

SIMULACION MATEMATICA DE LA FUSION NIVAL CON DISTINTOS ESCENARIOS CLIMATICOS EN LA CUENCA DEL RIO TUPUNGATO¹

Jorge A. Maza, Luis Fornero, Patricia M. López, Adrián Vargas A., José M. Zuluaga, Marcelo Toledo

Instituto Nacional del Agua -Centro Regional Andino
Belgrano (oeste) 210 (5500) Mendoza, Argentina
Telefax: 0261 428 8251 E-mail: cra@ina.gov.ar

RESUMEN

La disponibilidad crítica del recurso hídrico para las diversas actividades socioeconómicas del oasis del río Mendoza, que tiene 1.000.000 de habitantes y 65.000 ha de superficie agrícola irrigada, necesita de una planificación que contemple escenarios de largo plazo como lo es el cambio climático.

La cuenca de estudio es la del río Tupungato (1858 km² de superficie, 4251 m s.n.m. de altitud media), afluente del río Mendoza, ubicada a 70° longitud Oeste y 33° latitud Sur; el 70% de su escurrimiento superficial es por fusión nival.

La variación temporal de la cubierta nival se obtuvo con la aplicación del modelo morfoenergético distribuido NEVE (Universidad de Padova, Italia), previa calibración en base a dos imágenes LANDSAT-TM del período octubre 1997-marzo de 1998.

Se realizó un estudio regional de tendencias de temperatura y escurrimientos que permitió validar un ΔT por cambio climático, que fue aplicado a las temperaturas registradas en el exutorio de la cuenca, en el mencionado período.

Se aplicó el modelo SRM (U.S. Agricultural Research Service), basado en el método grado-día, para estimar la incidencia del cambio climático en el escurrimiento por fusión nival. Previamente SRM fue calibrado contemplando el hidrograma observado durante el período mencionado.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a methodology to simulate short, average and long term (climatic change) scenarios of the water resource availability for various uses such as agriculture, water supply, energy, recreation, etc. in the Mendoza River oasis, Argentina, where 1,000,000 inhabitants live and 65,000 ha of crops are intensively irrigated.

The study area is the Tupungato River basin (a tributary of the Mendoza River) and is located between 69°45' W and 70°10' W and between 32°35' S and 33°21' S. Its west boundary lies on the Andean mountain chain water boundary which is the border

¹ El presente trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto "Simulación Matemática de la Fusión Nival con Distintos Escenarios Climáticos en la Cuenca del Río Tupungato" con financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica (PICT 97 N° 07-00000-0725).

between Argentina and Chile. Tupungato basin area is 1,858 km² and its mean altitude is 4,251 m above sea level.

Any water resource study for use or control in the Andean zone has to take into account the snowmelt contribution to the direct runoff (70% in an average year) because of the less significant rainfall.

The methodology agrees with input data required by the SRM (U.S. Agricultural Research Service) and NEVE (University of Padova, Italy) models.

The basin morphological parameters were determined by using the digital terrain model WODITEM (University of Padova, Italy).

In order to obtain the snow coverage depletion curve two LANDSAT - TM and fifteen NOAA-AVHRR (LAC) images of the period October 1997 - March 1998 were geometrically and radiometrically calibrated and analysed.

The possible evidence of climate change and its severity on streamflow and related variables were analysed using the Mann-Kendall trend test and the Kendall slope estimator.

The SRM (degree-day method based algorithm) and NEVE (morphoenergetic distributed model) models were applied and calibrated using observed hydrographs.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	1
2.1. Modelo WODITEM	1
2.2. Modelo NEVE	2
2.2.1. Calibración	3
2.3. Modelo SRM	4
2.3.1. Calibración	5
2.4. Cambio climático	5
2.4.1. Información hidrometeorológica disponible y selección de variables.	5
2.4.2. Técnicas para identificación de tendencia.	6
2.4.3. Estimador de pendiente	7
2.4.4. Modelación del Cambio Climático	8
2.5. Corridas de NEVE y SRM con Cambio Climático	9
3. CONCLUSIONES	10
4. LISTA DE SÍMBOLOS	10
5. REFERENCIAS	11

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos en cuencas con aporte nival requiere de un profundo conocimiento de la hidrología de nieves y hielos. Dicho conocimiento presenta hoy en día importantes vacíos, los que deben ser investigados para alcanzar una comprensión cabal de los fenómenos y, posteriormente, desarrollar los procedimientos de estudio y diseño adecuados a las necesidades de la ingeniería.-

El presente trabajo expone un intento de producir una metodología que permita conformar escenarios de cambio climático en el mediano y largo plazo del recurso hídrico disponible para las diversas actividades socioeconómicas (agricultura, agua potable, hidroenergía, recreación, etc.) de la región irrigada por el río Mendoza, Argentina, la cual tiene una población de 1.000.000 de habitantes y 65.000 ha de producción agrícola bajo riego.

El área de estudio (Fig. 1) comprende la cuenca del río Tupungato (afluente del río Mendoza) que se ubica entre 69°45' y 70°10' de longitud Oeste y entre 32°35' y 33°21' de latitud Sur. El límite oeste de la cuenca se halla recostado sobre la divisoria de aguas de la cordillera andina que es a su vez límite entre Argentina y Chile. La superficie de la cuenca Tupungato es de 1858 km² y su altitud media es de 4251 m s.n.m.

Cualquier estudio destinado al aprovechamiento o control del recurso hídrico en la zona andina no puede prescindir de considerar la contribución por fusión nival al escurrimiento superficial directo (70% en el año medio).

El caudal base invernal está generado por el agua infiltrada y que aparece en las laderas de los cauces como aporte subsuperficial. El proceso de fusión nival comienza en la primavera (en la segunda quincena de setiembre o primeros días de octubre) y su finalización depende de la cobertura y espesor del manto nival, llegando en casos extremos a fines de marzo. Luego el hidrograma anual de escurrimiento está comprendido entre julio y junio del año siguiente produciéndose los caudales máximos a fines de diciembre o primeros días de enero.

La adopción de metodologías que aseguren la optimización de los pronósticos de caudales de los ríos tanto en calidad de las respuestas cuantitativas como en la rapidez de su disponibilidad, ocupa un lugar preponderante de las empresas que tienen a cargo la explotación de centrales hidroeléctricas.

Los aciertos que se logren por medio de dichos pronósticos (mayores semejanzas logradas entre los volúmenes previstos en cantidad, secuencia y oportunidad con los realmente ocurridos) significarán utilizar con propiedad los recursos hidráulicos disponibles, al tiempo que permitirán un sustancial ahorro de divisas.

Por otra parte la simulación con parámetros que reflejan de algún modo el cambio climático va a proveer a los organismos gubernamentales de un elemento de previsión y planificación a largo plazo sobre la utilización del recurso hídrico que tiene características de estratégico para la región.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Modelo WODITEM

En base a un modelo digital de terreno WODITEM (CaZorzi, F., 1993) se determinan los parámetros morfométricos de la cuenca.

A partir de cartas planialtimétricas se confeccionó la base de datos mediante digitalización. La información en soporte magnético fue directamente utilizada por medio del Modelo Digital de Terreno WODITEM (**W**atershed **O**riented **D**igital **T**errain **M**odel) para la determinación directa de las principales características morfométricas de las cuencas: hipsometría, exposición y pendiente (Figs. 2, 3 y 4), de aplicación en el modelo de fusión nival. WODITEM permite incorporar además otros temas como por ejemplo: red de drenaje, contornos de cuencas y subcuencas, cobertura vegetal o nival, etc.

La información de áreas cubiertas de nieve fue cruzada con el análisis morfométrico de las cuencas pudiéndose inferir la influencia topográfica en la fusión nival. (ver Anexo I)

2.2. Modelo NEVE

La mayor parte de la radiación incidente es una fracción de la radiación astronómica, reducida por los fenómenos de reflexión, difusión y absorción de la atmósfera y reducida también por la morfología local. Los factores de reducción atmosférica son ampliamente variables aleatorias ya que están vinculados a la evolución del tiempo atmosférico y específicamente a la nubosidad. Es virtualmente imposible tener en cuenta estas variaciones sin las mediciones de radiación solar. En este modelo solo se tiene en cuenta la reducción para la condición de cielo límpido, basado en el ángulo de altitud solar en la profundidad óptica de la atmósfera. Es decir que los factores de reducción morfométrica varían en un ciclo anual y pueden ser calculados con algoritmos ampliamente difundidos. La magnitud y la variación espacial y temporal de la reducción morfométrica están enfatizadas por la accidentada orografía.

El modelo NEVE (CaZorzi, 1999) calcula el movimiento aparente del sol y reduce la componente directa de la radiación de cielo límpido calculando la interacción del modelo solar con cada elemento del modelo digital de terreno (WODITEM), en intervalos de 30 minutos y teniendo en cuenta la altura, orientación, pendiente y efecto de sombra de cada elemento. Luego el modelo adiciona la componente difusa, reducida por el factor de visión del cielo del elemento.

