total de cada cuenca ($m^3/s/mm$). Los datos de Q son los que el modelo SIMED requiere para operar. Para cada cuenca, estos datos se entregan también en el archivo 6.1 HUS, hoja uh_dat , con el gráfico correspondiente al hidrograma resultante.

CAPÍTULO 7 OBTENCIÓN DEL PARÁMETRO K DE EMBALSE

El parámetro K permite describir el comportamiento de un suelo concebido como embalse lineal, y corresponde a la constante de proporcionalidad que liga el caudal entregado con el volumen remanente:

$$V = K * Q \quad (7.1)$$

De acuerdo con la teoría desarrollada en los informes SIT 91, 93 y 110, este caudal disminuye en forma exponencial con el tiempo, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\ln(Q(t) - P_p) + \frac{t}{K} = \ln(Q(t_0) - P_p) + \frac{t_0}{K} \quad (7.2)$$

Los valores iniciales del parámetro K se obtuvieron a partir del análisis de las regresiones de caudal en los períodos de estiaje, donde se asume que la percolación profunda se anula. Con ello se simplifica la ecuación 7.2 y se obtiene K de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{t - t_0}{\ln\left(\frac{Q_0 - P_p}{Qt - P_p}\right)} \quad (7.3)$$

donde:

- Q_t el caudal observado en el río en un instante t dado
- Q_0 el caudal observado en el río en el instante $t=0$
- P_p la percolación profunda

Por ello se identificaron y se analizaron los períodos más secos de cada estación, esto es, períodos en que las estadísticas de caudales no estuvieran influidas por precipitaciones, y se pueda asumir que la percolación profunda es igual a cero. Como la región es más bien húmeda, y también hay lluvias en verano, para cada estación se encontraron sólo dos o tres períodos estivales que cumplieran con esta condición.

Cuando la percolación profunda se anula, se puede obtener el valor de K graficando los valores Q y t en un gráfico semilogarítmico. En tales períodos, los puntos conforman una recta, cuya pendiente corresponde al valor $-1/K$, de donde se obtiene directamente el valor de K.

Los períodos analizados de cada estación y los resultados de K para cada período se presentan en el archivo 7.1 Cálculo K del Anexo Digital. En el Cuadro N° 7.1 se resumen los resultados.

Es necesario tener presente que estos valores de K son valores iniciales para la calibración.

Cuadro N° 7.1
Valores iniciales de K

Estación fluviométrica / Cuenca	K1	K2	K3	K4	Valor adoptado
Trancura antes Llafenco	3011	2222			2800
Allipén en Los Laureles	4203	4062			4100
Cautín en Rari Ruca	6283	3646	4098	2807	4000
Puyehue en Quitratúe	814	604			700
Dónguila en Gorbea	854	799	819		820
Lumaco en Lumaco	953	1284			1100
Quillen en Galvarino	582	834	1320		700
Quino en Chufquén	660	395	415	582	600
Dónguila sin Puyehue					850

CAPÍTULO 8**PARÁMETROS INICIALES DE SUELO**

Los parámetros de suelo que necesita el modelo SIMED para su calibración, son los siguientes:

- a) Humedad correspondiente a la capacidad de campo, S_{cc}
- b) Humedad correspondiente al punto de marchitez permanente, S_{min}
- c) Grado de humedad crítico, S_{crit}
- d) Porosidad efectiva del suelo, Por_{Ef}
- e) Altura de agua capilar o de ascenso capilar, H_{cap}
- f) Profundidad del suelo, H_{suelo}

Los cinco primeros parámetros están interrelacionados o asociados, y corresponden al tipo de suelo representado. El último, H_{suelo} , es independiente de los anteriores. Para la calibración, es conveniente tomar valores iniciales de H_{suelo} de entre 1 y 2 m (según experiencia del Ing. modelador Sr. Pablo Isensee).

En cuanto a los cinco parámetros interrelacionados, de acuerdo con la experiencia obtenida en el estudio anterior, lo más conveniente es generarlos directamente a partir de las características de textura y granulometría del suelo.

Procediendo de esta forma, si bien los parámetros iniciales no reproducen de inmediato las estadísticas observadas de cada estación, al menos pueden ser calibrados manteniéndolos dentro de los rangos físicos asumidos para ellos a partir del tipo de suelo, y sin modificar sustancialmente los parámetros A ni B, que también tienen un sentido físico.

La base para la estimación de parámetros iniciales de suelo la constituyen las coberturas de textura y de granulometría adquiridas en CIREN. A partir de ellas, en las Figuras N° 8.1 y 8.2 se observan las características granulométricas y de textura de cada cuenca de calibración, las que se resumen en el Cuadro N° 8.1. En el Cuadro N° 8.2 se presenta el tipo de suelo que se asoció a cada una de las cuencas.

La asociación del tipo de suelo a cada cuenca, a partir de su textura y su granulometría, se obtuvo en base a la literatura específica, y en base a la experiencia del profesor Rubén León.

Figura N° 8.1
Textura de suelos en cuencas de calibración

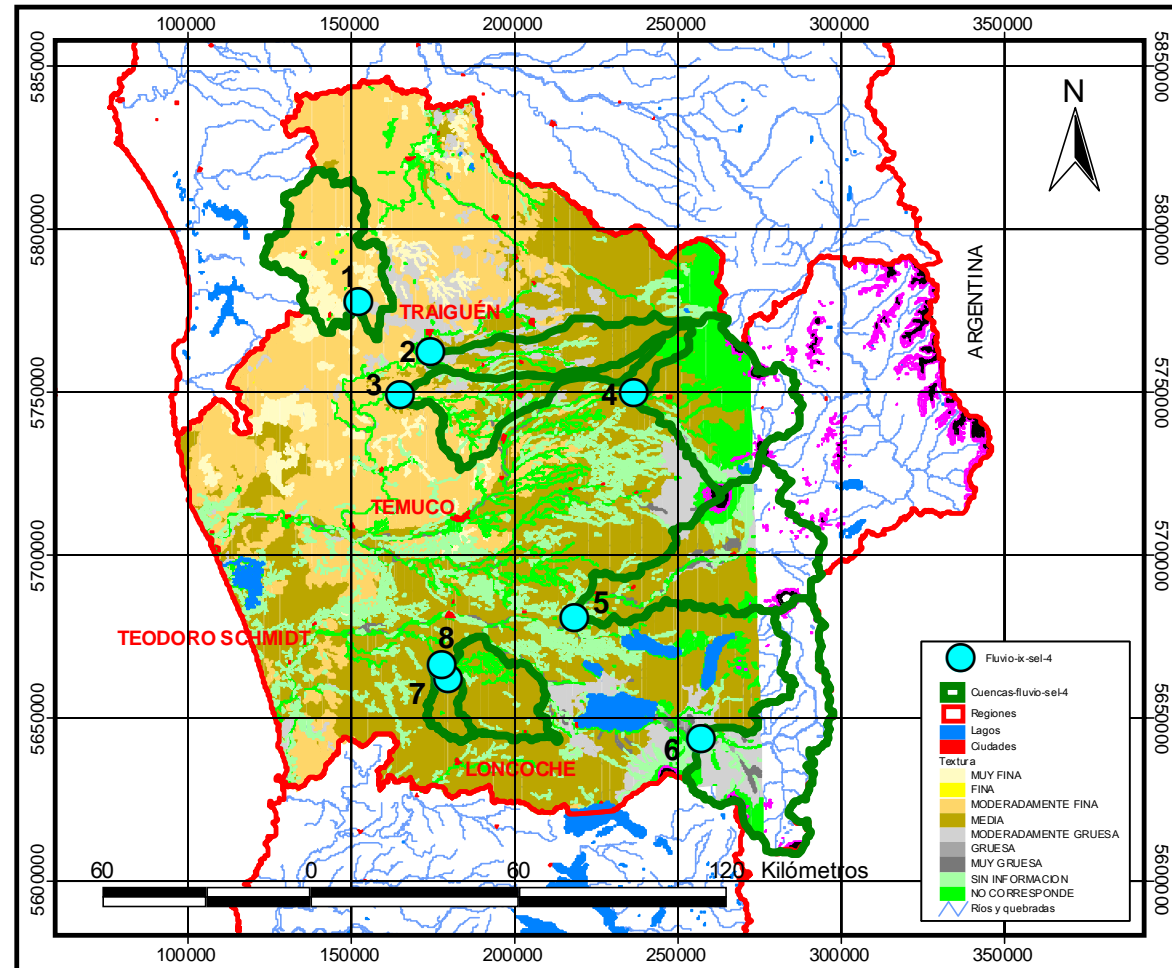
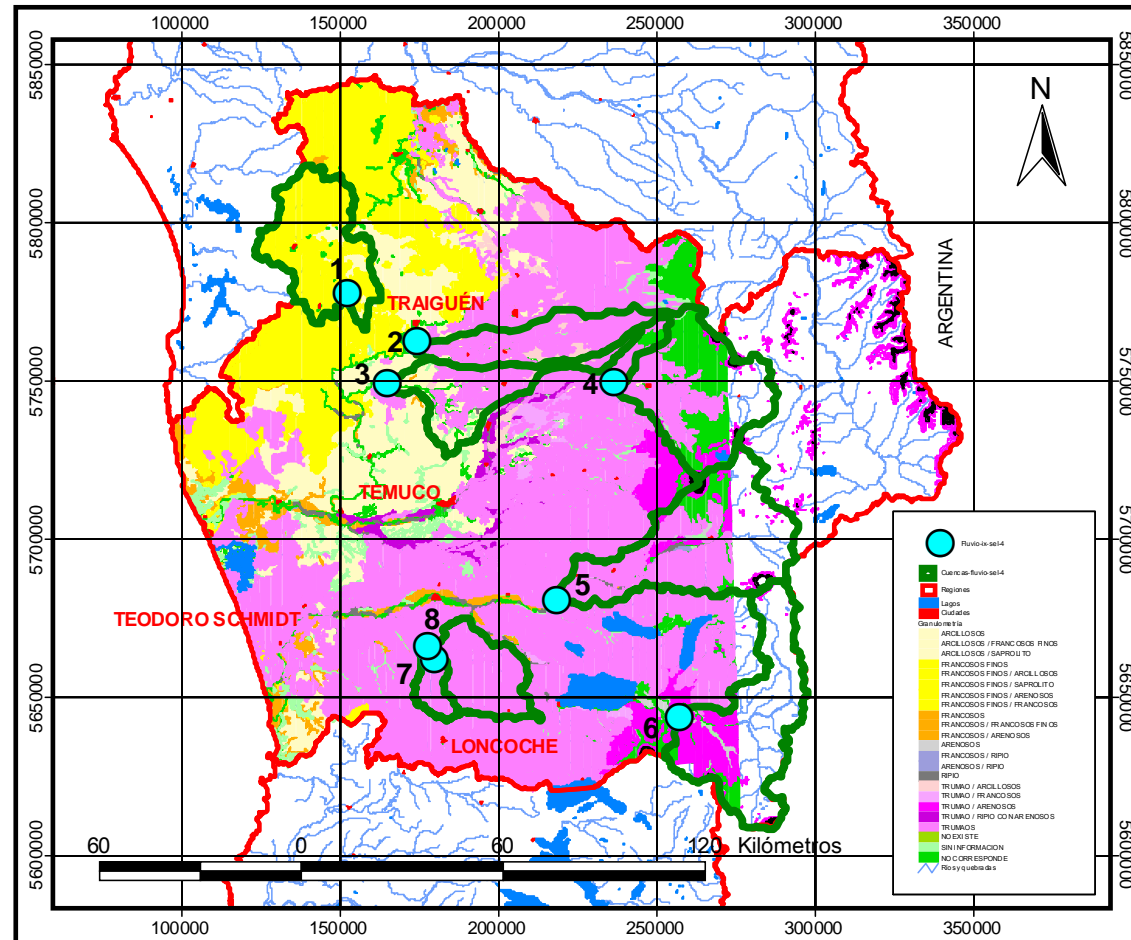


Figura N° 8.2
Granulometría en cuencas de calibración



Cuadro N° 8.1
Granulometría y textura para cuencas de calibración

Cuenca	Granulometría	Textura
Río Lumaco en Lumaco	francoso fino	moderadamente fina
Río Quino en Chufquén	trumao	media
Río Quillén en Galvarino	trumao, arcillas	media, moderadamente fina
Río Cautín en Rari-Ruca	trumao, parcial S/I	media, parcial S/I
Río Allipén en Los Laureles	trumao, parcial S/I	media, parcial S/I
Río Trancura en Llafenco	parcial S/I, trumao arenoso	parcial S/I, moderadamente gruesa
Río Dónguila en Gorbea	trumao	media
Estero Puyehue en Quitratúe	trumao	media
Río Dónguila sin Puyehue	trumao	media

Cuadro N° 8.2
Tipo de suelo asociado mediante análisis a cada cuenca

Cuenca	Tipo de suelo
Río Lumaco en Lumaco	tierra limosa
Río Quino en Chufquén	tierra limosa
Río Quillén en Galvarino	limo arcilloso
Río Cautín en Rari-Ruca	tierra limosa
Río Allipén en Los Laureles	tierra limosa
Río Trancura en Llafenco	tierra arenosa
Río Dónguila en Gorbea	tierra limosa
Estero Puyehue en Quitratúe	tierra limosa
Río Dónguila sin Puyehue	tierra limosa

De acuerdo con lo observado, los suelos de las cuencas de calibración corresponden a tres tipos diferentes, que de más gruesos a más finos son los siguientes:

- Tierra arenosa
- Tierra limosa
- Limo arcilloso

Una vez obtenido el tipo de suelo, los parámetros de calibración Por Ef, Hcap y Khid se obtienen del Cuadro N° 8.3, correspondiente a la Tabla N° 4.3.1 de la p. 117 del libro “Hidrología Aplicada, V.T. Chow, 1994” que presenta los parámetros de infiltración de Green-Ampt para diferentes clases de suelo.

Cuadro N° 8.3
Determinación de parámetros del suelo en función de la conductividad Khid

TABLA 4.3.1
Parámetros de infiltración de Green–Ampt para varias clases de suelos

Clase de suelo	Porosidad η	Porosidad efectiva θ_e	Cabeza de succión del suelo en el frente de mojado ψ (cm)	Conductividad hidráulica K (cm/h)
Arena	0.437 (0.374–0.500)	0.417 (0.354–0.480)	4.95 (0.97–25.36)	11.78
Arena margosa	0.437 (0.363–0.506)	0.401 (0.329–0.473)	6.13 (1.35–27.94)	2.99
Marga arenosa	0.453 (0.351–0.555)	0.412 (0.283–0.541)	11.01 (2.67–45.47)	1.09
Marga	0.463 (0.375–0.551)	0.434 (0.334–0.534)	8.89 (1.33–59.38)	0.34
Marga limosa	0.501 (0.420–0.582)	0.486 (0.394–0.578)	16.68 (2.92–95.39)	0.65
Marga arenarcillosa	0.398 (0.332–0.464)	0.330 (0.235–0.425)	21.85 (4.42–108.0)	0.15
Marga arcillosa	0.464 (0.409–0.519)	0.309 (0.279–0.501)	20.88 (4.79–91.10)	0.10
Marga limo–arcillosa	0.471 (0.418–0.524)	0.432 (0.347–0.517)	27.30 (5.67–131.50)	0.10
Arcilla arenosa	0.430 (0.370–0.490)	0.321 (0.207–0.435)	23.90 (4.08–140.2)	0.06
Arcilla limosa	0.479 (0.425–0.533)	0.423 (0.334–0.512)	29.22 (6.13–139.4)	0.05
Arcilla	0.475 (0.427–0.523)	0.385 (0.269–0.501)	31.63 (6.39–156.5)	0.03

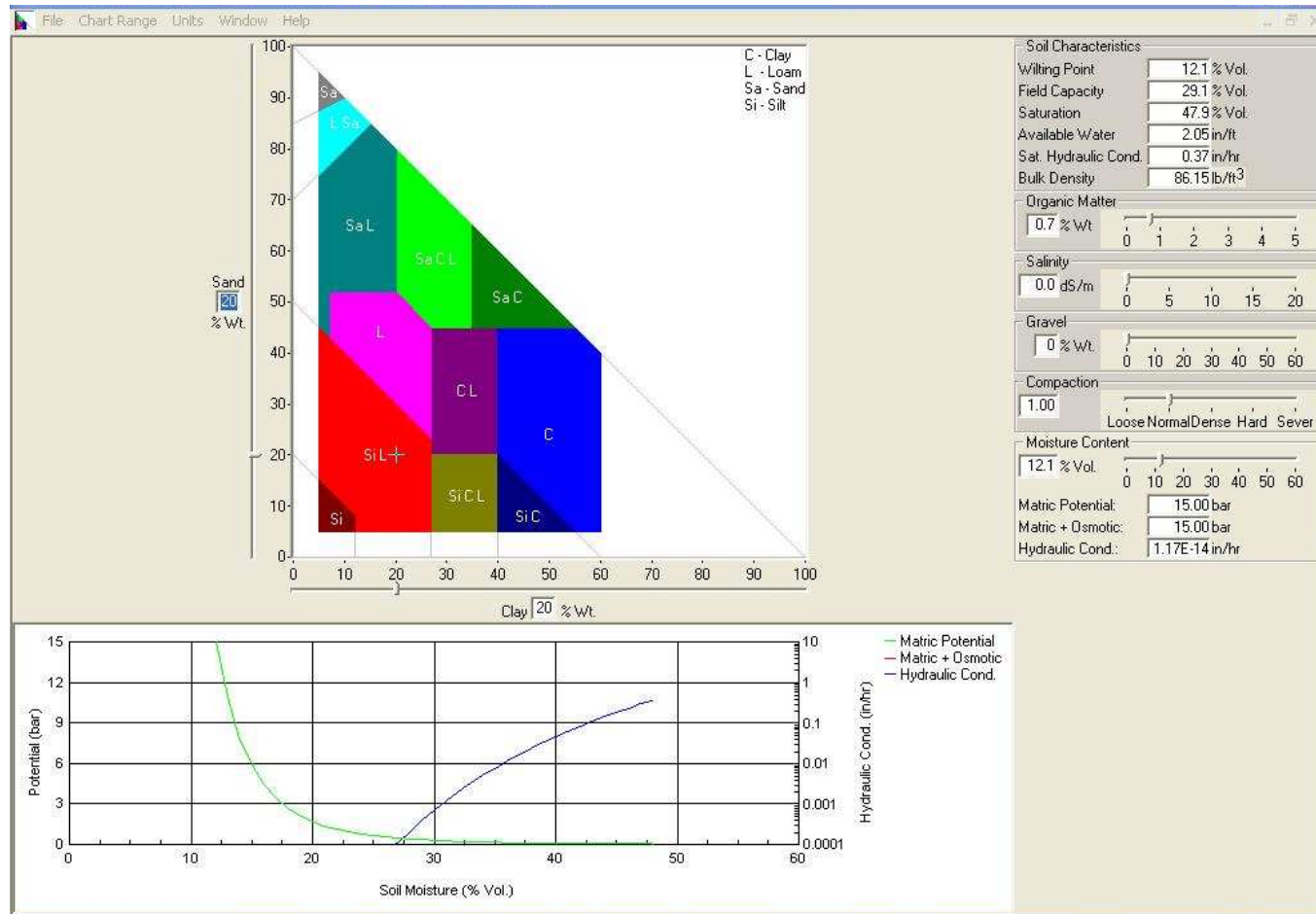
Los números entre paréntesis debajo de cada parámetro son una desviación estándar alrededor del valor del parámetro dado. Fuente: Rawls, Brakensiek y Miller, 1983.