El procedimiento permite producir mapas en formato raster de energía potencial (en Joules) acumulados sobre un período dado (desde 30 minutos a un año). Cada valor de cada mapa es entonces dividido por el número de días comprendido en el período del mapa, obteniendo mapas de energía potencial media diaria. Los valores contenidos en cada mapa (en MJoules/m²/día) son utilizados por el modelo nival como índices energéticos (EI) de la variabilidad local de la energía disponible para la fusión nival.

En concordancia con los principios básicos mencionados, el algoritmo clave adoptado para el cálculo del valor de fusión nival distribuida resulta ser muy simple. Para cada paso de tiempo (hora) y para cada elemento raster, el valor de fusión durante el día (6-18 horas) se calcula como:

$$MELTd_{h,j} = CMF \cdot EI_j \cdot T_{h,j} \quad (1)$$

donde MELT $d_{h,j}$ es el valor de fusión en mm hr⁻¹ para el elemento j, CMF es el factor combinado de fusión, EI_j es el índice energético del elemento j y T_{h,j} (°C) es la temperatura del aire a la altitud del elemento. El CMF (mm °C⁻¹ EI⁻¹ hr⁻¹) es prácticamente el único parámetro de calibración significativo.

La temperatura se calcula, para cada elemento, extrapolando la temperatura horaria suministrada como dato de entrada a una altitud dada, por medio de un valor de gradiente también dado.

Durante la noche (18 - 6 Hrs) la fusión nival se calcula como:

$$MELTn_{h,j} = CMF \cdot \min(EI) \cdot T_{h,j} \quad (2)$$

El valor mínimo de EI se extrae del mapa actual y se usa para todos los elementos. El bajo valor de fusión durante la noche es una consecuencia de la reducción de energía disponible. En este contexto el papel de EI es despreciable y la temperatura del aire se convierte en el dominante en el proceso de intercambio energético. El producto de CMF por un valor fijo de EI puede considerarse como un factor de fusión y la ecuación resulta en el clásico método del grado-día.

Uno de los mayores problemas de los modelos es la determinación cierta de la cantidad de precipitación nival a escala de cuenca. El problema involucra la definición del estado de precipitación (lluvia o nieve) y la evaluación del déficit de nieve precipitada medida por el sensor. Para tener en cuenta esto último se aplica un factor de corrección (SCF).

El modelo utiliza el dato de pluviómetro, en vez de la inicialización con el valor de equivalente agua de nieve (SWE) al comienzo de la temporada de fusión, debido a que esta situación requiere una estimación muy real del valor máximo de SWE, lo cual no es fácil de obtener a nivel de escala de cuenca.

El modelo opera a intervalo horario pero el ciclo mínimo es un día, aunque no se han fijado límites para las fechas de inicio y finalización. El conjunto de datos de entrada consiste de archivos de precipitación horaria, temperatura horaria y gradiente de temperatura también horario. El conjunto de datos espaciales se completa con el mapa de altitudes (DTM), el mapa de valores iniciales de SWE y por la secuencia de cinco mapas de EI (21 de junio (solsticio de invierno) al 15 de agosto, 15 de agosto al 15 de setiembre, 15 de setiembre al 15 de octubre, 15 de octubre al 15 de noviembre y 15 de noviembre al 15 de diciembre).

El modelo produce como salida una secuencia de mapas de SWE, que coinciden con mapas de área cubierta de nieve (SCA), y fusión nival acumulada en fechas que el usuario selecciona. También produce archivos con valores medios horarios para toda la cuenca de SWE, fusión nival, lluvia y precipitación nival.

2.2.1. Calibración

El modelo NEVE fue calibrado en base a imágenes LANDSAT TM (15/12/97 y 15/03/98) (Figs. 5, 6 y 7) y NOAA (14/08/97, 16/08/97, 06/09/97, 21/10/97, 13/11/97 y 26/12/97) (figs. 8, 9 y 10) (ver Anexo II).

Como se puede observar en la figura 11 un $CMF = 0.005$ ajusta con la imagen LANDSAT TM del 15/12/97 y un $CMF = 0.010$ ajusta con las imágenes NOAA mencionadas. También es notable que el modelo genera las SCA (Figs.12 y 13) con una forma que es sugestivamente parecida a la observada con los sensores remotos.

Esta diferencia de SCA que existe entre ambos tipos de sensores remotos se explica en el tamaño del píxel de cada uno: LANDSAT TM 30 m y NOAA 1 km y en que, como se puede observar en la figura 14, para una SCA de 50% y un píxel de 1 km la cantidad de elementos puros es de 30% mientras que, para igual SCA pero con píxel de 30 m, la cantidad de elementos puros es de 80% (Baumgartener, M.F. et al, 1987).

En consecuencia ante la certeza de la precisión fue adoptada la calibración realizada con LANDSAT TM es decir para un $CMF = 0.005$.

También en base a las determinaciones mencionadas se realizaron análisis de sensibilidad del parámetro CMF ante el cambio de SCA (Figs. 15 y 16). Se puede observar que la sensibilidad de cambio de SCA ante el cambio de CMF es máximo para SCA entre 40% y 50%.

Dado que una de las salidas de NEVE es el área cubierta de nieve (Figs. 12 y 13), se obtuvo para cada zona de elevación del modelo SRM (fig 17) un valor de SCA cada 15 días (Fig. 18), que luego fue dato de entrada al modelo SRM.

2.3. Modelo SRM

El modelo SRM (Martinec et al., 1994) es de tipo determinístico y de simulación continua. Sus parámetros pueden aplicarse en forma distribuida hasta en 8 zonas de diferente elevación. SRM produce el hidrograma de escurrimiento por fusión nival con caudales medios diarios calculados en base a un simple algoritmo:

$$Q_d = \sum_{z=1}^{nzone} \left\{ c_{dz} \left[MF_{dz} \left[(DD_d + \Delta T_{dz}) SCA_{dz} + P_{dz} \right] \frac{0.01 \cdot A_z}{86400} \right] (1 - K_d) + Q_{d-1} K_d \right\} \quad (3)$$

donde:

Q = caudal medio diario en m³/s

c = coeficiente de escurrimiento

MF = factor grado-día en cm/°C día

DD = número de grados-día en °C día

ΔT = diferencia de temperatura debido a la diferencia en altitud entre la estación de medición y la altura media hipsométrica de la zona z.

SCA = proporción de área cubierta de nieve sobre el área total de la zona z

P = precipitación que contribuye al escurrimiento en cm

A = área de la zona en m²

K = coeficiente de recesión calculado como Q_{d+1} / Q_d durante un período de recesión

n = secuencia de días durante el período de cálculo. En la ecuación planteada los grados-día del día d corresponden a la descarga del día d+1. El modelo admite coeficientes de corrección cuando el retardo de la cuenca (lag) es distinto a éste.

z = suscripto que indica las zonas en la que está subdividida la cuenca (admite hasta 8 zonas).

En esta ecuación DD, SCA y P son variables que se miden o determinan cada día, mientras que c, MF, K y ΔT son parámetros que caracterizan a una determinada cuenca y/o clima y que son evaluados a priori por medio de datos reales, observaciones o por analogía con otras cuencas. Además se requiere la curva área-elevación para determinar las diferencias en altitud y poder extrapolar temperatura.

El modelo puede operarse en modo de simulación, donde el escurrimiento calculado es comparado con el observado, o en modo pronóstico donde el escurrimiento calculado es ajustado cada día usando valores observados de escurrimiento.

SRM ha sido utilizado por varios institutos, universidades y agencias en más de 24 cuencas de 11 países variables en área desde 0,77 a 4.000 km² y en elevación desde 171 a 7000 m s.n.m.

El manual del usuario de SRM (Martinec et al., 1999) recomienda subdividir la cuenca en zonas por bandas de elevación de 500 m cada una como máximo (Fig. 17). Esta limitación responde a la elevada sensibilidad del modelo frente a las variaciones del gradiente de temperatura. Sin embargo en una misma zona pueden coexistir distintas características fisiográficas o de uso del

suelo que hagan inconveniente adoptar parámetros medios para toda la zona. En este sentido es apropiado el uso de modelos digitales de terreno y de sistemas de información geográfica.

Como se aprecia, lo novedoso del modelo, es la incorporación como variable, del área cubierta de nieve (SCA), ya que existe una relación funcional durante el período de fusión entre SCA y el escurrimiento acumulado, y que las curvas de decaimiento de SCA son útiles para determinar en tiempo y magnitud los picos de fusión nival.

2.3.1. Calibración

Debido a la notable coincidencia del hidrograma de escurrimiento del año 1981-82 con el del 1997-98 (Fig. 19) y de las características hidrometeorológicas (Figs. 20, 21 y 22) se utilizaron los parámetros encontrados con motivo de la calibración de aquél período (Maza et al, 1990). El SRM fue calibrado contemplando solamente la determinación de los valores de coeficiente grado-día (Fig. 23) obteniéndose un buen ajuste ($R^2=0,84$) (Fig. 24).

2.4. Cambio climático

El Intergovernmental Panel on Climate Change (1997) señala que la actividad humana está alterando, de forma directa e indirecta, la concentración de los gases de efecto invernadero y de los aerosoles, los cuales influyen y son influenciados por el clima.