Por otro lado, los parámetros S_{cc} y S_{min} se obtienen a partir del método del triángulo de texturas de suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, programado para Windows, denominado “Soil Water Characteristics from Texture”, que se muestra en la Figura N° 8.3. Este método fue desarrollado a partir del artículo escrito por Saxton et al (1985). También es posible verificar los valores de S_{cc} y S_{min} en la tabla de Parámetros de Suelos sintetizada a partir de los Apuntes de Hidráulica del Prof. Rubén León, tabla que se presenta en el archivo 8. Parámetros de suelos del Anexo Digital.

Finalmente, los valores de S_{crit} se obtienen por cálculo a partir de S_{cc} y S_{min} :

$$S_{crit} = S_{cc} - 0,60 (S_{cc} - S_{min}) = 0,4 S_{cc} + 0,6 S_{min}$$

Figura N° 8.3
Pantalla del programa Soil Water Characteristics From Texture



En el Cuadro N° 8.3 a continuación, se presentan los valores iniciales de los parámetros de suelo, asumidos para cada uno de los tipos de suelo encontrados de las cuencas de calibración.

Cuadro N° 8.3
Parámetros iniciales por tipo de suelo

Tipo de suelo	Tierra arenosa	Tierra limosa	Limo arcilloso
Parámetro			
Scc	0.500	0.593	0.800
Smin	0.291	0.310	0.380
Scrit	0.356	0.404	0.510
Por Ef	0.434	0.486	0.432
Hcap	100 mm	167 mm	273 mm
Khid	6.5 - 15 mm/h	4.0 - 6.5 mm/h	2 - 4 mm/h

Con ello, quedan definidos todos los parámetros iniciales que el modelo requiere para operar.

CAPÍTULO 9**CALIBRACIÓN DEL MODELO SIMED**

La determinación de los valores iniciales de los parámetros de calibración, presentada en los capítulos anteriores, permite generar los archivos de calibración que el modelo necesita para operar.

Con la información generada se llenaron los archivos de datos requeridos por el modelo, en la forma exacta en que éste los requiere para operar. Los archivos de datos se encuentran ordenados en carpetas, por cuenca.

Los archivos de datos contienen los siguientes datos, según su respectiva extensión, como se muestra en el Cuadro N° 9.1.

Cuadro N° 9.1
Archivos de calibración, extensiones y tipo de datos que contienen

Extensión	Tipo de datos contenidos
.dat	Caracterización de la cuenca: identificación y valores de los parámetros, identificación y ubicación de los archivos de datos
.dye	Factores de distribución horarios de precipitaciones y evaporación
.duh	Coefficientes del hidrograma unitario sintético de la cuenca
.evm	Estadística mensual de evaporación
.yud	Estadística diaria de precipitaciones
.qdo	Estadística diaria de caudales observados

Al iniciar el proceso de calibración, se decidió no operar con un período de validación, sino que sólo hacer la calibración, con todo el período disponible. La razón para adoptar esta decisión, fue que, como la calibración es “manual”, esto es, con discernimiento permanente del modelador, no es necesario someter los parámetros calibrados a una validación. Una validación se requiere en el caso de que la calibración sea automática, para validar que los parámetros así determinados sean aptos para representar cualquier otro período. Sin embargo, validar en el caso del presente estudio, no favorecería la calibración, sino que la desfavorecería, al reducir a la mitad el período de análisis.

Por lo señalado, los períodos de calibración son los que se señalan en el Cuadro N° 4.3 del Capítulo 4.4, Períodos concurrentes de caudales diarios y precipitaciones diarias.

9.1 RELLENO DE LAS ESTADÍSTICAS DIARIAS

El modelo requiere estadísticas diarias de precipitaciones, estadísticas diarias de caudales observados y un vector de valores mensuales de evaporación, absolutamente completas para poder operar.

El vector de valores mensuales de evaporación se obtuvo a partir de la estadística completa, como promedio del período concurrente o de calibración, antes señalado.

Las estadísticas de caudales observados se rellenaron con cero cuando faltaban datos.

Las estadísticas de precipitaciones se rellenaron de la siguiente manera:

- se determinaron las estaciones pluviométricas más cercanas con datos en el período a rellenar
- en base a la visualización de las estadísticas diarias que permiten los gráficos PP, se escogió la estación a utilizar
- se rellenó el mes incompleto, a partir de una correlación de los datos mensuales de la estación incompleta y la estación cercana completa.
- se rellenó el (los) día(s) faltante(s) usando la distribución diaria de la precipitación mensual en la estación cercana, amplificada por el factor que correlaciona las precipitaciones mensuales de ambas estaciones. El análisis y las correlaciones se entregan en el archivo 8.1 Correlaciones mensuales PP.

En el Cuadro N° 9.2 a continuación, se presenta para cada estación, la estación utilizada para el relleno diario.

Cuadro N° 9.2
Estaciones pluviométricas usadas para relleno diario

Estación pluviométrica de calibración	Estación pluviométrica usada para relleno
Llafenco	Curarrehue
Malalcahuello	Curacautín
Lautaro	Las Mercedes

9.2 PROCESO DE CALIBRACIÓN

De acuerdo con todo lo anteriormente señalado, el proceso de calibración se centró fundamentalmente en dos parámetros, Hsuelo y K, ambos determinados en forma independiente del tipo de suelo.

No obstante ello, también se permitió leves modificaciones del valor de la permeabilidad hidráulica Khid, dentro de los rangos físicos establecidos en el Cuadro N° 8.3, y variaciones no sustanciales del parámetro A.

Esto concuerda con lo señalado en el estudio SIT 110, donde se identifican los tres parámetros de mayor relevancia para la calibración.

- la constante de embalse subterráneo K,
- la constante de infiltración Khid,
- el parámetro de corrección de precipitaciones A.

Todos los demás parámetros, aunque influyen en la forma de la señal simulada, son de menor relevancia. Por lo tanto, es un adecuado proceder el de definirlos con un sentido físico, y luego no modificarlos durante la calibración.

En resumen, el proceso de calibración se centró en las cuatro variables especificadas. Para cada parámetro se hizo una calibración gruesa y fina.

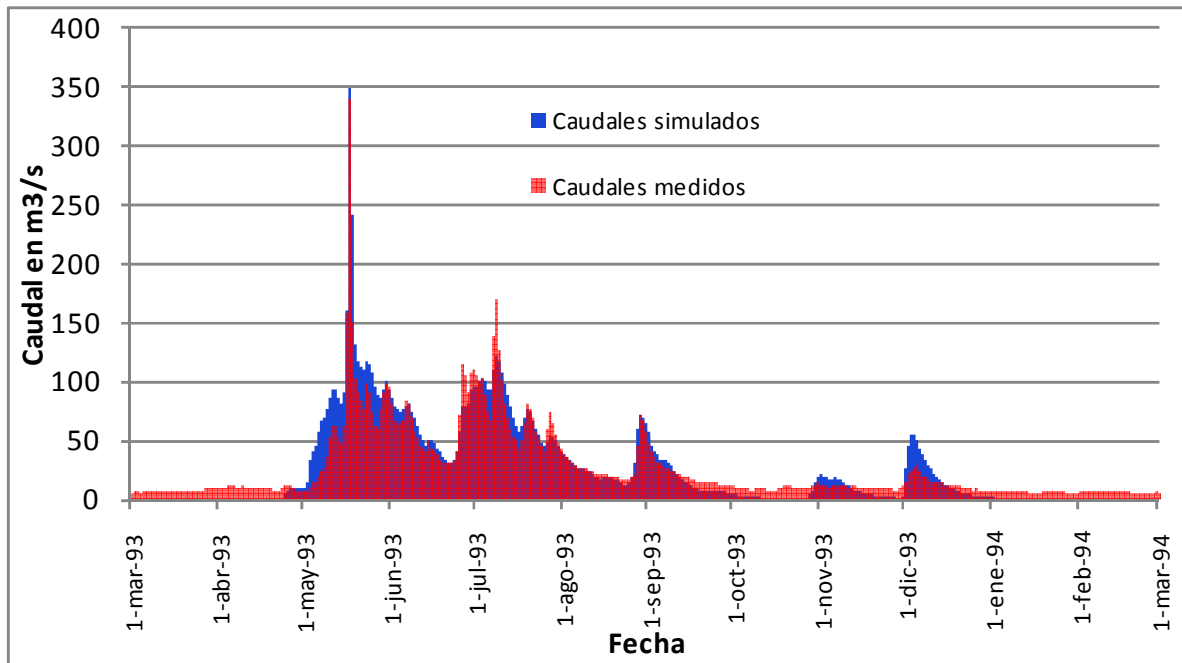
En el Cuadro N° 9.3 se presentan los parámetros iniciales de todas las cuencas de calibración.