Los cambios en las condiciones climáticas debidos al aumento de las concentraciones de estos gases, tendrán consecuencias importantes en el balance hídrico.

La capacidad para prever el comportamiento futuro del escurrimiento y de la recarga, teniendo en cuenta el escenario de calentamiento global, ayudará a determinar y cuantificar impactos potenciales en el recurso hídrico disponible para el uso humano y de los ecosistemas.

Con el propósito de investigar los posibles efectos de cambio de los patrones climáticos en los eventos hidrológicos de la cuenca del río Tupungato se analizaron las series de tiempo disponibles en la región para estudiar la existencia de tendencias (ver Anexo III).

2.4.1. Información hidrometeorológica disponible y selección de variables.

Algunas variables del ciclo hidrológico: precipitación, evapotranspiración y escurrimiento, se verán afectadas debido a la variación de la temperatura y de otros parámetros meteorológicos.

El análisis de las mediciones de caudal es importante porque éstos representan la respuesta integrada de las variables de entrada a la cuenca y proporcionan una buena cobertura espacial de los procesos hidrológicos. Además, proveen una estimación del alcance del impacto del cambio climático en los recursos hídricos.

Existen varias pautas a tener en cuenta en estudios de determinación de tendencia y patrones en series de tiempo, la recomendación más importante es con respecto a la longitud de los registros.

Las series extensas son esenciales para determinar la existencia y tasa de cambio en las mismas. En el caso particular de los registros de caudal, éstos no deben presentar influencias antrópicas.

En base a estas consideraciones, se decidió seleccionar para el análisis series de no menos de 30 años de registro, con no más del 25% de datos faltantes y de valores nulos y con no más de dos años consecutivos de datos faltantes.

La información disponible para la cuenca es:

Tabla 1

Estación	Altitud (m)	Variable	Escala	Registro
Punta de Vacas	2430	Caudal	Diaria	1954/98
		Temperatura	Diaria	1982/85 - 1993/98
Cristo Redentor	3832	Temperatura	Diaria	1961/84
Toscas	3000	SWE	Anual	1954/96

Los registros de temperatura, en la cuenca y en localidades relativamente próximas como Uspallata y Puente de Inca, no satisfacían las pautas fijadas para el análisis, por lo tanto se decidió utilizar la serie de Chacras de Coria que cuenta con datos completos en el período 1961-1997.

Los resultados obtenidos del análisis mencionado no pueden ser directamente extrapolados, ya que esta estación se encuentra bastante alejada de la zona en estudio, pero proporcionan información general sobre la tendencia de las temperaturas a nivel regional.

Se seleccionaron siete variables hidrológicas para ser analizadas: a) caudal máximo, b) caudal mínimo, c) caudal medio anual, d) caudal promedio período octubre - marzo, e) caudal medio mensual, f) día Juliano correspondiente al caudal máximo por fusión y g) equivalente agua nieve (SWE).

La variable correspondiente al día Juliano de producción del caudal máximo por fusión fue considerada a fin de tener en cuenta los efectos producidos por las variaciones de temperatura no solo en las magnitudes de los eventos hidrológicos sino también en la frecuencia y aparición de los mismos.

2.4.2. Técnicas para identificación de tendencia.

Para la determinación de tendencia en las series de tiempo mencionadas anteriormente se propuso utilizar el test estadístico no-paramétrico de Mann-Kendall.

Esta técnica tiene como propósito detectar la existencia de tendencia monótona o cambio (gradual o súbito), durante un intervalo de tiempo, sin determinar el momento de ocurrencia del cambio.

Este test ha sido presentado por otros investigadores como una buena herramienta para el análisis de variables hidrológicas y otras variables relacionadas (Hirsch et al., 1982 ; Westmacott y Burn, 1997).

La hipótesis nula H_0 establece que los datos (x_1, \dots, x_n) son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas. La hipótesis H_1 de alternativa bidireccional es que las distribuciones de x_k y x_j no son idénticas para todo $k, j \leq n$ y $k \neq j$.

El estadístico S de Mann-Kendall está definido como:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

donde

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \text{si } \theta < 0 \end{cases}$$

Se demuestra que bajo H_0 la distribución de S es asintóticamente $N(0, \sigma_S^2)$ cuando n es grande (Hirsch et al., 1982), en consecuencia se puede asociar el valor del estadístico al de la variable normal estandarizada Z y calcular el nivel de significación que es la probabilidad de obtener el valor observado de S cuando en realidad no existe tendencia.

Para las series autocorrelacionadas se propuso utilizar una modificación robusta del test (Hamed y Rao, 1998) a fin de evitar el efecto de la correlación serial en la probabilidad de detección de tendencia.

2.4.3. Estimador de pendiente

En las series que presentan tendencia es importante estimar la magnitud de la misma. Una forma de expresar esta magnitud es mediante la pendiente, es decir cambio por unidad de tiempo, lo que no implica suponer que la tendencia es lineal en la media del proceso.

Este estimador no-paramétrico propuesto por Hirsch et al. (1982) es robusto, insesgado y posee menor varianza para el caso de series de tiempo que presentan estacionalidad, asimetría y correlación serial.

El estimador de pendiente B se define como:

$$B = \text{Mediana} \left\{ \frac{x_j - x_k}{j - k} \right\}_{1 \leq k < j \leq n}$$

y está relacionado con el test de Mann-Kendall mediante su signo. Un valor positivo o negativo de B indica una tendencia creciente o decreciente, respectivamente.

En este estudio se calculó B para aquellas series que presentaron un valor de significación menor del 10%.

Los resultados del estudio, valores de la variable estandarizada Z asociado al estadístico del test, el nivel de significación bidireccional de la tendencia (valor- p) y el estimador de pendiente, para las series analizadas, se presentan en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Resultados de la prueba Mann-Kendall

Variable	Z	Valor -p (%)	B (m ³ /s año)
Caudal Medio Anual	2,59	0,93	0,20
Caudal Máximo	0,84	39,85	
Caudal Mínimo	2,84	0,45	0,05
Caudal promedio Oct-Mar	2,38	1,73	0,32
Día Juliano Caudal Máximo	-1,12	26,27	
SWN (Toscas)	0,28	77,95	

Tabla 3. Resultados de la prueba Mann-Kendall valores medios mensuales

		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Caudales	Z	1,89	2,27	3,33	3,05	2,57	1,94	1,77	2,26	1,51	1,49	1,48	2,03
Punta de Vacas	Valor-p (%)	5,88	2,32	0,09	0,23	1,02	5,24	7,61	2,38	13,01	13,40	13,99	4,24
	B (m ³ /s año)	0,49	0,41	0,35	0,13	0,07	0,04	0,05	0,05				0,41
Temperat.	Z	1,69	2,01	3,05	-0,34	-0,30	0,03	-1,65	0,04	1,13	2,73	2,04	2,56
Chacras de Coria	Valor-p (%)	9,08	4,43	0,16	73,39	76,42	97,61	9,89	96,81	25,85	0,63	4,14	1,05
	B (°C/año)	0,06	0,03	0,06				-0,03			0,05	0,07	0,08

Los resultados indican, para un nivel de significación del 5%, una tendencia creciente para la variable temperatura en los meses de enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre y para los valores máximos anuales.

La variable caudal presenta la misma tendencia para los meses de febrero, marzo, abril, mayo, agosto y diciembre y para los valores medio anual, mínimo y promedio octubre - marzo.

2.4.4. Modelación del Cambio Climático

Con el propósito de determinar las consecuencias del cambio climático en la región se seleccionó un escenario que considera una perturbación en el balance de energía del sistema superficie - troposfera debida al aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero del 1% por año a partir de 1990. Este escenario (IS92a) representa una situación media de emisiones en el marco de un aumento de población de 11.3×10^9 al 2100, un crecimiento económico promedio del 2.3% por año entre 1990 y 2100 y considerando usos combinados de fuentes de energía convencionales y renovables.

Las variaciones de temperatura producidas por este escenario fueron obtenidas de las simulaciones del modelo HadCM2 (Hadley Centre Coupled Model versión 2, 1994) (Viner, D., M. Hulme, 1997).

Este es un modelo climático global acoplado océano - atmósfera desarrollado por el Hadley Centre for Climate Prediction and Research (Reino Unido) con una resolución espacial de 2,5° x 3,5° (Latitud x Longitud) dando una cobertura aproximada de 417 x 278 km. El HadCM2 utiliza todos los gases de efecto invernadero combinados como concentración equivalente de CO₂.

Los valores medios mensuales de temperatura, producidos por el modelo para la celda que contiene a la localidad Punta de Vacas, para el período 1961-1990 y los cambios medios de esta variable para el período 2010-2039 (Tabla 4 y fig 25), fueron obtenidos del Centro de Distribución de Datos del IPCC (http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/visualisation/visual_index.html) y a través de corridas previas de los modelos MAGICC (Model for the Assessment for the Greenhouse-gas Induced Climate Change) (figs 26 y 27) y SCENGEN (A Global and Regional Climate Change Scenario Generator) (Fig.28) ambos del Climate Research Unit, University of East Anglia de Inglaterra. Estos modelos son de menor resolución en la zona de América del Sur (5° Lat x 5° Long).