Cuadro 9.3
Parámetros iniciales cuencas de calibración

Estación fluviométrica seleccionada Sel 4	Período Calibración	A	B	K	Hsuelo (mm)	Sec	Smin	Srit	Por Ef	Hcap (mm)	Khid (mm/h)
Río Lumaco en Lumaco	ene 1989 - dic 2001	1.0120	0.547	1100	2000	0.593	0.310	0.404	0.486	167	4.0 - 6.5
Estero Quino en Chufquén	ene 2002 - dic 2005	0.9879	0.603	600	2000	0.593	0.310	0.404	0.486	167	4.0 - 6.8
Río Quillén en Galvarino	ene 1980 - dic 1999	1.0654	0.614	700	2000	0.800	0.380	0.510	0.432	273	2.0 - 4.0
Río Cautín en Rariruca	ene 1997 - dic 2006	1.2322	0.624	4000	2000	0.593	0.310	0.404	0.486	167	4.0 - 6.8
Río Allipén Los Laureles	ene 1989 - dic 2000	1.4083	0.622	4100	2000	0.593	0.310	0.404	0.486	167	4.0 - 6.8
Río Trancura antes río Llafenco	ene 1975 - dic 2002	0.8966	0.582	2800	2000	0.500	0.291	0.356	0.434	100	6.5 - 15
Río Dónguill en Gorbea	ene 1989 - dic 2001	0.8870	0.865	820	2000	0.593	0.310	0.404	0.486	167	4.0 - 6.8
Estero Puyehue en Quitratúe	ene 1994 - dic 2001	0.9196	0.865	700	2000	0.593	0.310	0.404	0.486	167	4.0 - 6.8
Río Dónguill sin Puyehue	ene 1994 - dic 2001	0.8640	0.865	850	2000	0.593	0.310	0.404	0.486	167	4.0 - 6.8

A continuación, en la Figura 9.1, se presenta, a modo de ejemplo para la estación Quillén en Galvarino, un período de un año del gráfico de las series de caudales observados versus simulados en función del tiempo, como resultado del proceso de calibración. Los caudales observados están en azul, mientras que los simulados, en rojo. Toda la serie de gráficos para el total de estaciones calibradas, se encuentra en el Anexo Digital 9.2 Calibración.

Figura N° 9.1
Calibración – Quillén en Galvarino



9.3 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Todos los archivos de calibración se presentan en el archivo 9.2 Calibración, del Anexo Digital.

Los valores finales de la calibración para las cuencas analizadas se presentan en el Cuadro 9.4 adjunto.

Al respecto, es necesario señalar que hubo dos estaciones que no se pudieron calibrar, porque el modelo no aceptó el set de datos. Estas estaciones son:

- Dónguila en Gorbea
- Puyehue en Quitratúe

Sí se pudo calibrar Dónguila sin Puyehue, construida en base a la diferencia entre ambas.

Para las estaciones que se pudieron calibrar, es muy notorio lo siguiente:

- No es necesario modificar los valores de S_{cc} , S_{min} ni S_{crit} durante la calibración. Tampoco es necesario modificar los valores de P_{or} E_f ni H_{cap} . Todos estos parámetros, asociados a los suelos identificados, y por lo tanto, determinados con un sentido físico, mantienen su valor inicial.
- El valor de K_{hid} , como inicialmente se caracteriza a través de un rango, es necesario afinarlo durante la calibración. Sin embargo, se observa que el valor no ha abandonado los rangos físicos pre-establecidos, en ninguno de los casos de análisis.
- Tampoco es necesario modificar los parámetros A y B. Excepcionalmente, y sólo en forma muy leve, se modificó el parámetro A. Esto es coherente con el hecho de que ambos tienen un sentido físico, por lo que no deben alterarse en forma significativa durante la calibración.
- En cambio, se observó que el valor de K sí es necesario cambiarlo completamente en relación con el valor de K que se calculó a partir de las recesiones. El valor de K para las recesiones no permite ajustar adecuadamente los caudales medios y altos, que influyen mucho en el promedio de la serie total. Por ello, se ha debido optar por un K de compromiso, mucho más bajo, que sí representa bien las recesiones de los caudales medios y altos, pero que no es el más adecuado para los caudales bajos. Lo señalado muestra que el modelo requiere otro estanque de almacenamiento, caracterizado con un segundo parámetro K, de modo que entre ambos puedan reproducir adecuadamente ambos tipos de recesión.

- El valor de Hsuelo también es necesario modificarlo bastante. En especial es notable el hecho de que aumenta notoriamente en las cuencas altas, que tienen suelos volcánicos.
- Se observa que los valores de K y de Hsuelo se combinan en forma opuesta. Los valores más altos de K se producen en las cuencas que tienen los valores más bajos de Hsuelo, y viceversa. Los comportamientos de K y de Hsuelo para las cuencas de calibración, se presentan en las Figuras N° 9.2 y 9.3.

Como conclusión general del análisis, se puede decir que la forma de obtener los parámetros iniciales, a partir de los tipos de suelo observados, como se concluyó en el estudio anterior, tiene mucho sentido, porque reduce a 2 los parámetros de calibración: Hsuelo y K. Otros dos parámetros, Khid y A, sólo es necesario ajustarlos marginalmente.

Sin embargo, también es necesario reconocer, que en ningún caso, ni con parámetros iniciales ni calibrados, al regionalizarlos puede evitarse una calibración. Para la aplicación del modelo en cuencas no controladas, es totalmente necesario que el modelo sea calibrado en algún punto de cierre, que puede ser alguna estación fluviométrica intermedia o de cierre de la cuenca completa. El modelo SIMED no puede considerarse apto para la generación de caudales en subcuencas no controladas, por la mera determinación de sus parámetros, iniciales o calibrados, sino hasta que esté debidamente calibrado en alguna estación de cierre.

Cuadro N° 9.4
Parámetros finales de calibración

Estación fluviométrica seleccionada Sel 4	Período Calibración	A	B	K	Hsuelo (mm)	Sec	Smin	Scrit	Por Ef	Hcap (mm)	Khid (mm/h)
Río Lumaco en Lumaco	ene 1989 - dic 2001	1.0120	0.547	48	1800	0.593	0.310	0.404	0.486	167.000	6.5
Estero Quino en Chufquén	ene 2002 - dic 2005	0.9000	0.603	144	1500	0.593	0.310	0.404	0.486	167.000	4.0
Río Quillén en Galvarino	ene 1980 - dic 1999	1.0300	0.614	175	700	0.800	0.380	0.510	0.432	273.000	4.0
Río Cautín en Rariruca	ene 1997 - dic 2006	1.1700	0.624	24	5000	0.593	0.310	0.404	0.486	167.000	6.5
Río Allipén Los Laureles	ene 1989 - dic 2000	1.3200	0.622	24	5000	0.593	0.310	0.404	0.486	167.000	6.5
Río Trancura antes río Llafenco	ene 1975 - dic 2002	0.8966	0.582	24	5000	0.500	0.291	0.356	0.434	100.000	10.0
Río Dónquil en Gorbea	ene 1989 - dic 2001	0.8870	0.865	820	2000	0.593	0.310	0.404	0.486	167.000	4.0 - 6.8
Estero Puyehue en Quitratúe	ene 1994 - dic 2001	0.9196	0.865	700	2000	0.593	0.310	0.404	0.486	167.000	4.0 - 6.8
Río Dónquil sin Puyehue	ene 1994 - dic 2001	0.9000	0.865	40	2800	0.593	0.310	0.404	0.486	167.000	6.0

* estaciones que no fue posible calibrar

Los valores modificados durante la calibración se señalan en rojo.