Tabla 4

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Temperatura media en el período 1961-90 (°C)	11,8	6,8	3,6	3,3	4,0	6,5	11,0	15,4	19,4	19,7	20,1	16,6
Cambio de temperatura (ΔT) en el período 2010-39 (°C)	1,2	1,1	1,2	0,4	1,1	1,2	1,2	1,4	1,4	1,9	1,0	1,4
Promedio estac. de ΔT	1,0						1,4					

Los resultados se utilizaron para definir un incremento de temperatura $\Delta T < 2^\circ\text{C}$ a aplicar en la estación Punta de Vacas que se encuentra en la salida de la cuenca.

Es de aclarar, en base a la bibliografía consultada (Canziani, 1997), que es factible que el cambio climático produzca una disminución de la precipitación nival en la región andina cuyana e incluso un retroceso pronunciado de glaciares. Sin embargo esta hipótesis no ha sido contemplada en el presente estudio.

2.5. Corridas de NEVE y SRM con Cambio Climático

Con los valores de cambio climático de la Tabla 4 se realizaron las siguientes simulaciones:

- Al modelo NEVE se le corrigió la temperatura con los ΔT y se corrió con el objeto de obtener las curvas de SCA que se producirían con el cambio climático.
- Al modelo SRM se le introdujo el ΔT y generó, a partir de las curvas de SCA producidas por NEVE sin cambio climático, otras curvas de SCA correspondientes al cambio climático y el pertinente hidrograma de escurrimiento.

En las figuras 18, 29 y 30 se pueden apreciar las curvas de SCA producidas por las aplicaciones descritas en a) y b). Es notable la congruencia de las curvas de SCA determinadas por NEVE y SCA con cambio climático en las zonas 2, 3 y 4. Las diferencias en las zonas 1 (la más baja) y 5 (la más alta) se explican en el hecho de que son las zonas más sensibles a la fusión y es donde se refleja la diferencia de precisión de ambos modelos:

- Al modelo NEVE se le introduce el cambio climático mensualmente.
- Al modelo SRM se le introduce el cambio climático para todo el período invernal (01/04 – 30/09) y para todo el período estival (01/10 – 31/03).

3. CONCLUSIONES

Se han utilizado tres modelos de simulación (WODITEM, NEVE y SRM) acoplado sus resultados y entradas de datos logrando una metodología de trabajo (Fig. 31) que resultó útil a los objetivos preestablecidos.

Las series de tiempo relacionadas con la variable caudal mostraron una tendencia creciente estadísticamente significativa que puede ser considerada como una indicación de cambio climático en la zona.

Son necesarios estudios adicionales y aumento de la mediciones de temperatura y de variables relacionadas con ésta a fin de evaluar la hipótesis de cambio climático y de estimar el impacto del calentamiento global en regiones en las cuales la función respuesta de la cuenca está dada por fusión nival y glaciario, como es el caso de los ríos del territorio mendocino.

Se aplicaron NEVE y SRM obteniéndose hidrogramas (Fig. 32) que manifiestan el cambio climático frente al observado en 1997-98 (Tabla 5). El modelo supone que existe equivalente de agua de nieve suficiente para alimentar la fusión resultante.

Tabla 5

Hidrograma	Caudal Pico (m³/s)	Volumen (hm³)
Observado (1997-98)	68,8	469,56
Con Cambio Climático	67,8	480,84
Porcentaje de Variación (%)	1,5	2,40

La figura 31 demuestra que el cambio climático hace que se produzca una fusión temprana manteniéndose el orden de los caudales máximos, lo cual es bastante elocuente para significar la importancia que deberá tener, en cualquier estudio hidrológico destinado a la evaluación de disponibilidad del recurso o de determinación de crecidas de proyecto, la hipótesis de cambio climático.

4. LISTA DE SÍMBOLOS

- $N(0, \sigma_s^2)$: distribución de probabilidades normal con media cero y varianza σ_s^2
 σ_s^2 : varianza de S
 ΔT : diferencia de temperatura debido a la diferencia en altitud entre la estación de medición y la altura media hipsométrica de la zona z.
A : área de la zona en m²
B : estimador no paramétrico de pendiente
c : coeficiente de escurrimiento
d : secuencia de días durante el período de cálculo. En la ecuación planteada los grados-día del día d-1 corresponden a la descarga del día d.
DD: número de grados-día en °C día

DTM:	modelo digital de terreno
H_0 :	hipótesis nula del test
H_1 :	hipótesis alternativa del test
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change
K :	coeficiente de recesión calculado como Q_d / Q_{d-1} durante un período de recesión
MF:	factor grado-día en $\text{cm}/^\circ\text{C}$ día
P :	precipitación que contribuye al escurrimiento en cm
Q :	caudal medio diario en m^3/s
SCA:	proporción de área cubierta de nieve sobre el área total de la zona z
S :	estadístico test Mann-Kendall
<i>Sgn</i> :	función signo
SWE:	equivalente agua nieve
Valor- <i>p</i> :	nivel de significación bidireccional de la tendencia
X :	variable aleatoria
z :	suscripto que indica las zonas en la que está subdividida la cuenca
Z :	variable aleatoria normal estandarizada

5. REFERENCIAS

- Boumgartner, M.f., K. Sendel, J. Martinec.** "Toward Snowmelt Runoff Forecast Based on Multisensor Remote-Sensing". Information I:E:E:E: Transaction on Geoscience and Remote Sensing. Vol. GE-25, N° 6, november 1987
- Canziani, O.** (director del estudio), 1997 "Vulnerabilidad de los oasis comprendidos entre 29° S y 36° S ante condiciones más secas en los Andes altos". Inventario de gases de efecto invernadero y estudios de vulnerabilidad y mitigación frente al cambio climático en la Argentina. Proyecto Arg/95/g31-PNUD-SECyT, Buenos Aires.
- CaZorzi, F.** (1993). "Watershed Oriented Digital TErrain Model: User's manual". Department of Land and Agro-Forest environment, University of Padova, Internal Report, 136 pp.
- CaZorzi, F.** (1999) "Modello NEVE. Modelo morfoenergetico distribuito. Manuale per l'utente". Laboratorio I.D.E.A., Universita di Padova.
- CaZorzi, F., G. Dalla Fontana, J. Maza** (1992) Snow Hydrology Investigations in High Mountain Watersheds of Andes. EEC Program: S.T.D. Analysis of regional water resources and their management by means of numerical models and satellite remote sensing in Mendoza, Argentina.
- Hamed, K.H., A:R: Rao** (1998) A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. Journal of Hydrology, 204, 182-196.
- Hirsch, R.M., J.R. Slack, R.A. Smith,** 1982. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. Water Resources Research, 18 (1), 107-121.
- Intergovernmental Panel on Climate Change,** 1997. An Introduction to Simple Climate Models Used in the IPCC Second Assessment Report. WMO/UNEP. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Griggs, D.J., Maskell, K. (Eds.).
- Martinec J., A. Rango, R. Roberts,** (1994) "Snowmelt Runoff Model (SRM). User's Manual". Edited by M.F. Baumgartner, Department of Geography-Univ. of Bern.
- Martinec J., A. Rango, R. Roberts, E. Gómez-Landesa,** (1999) "Snowmelt Runoff Model (SRM). Modelo de Escorrentía de Fusión de Nieves. Manual del Usuario". Edición en castellano.

Traducción de la edición revisada 1998, Versión 4.0. Hydrology Laboratory, Beltsville Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture.

Maza, J.; O. Roby, P. Fernández, L. Fornero y D. Tarántola. (1990) "Modelling Snowmelt Runoff with Remote Sensing and GIS in Andean Watersheds" Pág. 191 a 200 de Proceedings of International Symposium on Remote Sensing and Water Resources, Enschede - Holanda.

Maza, J.; O. Roby y L. Fornero. (1990) "Simulación Matemática del escurrimiento por fusión Nival en la Cordillera Andina" pág. 122 a 136 de Memorias del XIV Congreso Nacional del Agua, Tomo I. Córdoba - Argentina.

Menenti, M. (1986) Hydrological Aspects of Mendoza-Argentina Satellite Images and Numerical Modelling. ICW. Wageningen - The Netherlands.

Viner, D., M. Hulme, 1997. The Climate Impacts LINK Project: Applying Results from the Hadley Centre's. Climate Change Experiments for Climate Change Impact Assessments. Climate Research Unit. University of East Anglia, Norwich. U.K.

Westmacott, J.R., D.H. Burn, 1997. Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Churchill-Nelson River Basin. Journal of Hydrology, 202, 263-279.