Figura N° 9.2
Parámetro K de embalse en cuencas de calibración

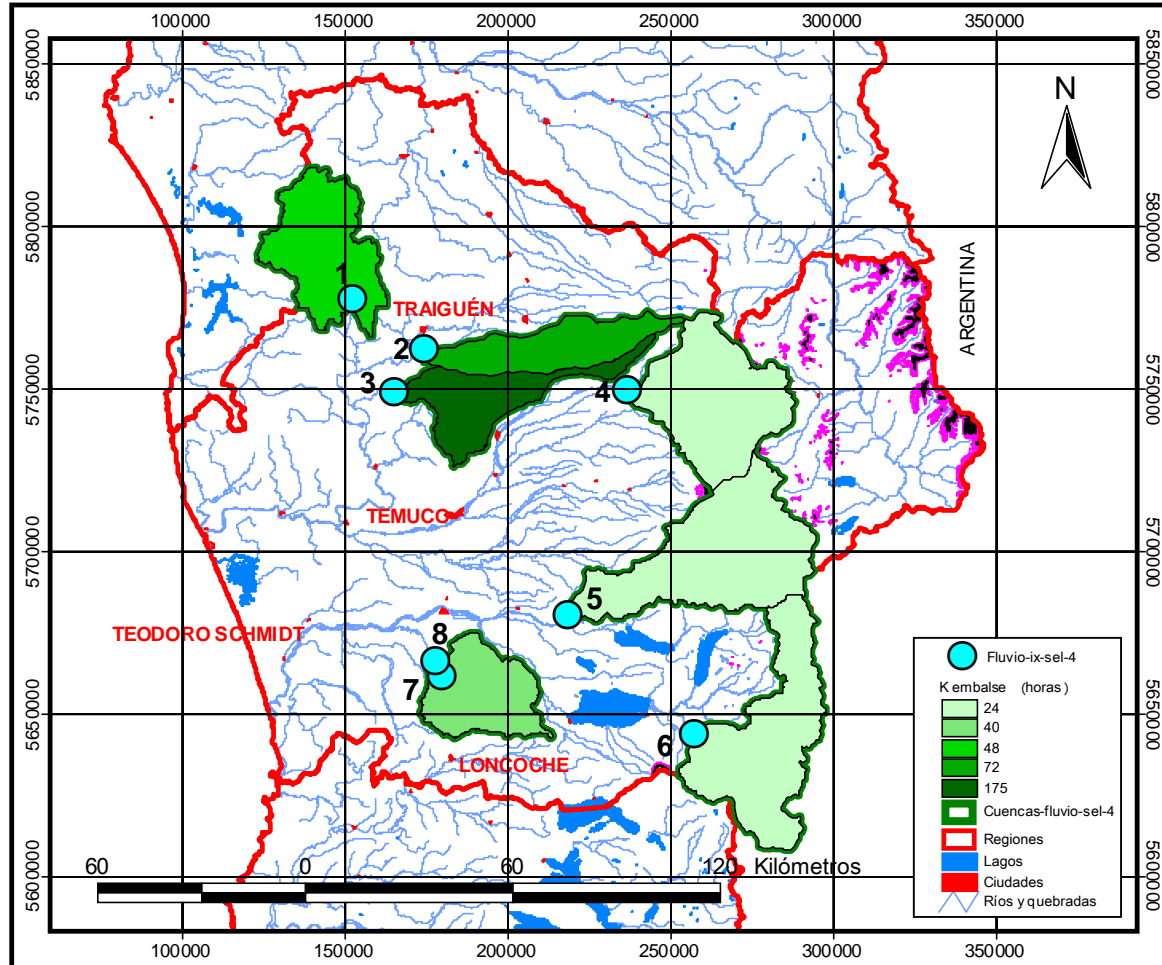
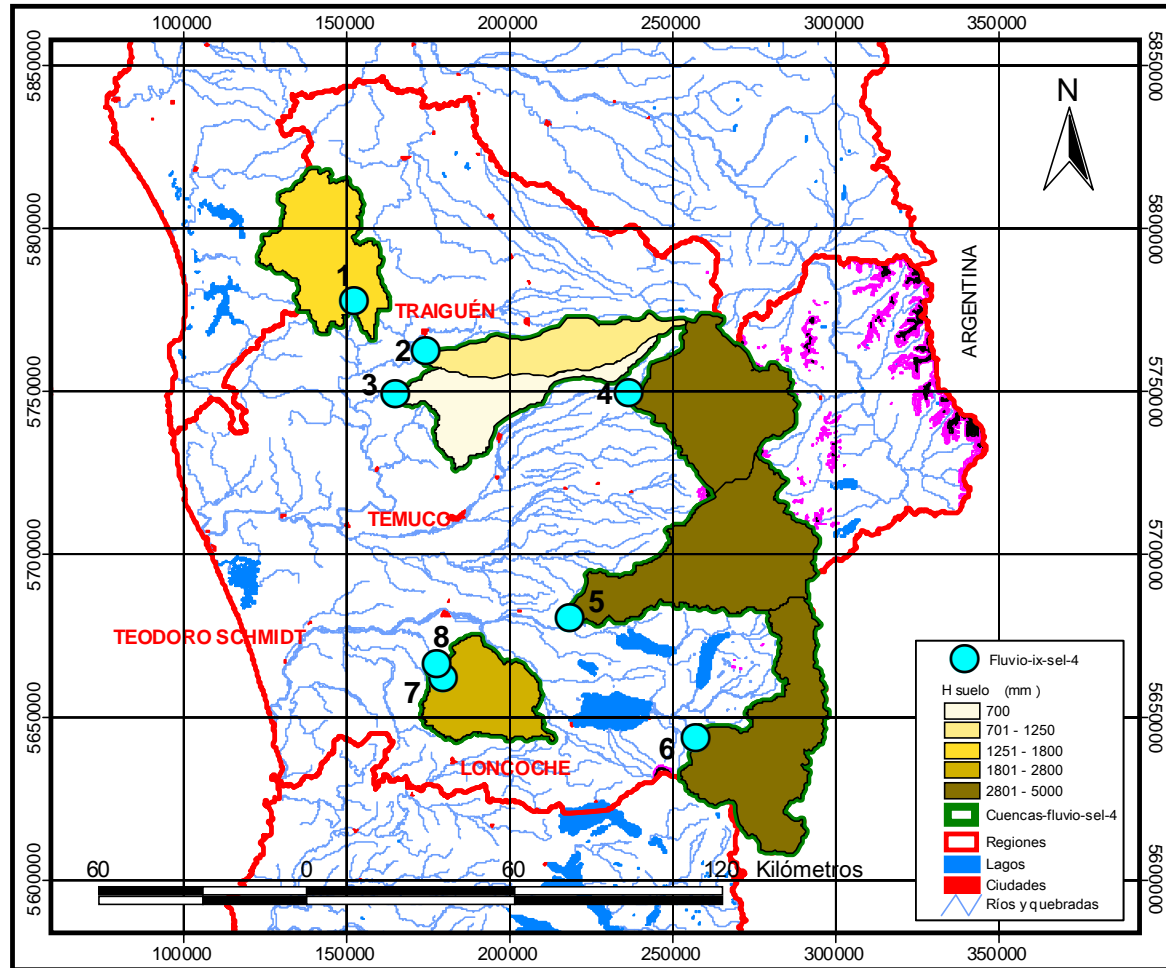


Figura N° 9.3
Parámetro H suelo en cuencas de calibración



CAPÍTULO 10**REGIONALIZACIÓN DE PARÁMETROS**

Para la regionalización de los parámetros, ellos se han clasificado en tres grupos.

- En primer lugar, están los parámetros A y B, de precipitación y de evaporación, respectivamente. Para la regionalización de estos parámetros, se procedió a obtener la precipitación areal y la evaporación areal sobre cada una de las subsubcuencas de la DGA, a partir del mapa de isohietas promedio anuales y de isoevapotranspiración del balance hídrico. Luego, se asociaron todas las subsubcuencas a una estación pluviométrica y a una estación evaporimétrica de largo registro, respectivamente. Finalmente, se hizo el cociente Promedio areal / Promedio estación, obteniéndose así los parámetros A y B para cada subsubcuenca. Toda la información generada se encuentra en la base de datos de la cobertura subsubcuencas_parámetros.shp, creada a partir de la cobertura subsubcuencas.shp de la DGA.
- En segundo lugar, están los parámetros asociados al tipo de suelo. Para obtenerlos, se han clasificado los suelos presentes en la IXª Región a partir de su textura y granulometría, llegando de este modo a identificar cuatro tipos de suelos. Tanto la granulometría como la textura y el tipo de suelo identificado, se han agregado a la base de datos de la nueva cobertura llamada subsubcuencas_parámetros.shp. Los parámetros asociados a los cuatro tipos de suelos son los que se muestran en el Cuadro N° 10.1 adjunto.

Cuadro N° 10.1
Tipos de suelos en la IXª Región

Tipo de suelo	Tierra arenosa	Tierra limosa	Limo arcilloso	Arcilla limosa
Parámetro				
Sec	0.5	0.593	0.8	0.827
Smin	0.291	0.31	0.38	0.38
Scrit	0.356	0.404	0.51	0.528
Por Ef	0.434	0.486	0.432	0.423
Hcap	100 mm	167 mm	273 mm	290 mm
Khid	6.5 - 15 mm/h	4.0 - 6.5 mm/h	2 - 4 mm/h	0.5 - 2.0 mm/h

- En tercer lugar están los parámetros que son propiamente los de calibración, K y Hsuelo. La posibilidad de regionalización de estos parámetros sólo puede referirse a parámetros iniciales. Es necesario hacer énfasis en que

para ambos debe considerarse la posibilidad de modificación en función de una calibración en alguna estación de cierre.

- Para regionalizar los parámetros iniciales de K y Hsuelo, se buscó asociarlos a las características de suelo, ya fuera textura, granulometría, pendiente o profundidad del suelo. Al respecto, se observó que la profundidad del suelo de las coberturas de CIREN, que se refiere al suelo orgánico con que se cuenta para cultivos, no representa la altura de suelo Hsuelo que participa del escurrimiento. De hecho, por ejemplo en las cuencas altas de los ríos Cautín, Allipén y Trancura, la profundidad del suelo alcanza como máximo espesores de 1 m, pero el parámetro Hsuelo calibrado resultó de 5 m.
- Sin embargo, se encontró una relación entre los parámetros K y Hsuelo, y el relieve, expresado como pendiente. En la Figura N° 10.1 se muestra la pendiente del terreno, de acuerdo con la cobertura de CIREN, y en las Figuras 10.2 y 10.3, la forma en que los parámetros K y Hsuelo se relacionan con la pendiente. Esto permitió intentar una regionalización de ellos.

Todos los parámetros regionalizados se incluyen en la base de datos de la cobertura subsubcuencas_parámetros.shp, la cual se presenta en el Cuadro N° 10.2 adjunto.

Figura N° 10.1
Pendiente del terreno y cuencas de calibración

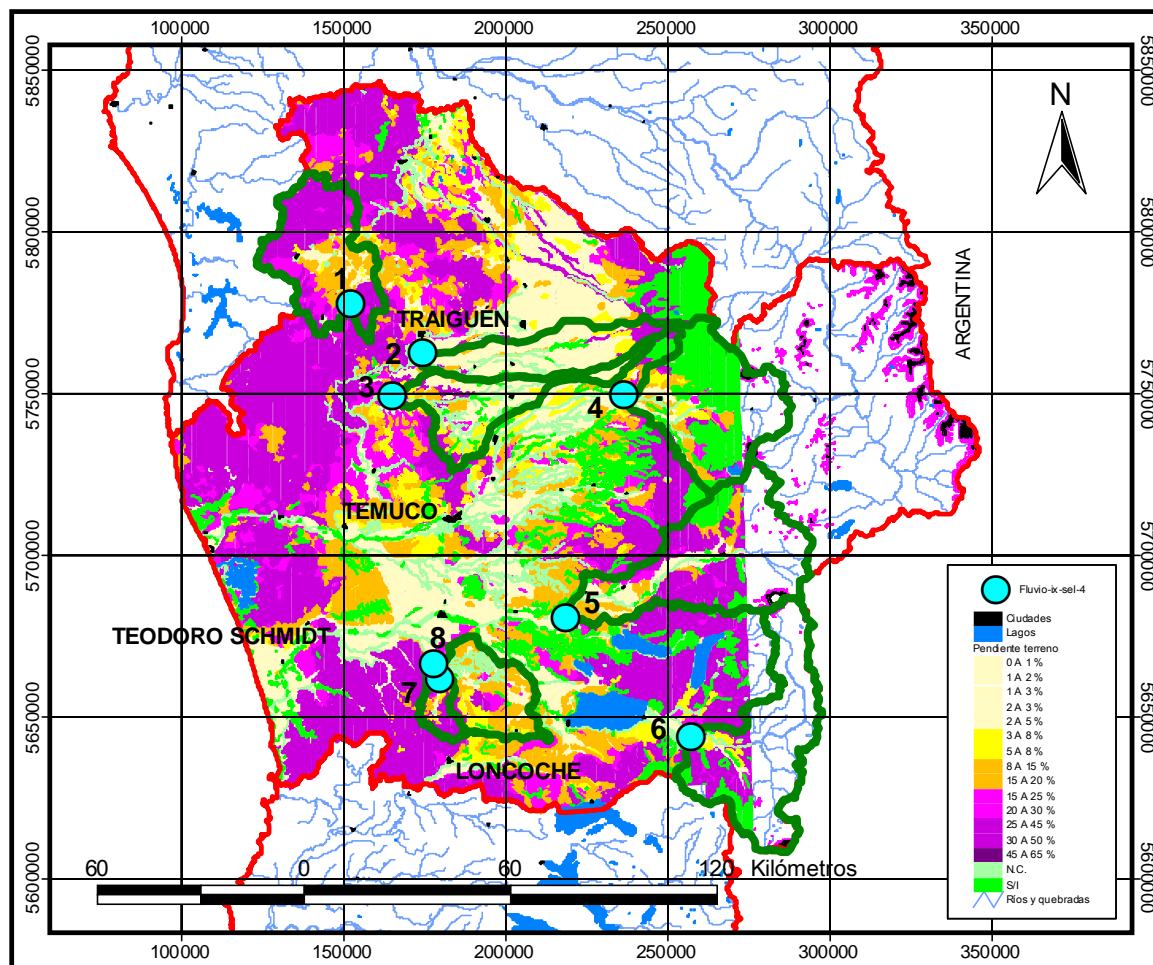


Figura N° 10.2
Pendiente del terreno y parámetro K de embalse calibrado

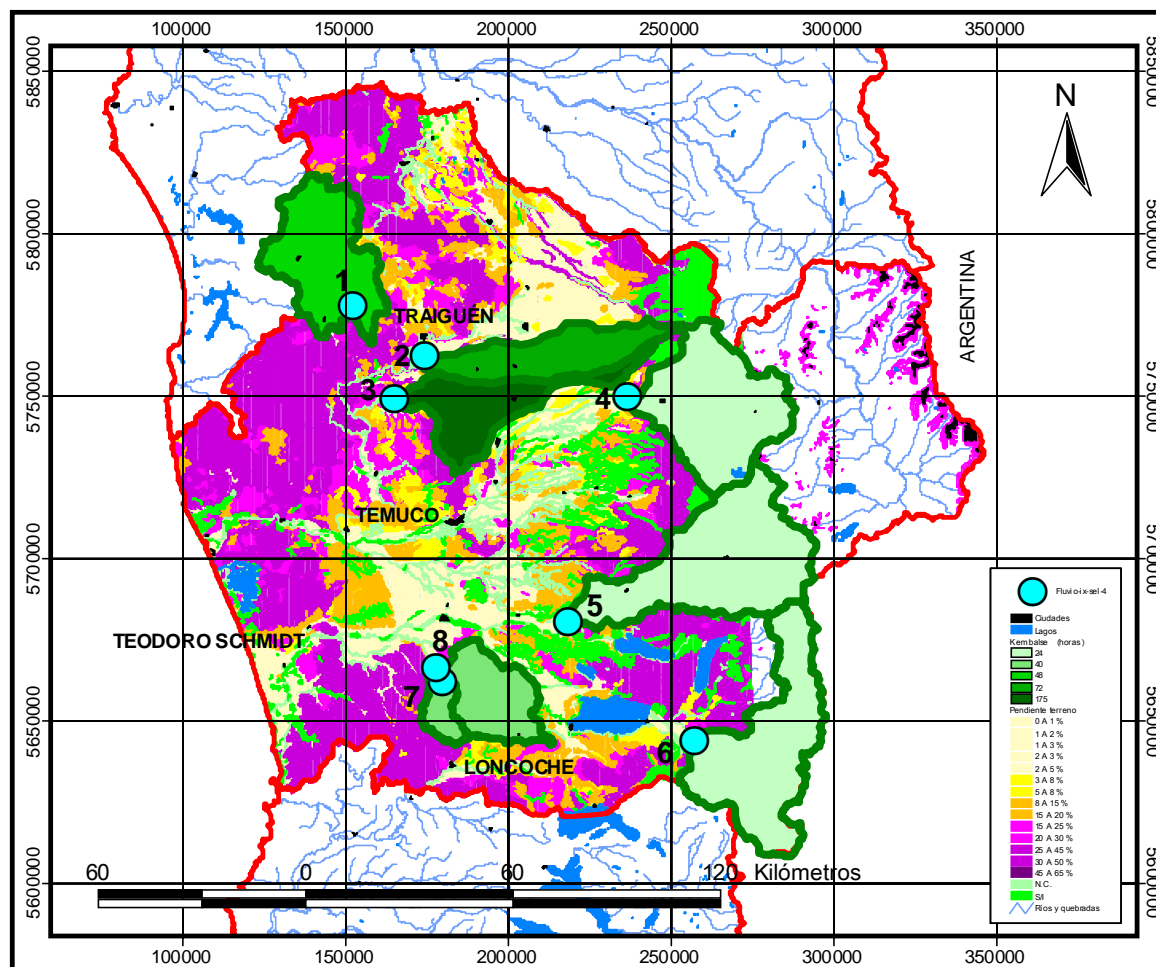
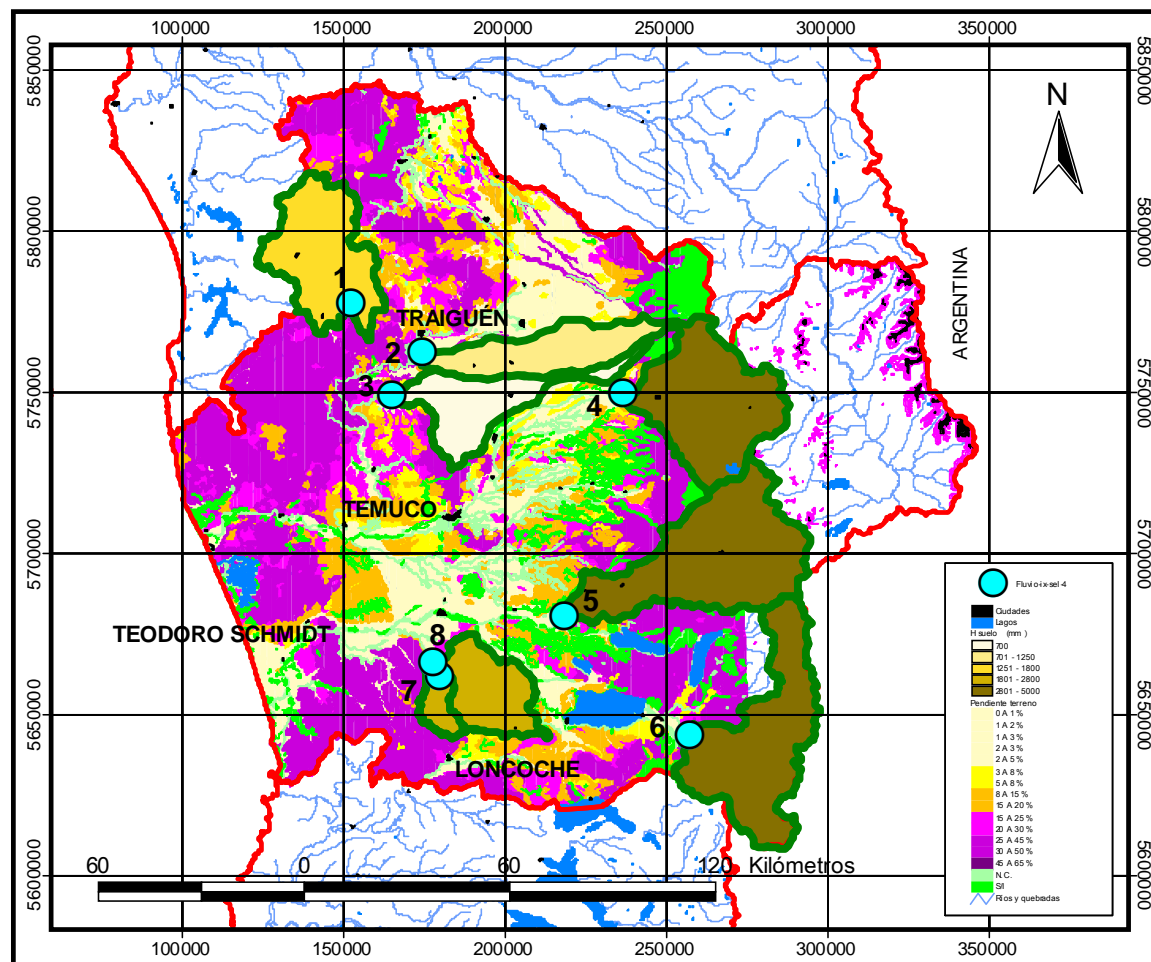