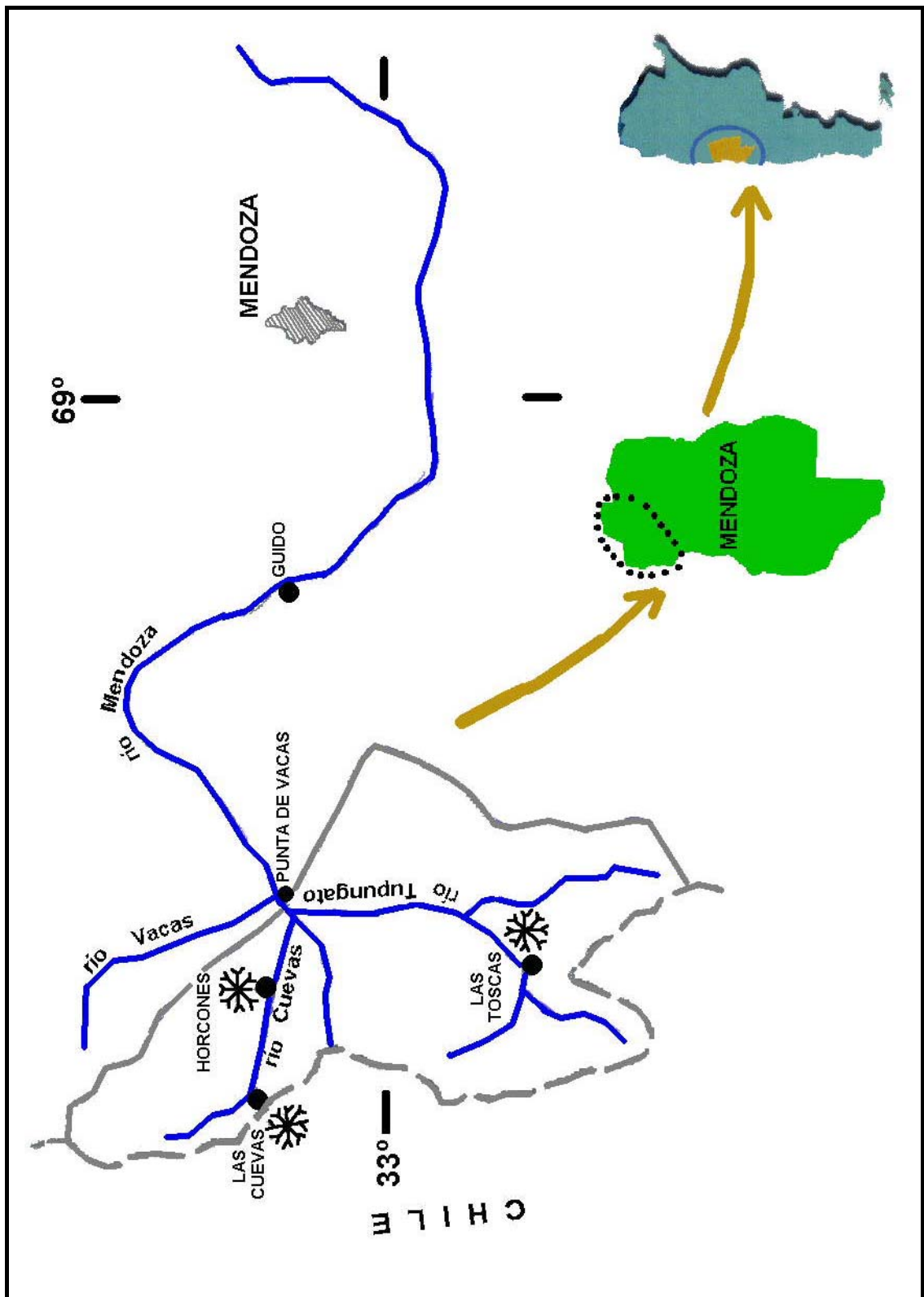


Figura 1 . Croquis de ubicación

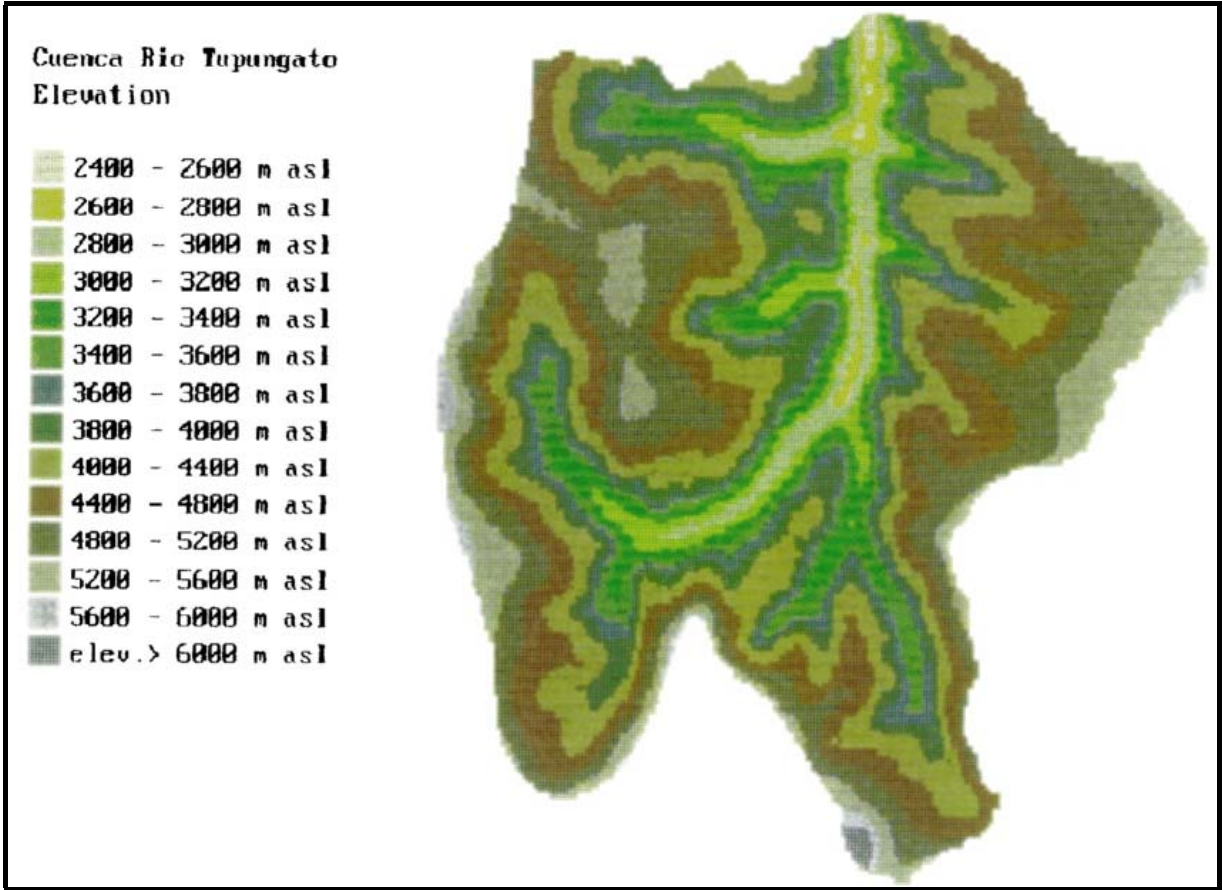


Figura 2 Mapa hipsométrico (WODITEM)

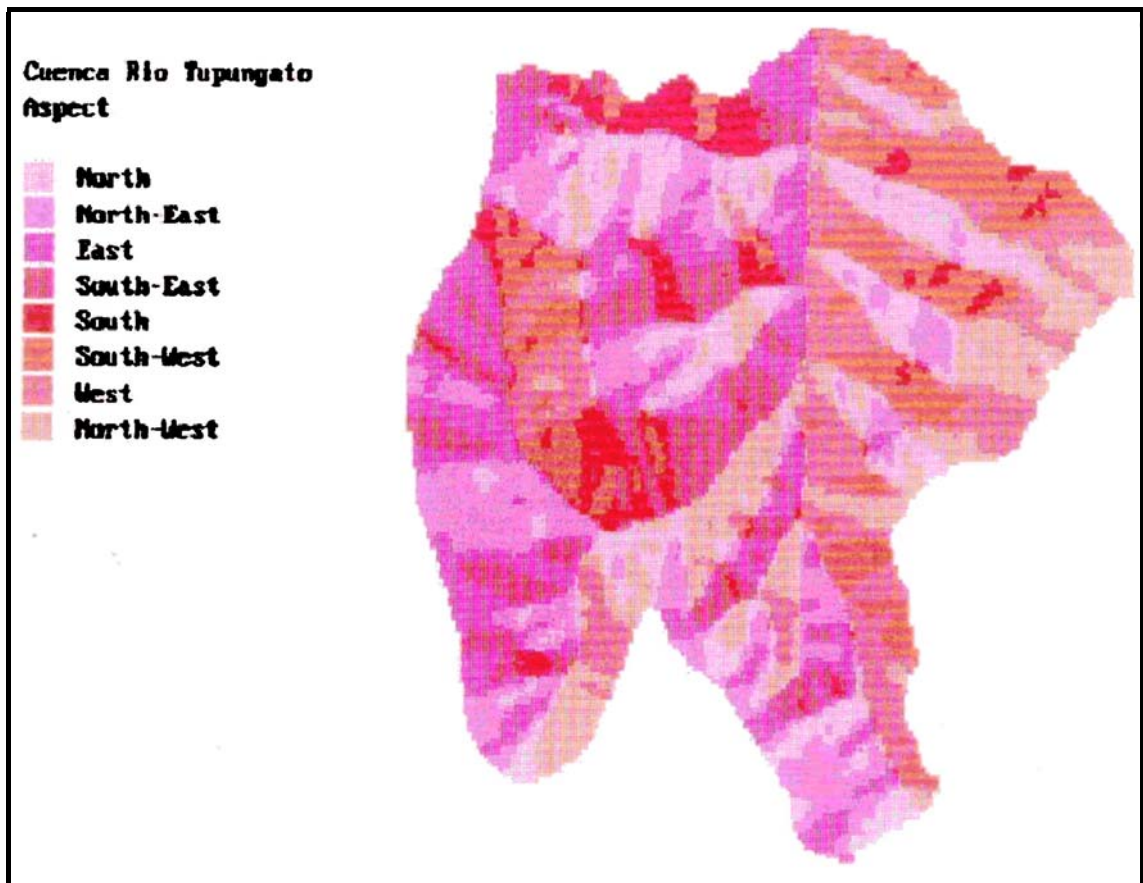


Figura 3. Mapa de exposición de laderas (WODITEM)

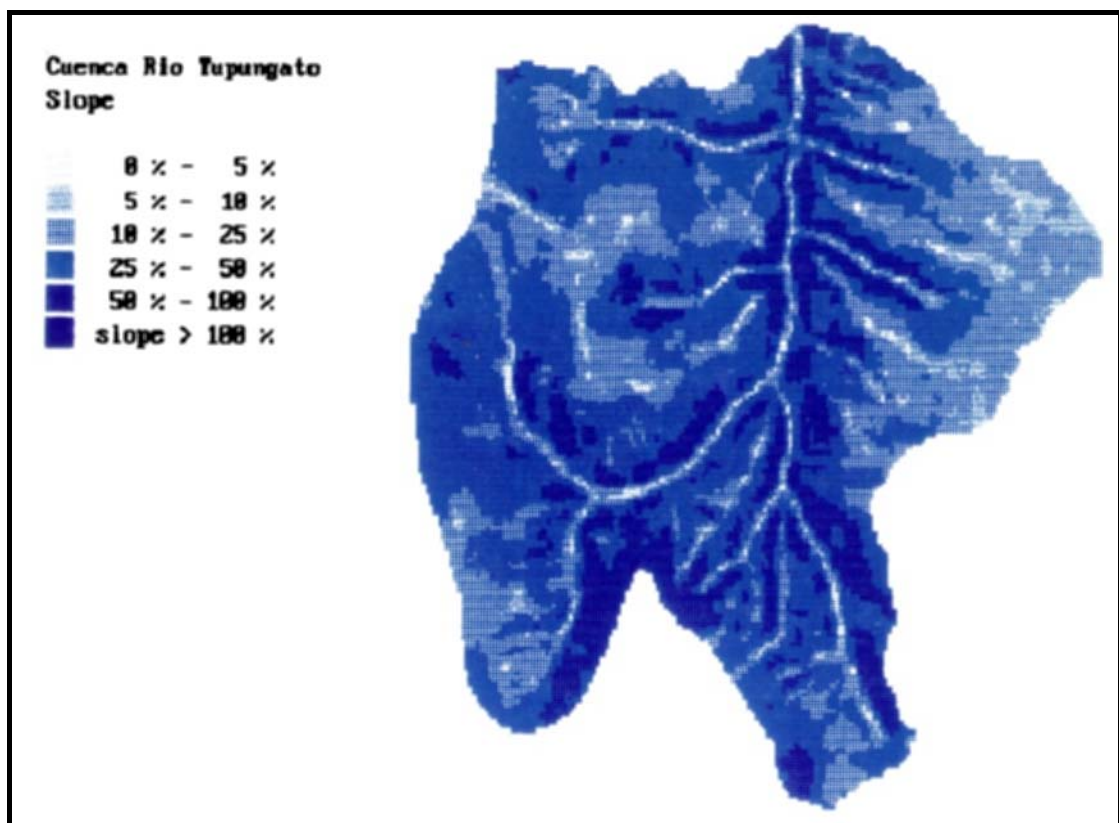


Figura 4. Mapa de pendientes (WODITEM)