Figura N° 10.3
Pendiente del terreno y parámetro Hsuelo calibrado



CAPÍTULO 11**SIG Y MAPA**

Todas las coberturas que se han venido presentando a lo largo del estudio, se entregan en formato digital, organizadas en un proyecto SIG para ArcGis, y en un mapa en papel, en el cual se han impreso algunas coberturas seleccionadas.

La presentación se ha organizado de modo de incluir toda la información en un solo mapa, que abarca la IX^a Región de la Araucanía.

En el mapa se presentan los sets de parámetros regionalizados, a nivel de subsubcuenca. Según se ha señalado antes, algunos de ellos pueden considerarse parámetros finales de calibración, que prácticamente no debieran modificarse, y otros parámetros sólo deben considerarse como parámetros iniciales, y deben ser necesariamente calibrados en alguna estación de cierre. Estos parámetros son K de embalse y Hsuelo.

En la zona inferior del mapa se incluye un cuadro, en el cual se detallan los parámetros individuales (A, B, K y Área) de cada subsubcuenca. Por otro lado, según el tipo de suelo identificado, las subsubcuencas se agruparon en cuatro grupos: tierra arenosa, tierra limosa, limo arcilloso y arcilla limosa, que se identifican con los colores verde, rosado, naranja y café, respectivamente. Los parámetros comunes por tipo de suelo (PorEf, Hcap, Khid, Scc, Scrit, Smin y Hsuelo, se presentan en el cuadro superior. El contenido del mapa está incluido en un proyecto SIG, que se encuentra en la carpeta 11. SIG del Anexo Digital.

En el Cuadro N° 11.1 a continuación, se presenta una explicación de todas las coberturas generadas y utilizadas a lo largo del estudio, las que se encuentran igualmente dentro de la carpeta 11. SIG del Anexo Digital.

Cuadro N° 11.1
Coberturas SIG generadas en el estudio

Nombre archivo	Explicación
cauces-ix.shp	Cauces principales en las cuencas seleccionadas (cálculo de parámetros geomorfológicos)
centroides.shp	Centroides de las cuencas seleccionadas para calibración(cálculo de parámetros geomorfológicos)
cuencas-fluvio-sel-3.shp	Definición preliminar de cuencas para calibración
cuencas-fluvio-sel-4.shp	Cuencas seleccionadas para calibración
evap-ix-todas.shp	Universo de estaciones evaporimétricas de la IXa Región
evap-ix-sel-1.shp	Selección de estaciones evaporimétricas aptas para calibración
evapo-ix-patron.shp	Selección de estaciones evaporimétricas aptas para el cálculo del patrón
fluvio-ix-sel-1.shp	Resultado de la primera selección de estaciones fluviométricas
fluvio-ix-sel-2.shp	Resultado de la segunda selección de estaciones fluviométricas
fluvio-ix-sel-3.shp	Resultado de la tercera selección de estaciones fluviométricas
fluvio-ix-sel-4.shp	Resultado de la cuarta selección de estaciones fluviométricas
fluvio-ix-todas.shp	Universo de estaciones fluviométricas de la IXa Región
pluvio-ix-patron.shp	Selección de estaciones pluviométricas aptas para el cálculo del patrón
pluvio-ix-sel-1.shp	Resultado de la primera selección de estaciones pluviométricas
pluvio-ix-sel-2.shp	Resultado de la segunda selección de estaciones pluviométricas
pluvio-ix-todas.shp	Universo de estaciones pluviométricas de la IXa Región
subsubc_parametros.shp	Resultados: sets de parámetros iniciales para todas las subsubcuencas de la zona de estudio
zona_estudio.shp	Alcance de la zona de estudio

CAPÍTULO 12**CONCLUSIONES**

El objetivo del estudio fue el de regionalizar los parámetros de calibración del modelo SIMED, encontrados a partir de la calibración del modelo en nueve cuencas cuidadosamente seleccionadas, de las cuales finalmente se pudieron calibrar siete.

En el proceso de estudio y análisis desarrollado para lograr el objetivo, se ha podido sacar las conclusiones que se exponen a continuación.

12.1 CONCLUSIONES RESPECTO DE LOS PARÁMETROS

- Es altamente conveniente obtener los parámetros iniciales estrechamente ligados al tipo de suelo presente en la cuenca a modelar. De esta forma, todos ellos tienen un sentido físico, y se evita prácticamente por completo tener que modificarlos en el proceso de calibración.
- Lo mismo ocurre con los parámetros A y B. Al obtenerlos con un claro sentido físico, ellos prácticamente no se modifican durante la calibración.
- El parámetro Khid (permeabilidad vertical del suelo), para cada tipo de suelo presenta un rango, dentro cual es posible mover este parámetro en el proceso de calibración, sin que pierda su sentido físico.
- Los parámetros de calibración finalmente son sólo el valor de K de embalse, y el valor de Hsuelo, ambos difíciles de encontrar a partir de otros métodos.
- El método de cálculo de K a partir de las recesiones, si bien entrega valores coherentes entre ellos a partir de las estadísticas, no entrega valores útiles para la modelación. Hubo que disminuir sustancialmente los valores de K calculados, para lograr una buena calibración.
- El valor de Hsuelo también es relevante en la calibración. Si bien es cierto que se pueden entregar valores iniciales a partir de las calibraciones realizadas, es necesario hacer énfasis en que realmente son valores iniciales, que requieren de una calibración.
- Los parámetros K de embalse y Hsuelo varían en forma contraria u opuesta. Al aumentar uno de ellos, debe reducirse el otro.
- Los parámetros K y Hsuelo parecieran tener relación con la geomorfología del terreno (pendientes), más que con otras características como textura o granulometría. Por este motivo, la regionalización de ellos se efectuó a partir de las pendientes.

12.2 CONCLUSIONES SOBRE EL ASPECTO CONCEPTUAL DEL MODELO

- El modelo parece bastante adecuado para la simulación de caudales medios diarios, y lo es más aún para la simulación de valores medios mensuales.
- El modelo presenta algunas limitaciones que ya se mencionaron en el estudio anterior, y que se percibieron también, como limitaciones, en el presente estudio.
- Entre las limitaciones conceptuales sensibles está la falta de otro estanque de almacenamiento con otro valor de K asociado. Con un solo estanque de almacenamiento es muy difícil reproducir bien las recesiones altas, medias y bajas.
- El modelo debiera tener la opción de leer datos horarios de precipitación, en vez de usar una distribución, única para un mismo tipo de lluvia (garúa, lluvia, tormenta). Esta opción sería posible de implementar a partir de la precipitación horaria de una estación pluviográfica cercana, cuya distribución se asumiría en la estación nominal de calibración.
- Si se usan factores de distribución para la precipitación, es importante considerar que se trata de factores de distribución de la lluvia durante el día, y no durante una tormenta. Por este motivo, la metodología de obtención de estos factores de distribución se basó en encontrar el día que tenga una distribución representativa de la estadística, para cada tipo de lluvia.
- En cuanto a los factores de distribución de la evaporación, debieran comenzar a hacerse mediciones de evaporación horaria en Chile. Si bien es cierto que la distribución de la evaporación a lo largo del día no varía demasiado de un país a otro, es sorprendente que en ninguna entidad investigadora chilena se haya verificado la validez de las distribuciones horarias existentes en otros países y utilizadas en Chile.
- El modelo debiera leer estadísticas mensuales de evaporación, cuando hay, y no solamente un vector de 12 valores con la evaporación promedio mensual. Dado el grado de resolución con que se quiere obtener el resultado del caudal simulado (diario), dado que la evaporación es un input de importancia secundaria pero no despreciable, y dado que los valores mensuales presentan variaciones significativas entre años húmedos y secos, sería bueno tener la opción de que el modelo leyera una estadística mensual de evaporación (cuando existe).