IMAGEN LANDSAT 15/12/97



Figura 5

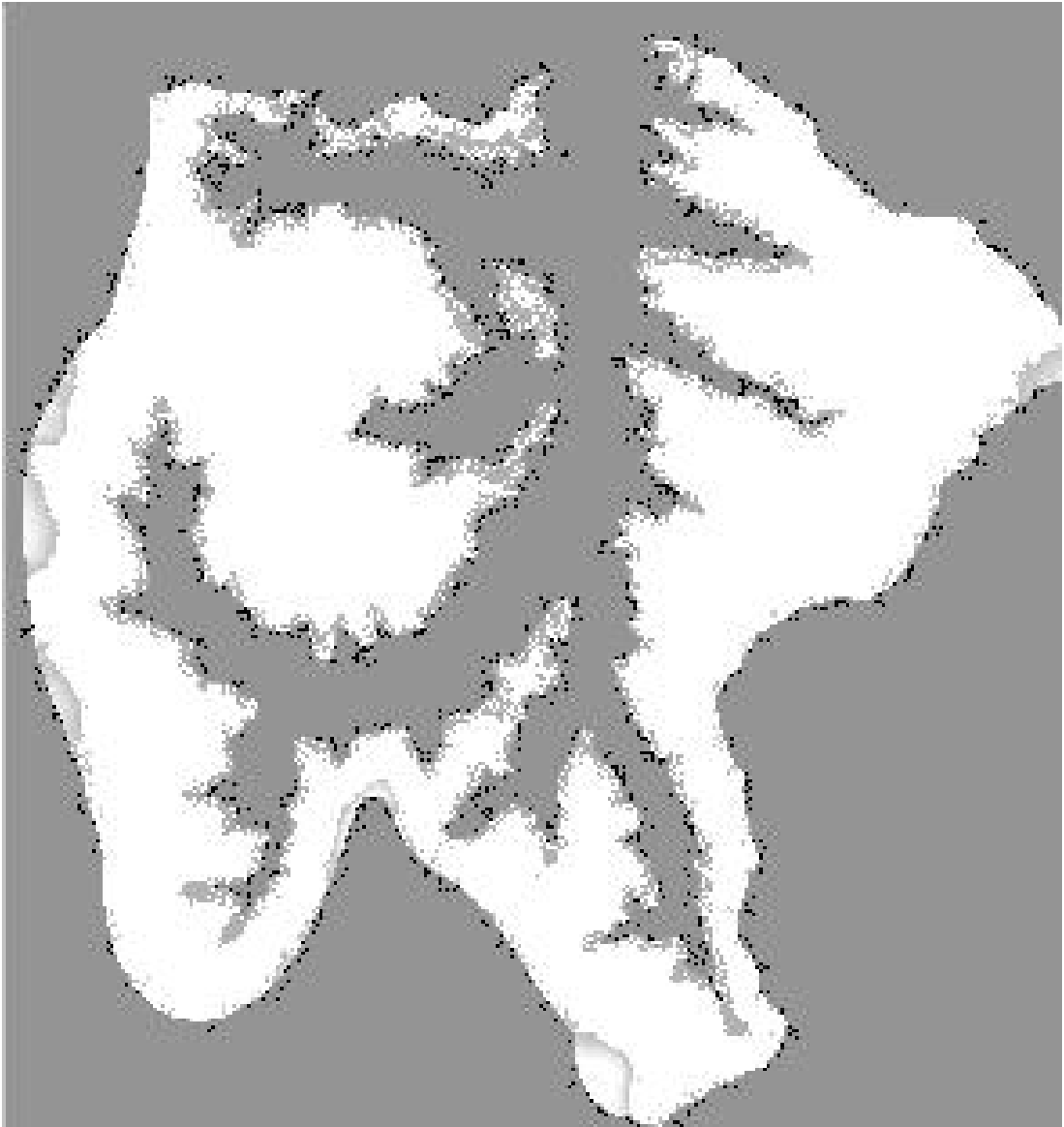


Figura 6. Salida del Modelo NEVE para el 15/12/97

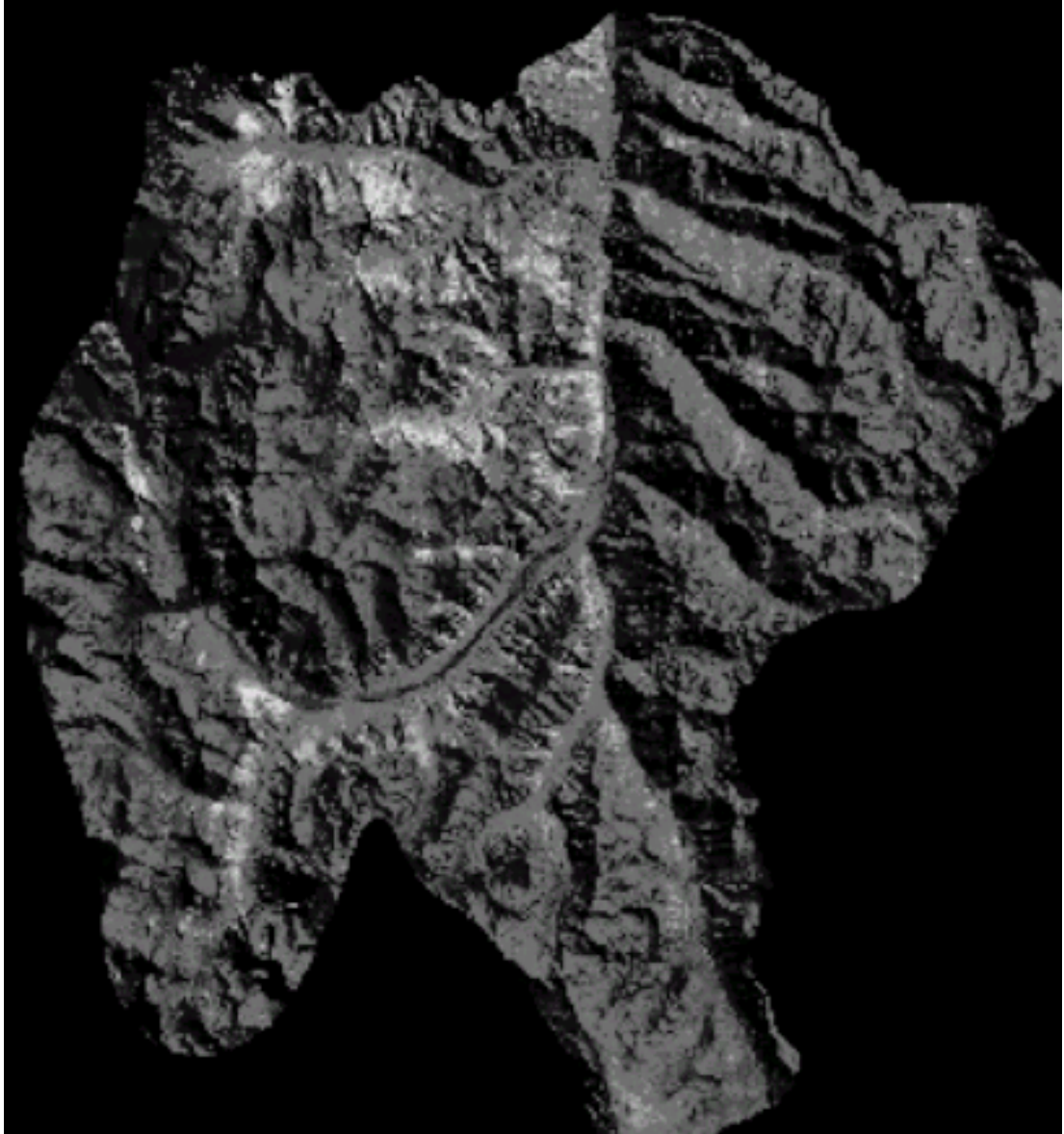


Figura 7. Imagen Landsat 03/98

c1-97294 resampled

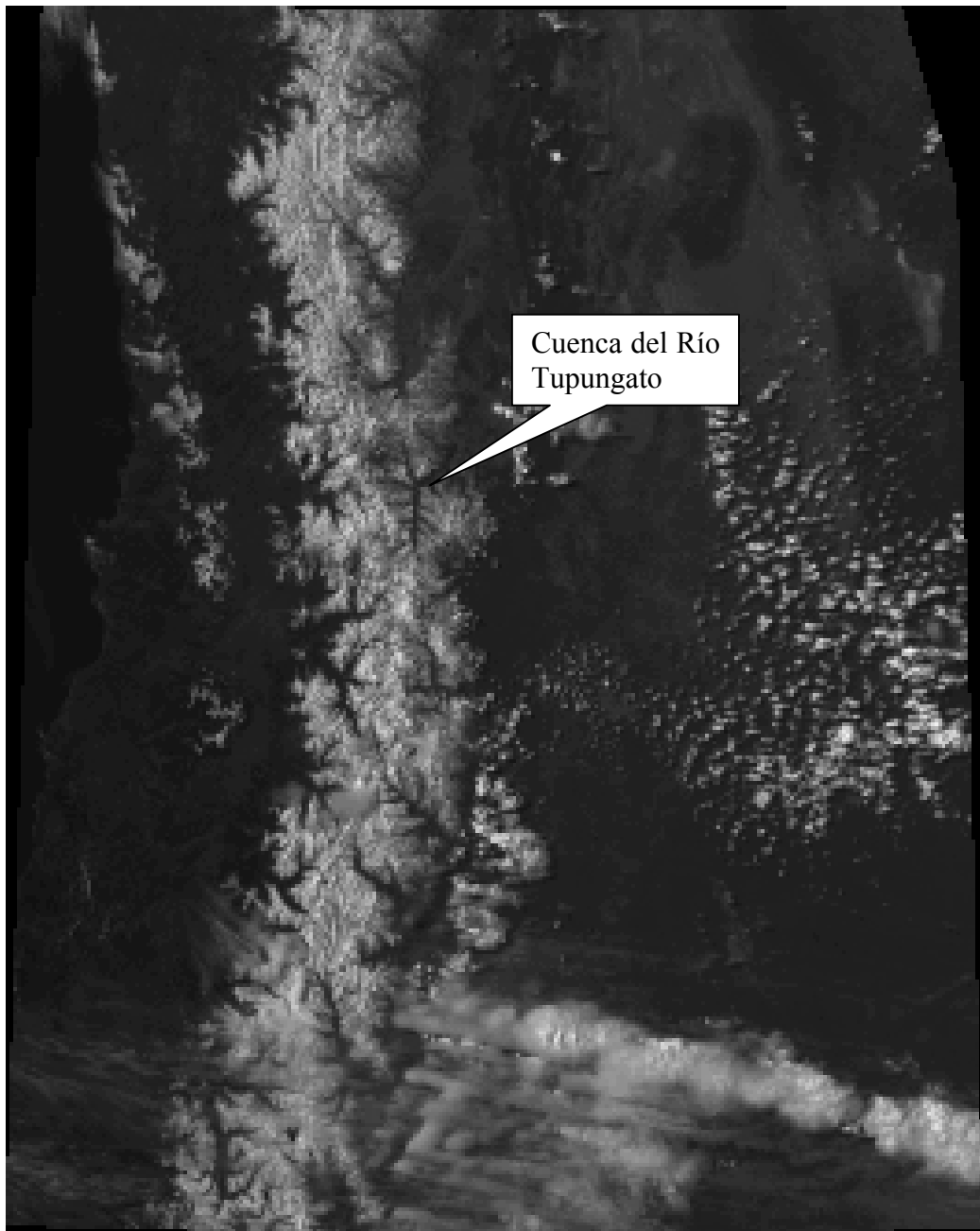


Figura 8. Imagen NOAA 21/10/97

c1-97317 resampled

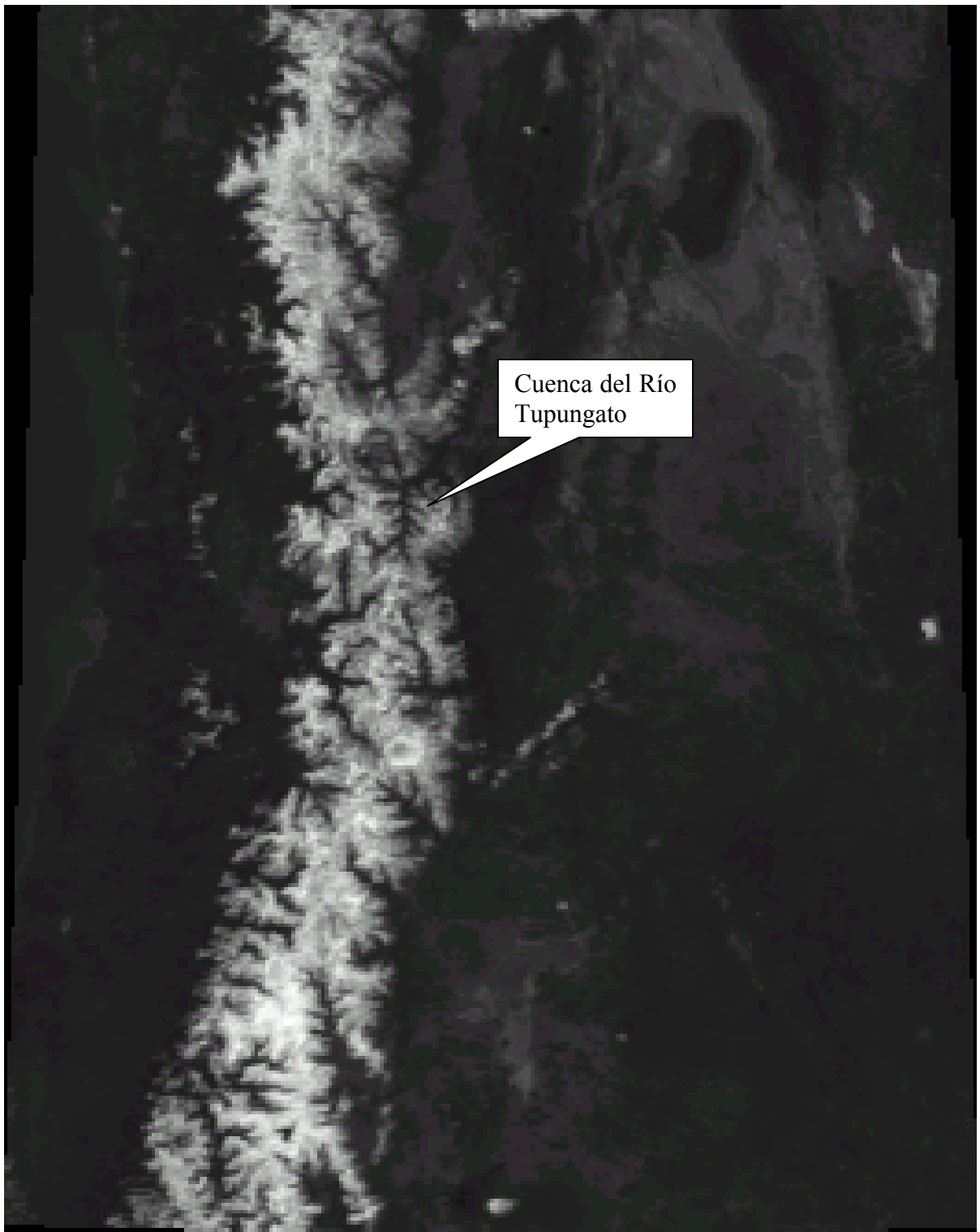