12.3 CONCLUSIONES SOBRE EL ASPECTO FORMAL DEL MODELO

- El modelo debiera poder leer datos de entrada en Excel, y entregar datos de salida también compatibles con Excel, para que pudieran ser abiertos directamente en Excel. Esto, además de facilitar el manejo y visualización de la información, permitiría evitar el paso de texto a número y de retorno, que actualmente ocurre internamente, y que podría ser la causa de la ocurrencia de errores.
- El modelo debiera entregar mensajes más precisos de error. Por ejemplo, la indicación “Hubo un error al leer el archivo”, aporta poco al usuario, pues no indica en qué archivo se encontró un error. Este mensaje debiera contener el nombre del archivo, y también el número del registro donde se encontró el error, de modo que para el usuario sea fácil proceder a su corrección.
- Lo mismo ocurre para el mensaje “range check error”. El modelo debiera indicar exactamente dónde estaba procesando cuando encontró el error de chequeo de rango, de modo que el operador pueda proceder a la revisión y corrección del error. En la forma actual, esto no es posible.

12.4 CONCLUSIONES GENERALES DEL ESTUDIO

- El modelo se percibe como bastante adecuado para la simulación de caudales medios diarios, y lo es más aún para la simulación de valores medios mensuales.
- Se observa que, para usar adecuadamente el modelo SIMED, tiene importancia hacer una estimación razonable de los parámetros iniciales de calibración. Una estimación razonable de parámetros regionales se obtiene a partir de las características de textura, granulometría y pendiente de los suelos. Para ello, resulta útil basarse en las coberturas de suelos de CIREN. Una estimación de este tipo permite calibrar el modelo, sin alejarse demasiado de los valores originales de los parámetros, con lo cual no pierden su sentido físico.
- De todas maneras, aun con una muy acertada estimación inicial de los parámetros regionales, hay dos parámetros que no pueden considerarse finales sino que solamente iniciales de calibración, que son el K de embalse y la altura de suelo Hsuelo. Es totalmente necesario que ellos sean calibrados en algún punto de cierre, que puede ser alguna estación fluviométrica intermedia o de cierre de una cuenca completa. El modelo SIMED es apto para la generación de caudales en subcuencas, con esta consideración.

- El modelo SIMED mejorará mucho conceptualmente, cuando se hagan las mejoras propuestas, que no son muchas ni muy difíciles, pero que requieren la acción de un hidrólogo modelador.
- El modelo SIMED mejorará mucho formalmente, y su visualización se tornará más amistosa para el usuario, cuando se hagan los cambios relativos a datos de entrada y salida, y a la emisión de mensajes de error que se desprendieron de este estudio.

ANEXO DIGITAL



Nota: El mapa despliega los parámetros de calibración, determinados a nivel de subsubcuencas. Los parámetros K y Hsuelo deben considerarse parámetros iniciales. En el cuadro adjunto se encuentran los parámetros individuales (A, B, K, Hsuelo y Área) de cada subsubcuenca. Las subsubcuencas se agrupan en cuatro grupos, por tipo de suelo: arcilla limosa, limo arcilloso, tierra limosa y tierra arenosa, que se despliegan en color café, amarillo, rosado y verde, respectivamente. Los parámetros comunes por grupo (PorE, Hdcp, Khid, Scc, Scrt y Smin) se presentan en el cuadro superior. Todas las coberturas de este estudio se incluyen en un proyecto SIG llamado Resultados-SIMED-IX.mxd en el Archivo Digital.

	Arcilla limosa	Limo arcilloso	Tierra limosa	Tierra arenosa
PorE[*1]	0.423	0.432	0.486	0.434
Hdcp[mm]	290	273	167	100
Khid[mm/hr]	0.5 ± 2.0	2.0 ± 4.0	4.0 ± 6.5	6.5 ± 15.0
Scc[*1]	0.827	0.800	0.593	0.500
Scrt[*1]	0.528	0.510	0.404	0.356
Smin[*1]	0.380	0.380	0.310	0.291

COD_SUBC	09000	09100	09101	09102	09103	09104	09105	09106	09107	09108	09109	09110	09111	09112	09113	09114	09115	09116	09117	09118	09120	09121	09122	09123	09124	09125
Area (km2)	67.18	35.65	668.5	316.35	195.14	473.94	245.63	511.23	329.19	98.99	114.55	126.68	263.65	247.74	215.62	472.25	435.98	281.11	441.62	441.62	379.55	303.39	267.06	204.97		
Hsuelo (mm)	1600-3000	1600-3000	1600-3000	1600-3000	1600-3000	700-1500	700-1500	700-1500	700-1500	700-1500	1600-3000	700-1500	700-1500	700-1500	700-1500	1600-3000	1600-3000	1600-3000	1600-3000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	700-1500	700-1500	700-1500	
K (h)	35-60	35-60	35-60	35-60	35-60	60-200	60-200	60-200	60-200	60-200	35-60	60-200	60-200	60-200	60-200	35-60	35-60	35-60	35-60	60-200	20-35	20-35	20-35	60-200	60-200	60-200
Area (km2)	237.16	211.38	272.28	435.85	281.61	254.29	441.09	343.09	377.42	294.26	311.98	91.7	497.5	266.11	426.18	162.4	497.29	163.01	324.67	416.56	392.64	334.91	215.41	561.38	339.1	251.92
A	1.688	0.863	0.876	0.802	1.981	1.294	1.159	1.771	0.814	0.928	0.812	0.919	0.769	0.857	1.028	0.861	0.816	0.981	1.931	1.409	2.055	1.249	1.068	1.675	1.109	1.069
B	0.647	0.659	0.581	0.611	0.585	0.659	0.803	0.794	0.632	0.632	0.632	0.632	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.561	0.571	0.604	0.816	0.861	0.814	0.865	0.539
Hsuelo (mm)	700-1500	700-1500	700-1500	700-1500	4000-6000	700-1500	700-1500	4000-6000	700-1500	700-1500	700-1500	700-1500	1600-3000	1600-3000	1600-3000	1600-3000	1600-3000	1600-3000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	700-1500	4000-6000	4000-6000	
K (h)	60-200	60-200	60-200	60-200	20-35	60-200	60-200	20-35	60-200	60-200	60-200	60-200	35-60	35-60	35-60	35-60	35-60	35-60	20-35	20-35	20-35	20-35	20-35	60-200	60-200	60-200
Area (km2)	09111	09112	09113	09114	09115	09116	09117	09118	09119	09120	09121	09122	09123	09124	09125	09126	09127	09128	09129	09130	09131	09132	09133	09134	09135	09136
A	0.904	1.577	1.439	1.199	1.995	1.507	1.926	0.881	0.739	1.082	0.805	1.099	1.021	1.031	1.433	0.961	1.108	0.836	0.696	0.608	0.515	1.124	1.258	1.363	1.061	0.875
B	0.683	0.682	0.752	0.751	0.589	0.777	0.846	0.810	0.848	0.859	0.855	0.865	0.632	0.865	0.865	0.865	0.865	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820
Hsuelo (mm)	4000-6000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	4000-6000	700-1500	700-1500	700-1500	700-1500	700-1500	1600-3000	1600-3000	1600-3000	700-1500	700-1500	1600-3000	1600-3000	1600-3000	1600-3000	700-1500	1600-3000
K (h)	20-35	20-35	20-35	20-35	20-35	20-35	20-35	20-35	20-35	60-200	60-200	60-200	60-200	60-200	60-200	35-60	60-200	35-60	60-200	60-200	60-200	60-200	60-200	60-200	60-200	60-200

Fuente Cartográfica: Cartografía Regular I.G.M. 1:250.000.
Coordenadas UTM Wgs84

Leyenda

- Límite Regional
- Límite de Cuencas
- Ríos
- Esteros
- Quebradas
- Ciudades
- Lagos, Lagunas, Embalses
- Area no incluida en la zona de estudio
- ▲ Estación Evaporimétrica Seleccionada
- Estación Pluviométrica Seleccionada
- Estación Fluviométrica apta para Calibración
- Cuenca Seleccionada para Calibración
- Arcilla Limosa
- Limo Arcilloso
- Tierra Limosa
- Tierra Arenosa

MAPA DE UBICACION

REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DIVISION DE ESTUDIOS Y PLANIFICACION

LEVANTAMIENTO DE PARÁMETROS PARA LA MODELACION DE CUENCAS PLUVIALES NO CONTROLADAS EN LA IX REGION

DIRECTOR GENERAL DE AGUAS Rodrigo Weisner L.	JEFE DIVISION DE ESTUDIOS Y PLANIFICACION Pedro Rivera I.	INSPECTOR FISCAL Ing. Miguel Angel Caro	EMPRESA CONSULTORA RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda
---	--	--	---

ESCALA (GRAFICA): 1:50,000

RESULTADOS: IX REGION DE LA ARAUCANIA

Nº DEL PLANO: 1 de 1

5550000
5600000
5650000
5700000
5750000
5800000

5550000
5600000
5650000
5700000
5750000
5800000

150000

200000

250000

300000