Figura 9. Imagen NOAA 13/11/97

c1-97361 resampled

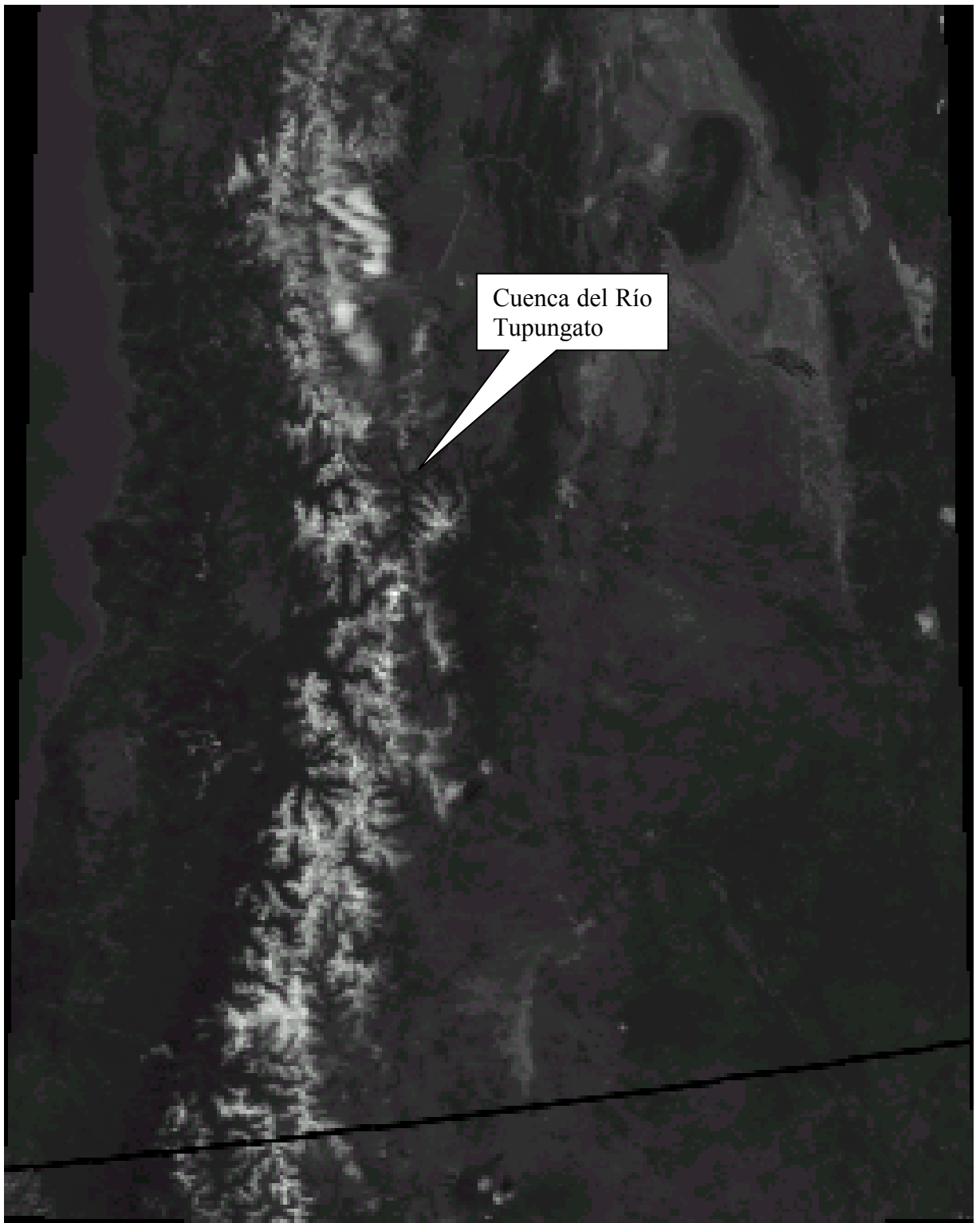
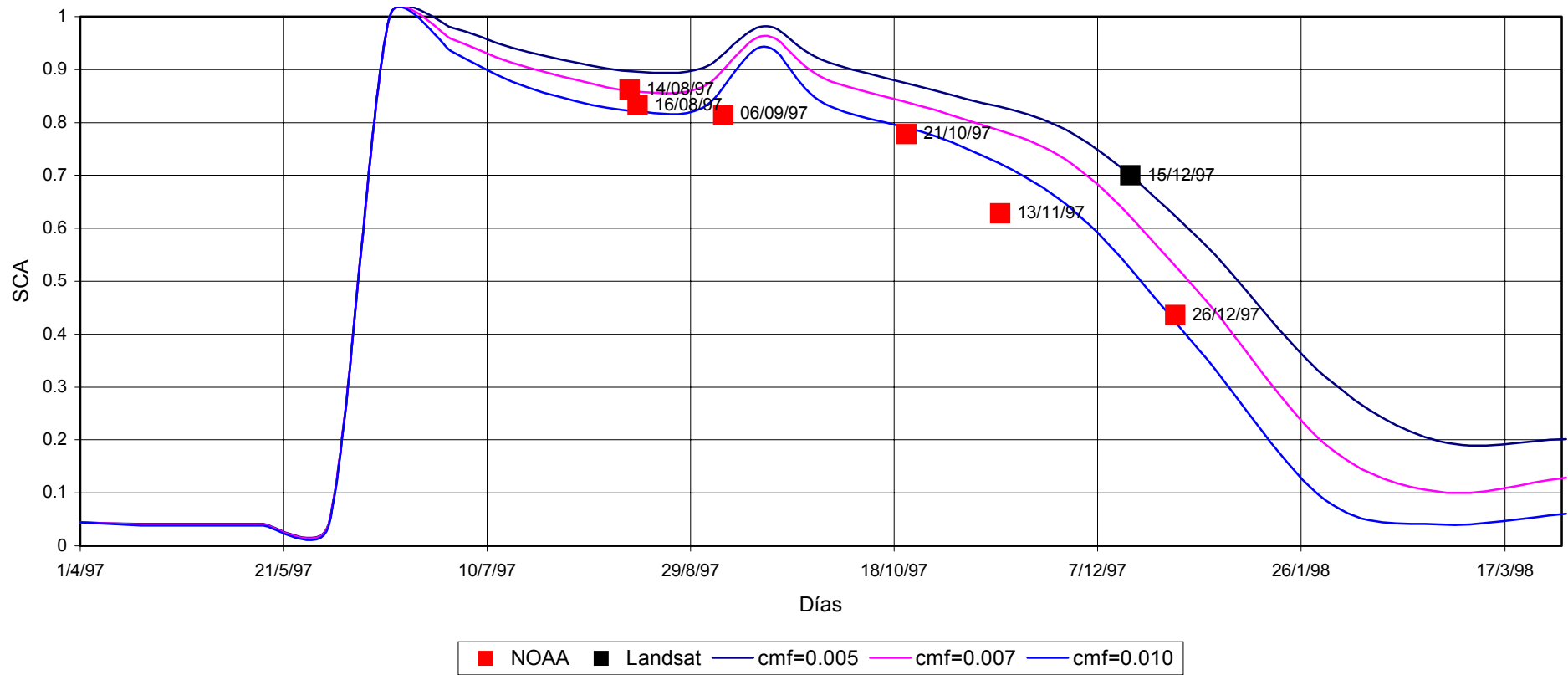


Figura 10. Imagen NOAA 27/12/97

**AREA CUBIERTA DE NIEVE DE LA CUENCA PARA DISTINTOS CMF
E IMÁGENES SATELITALES**



$SCA = 1 / (1 + e^{- (3.5627 - 0.0301 * \text{día})})$ $R^2 = 0.9613$ para CMF = 0,005

Figura 11

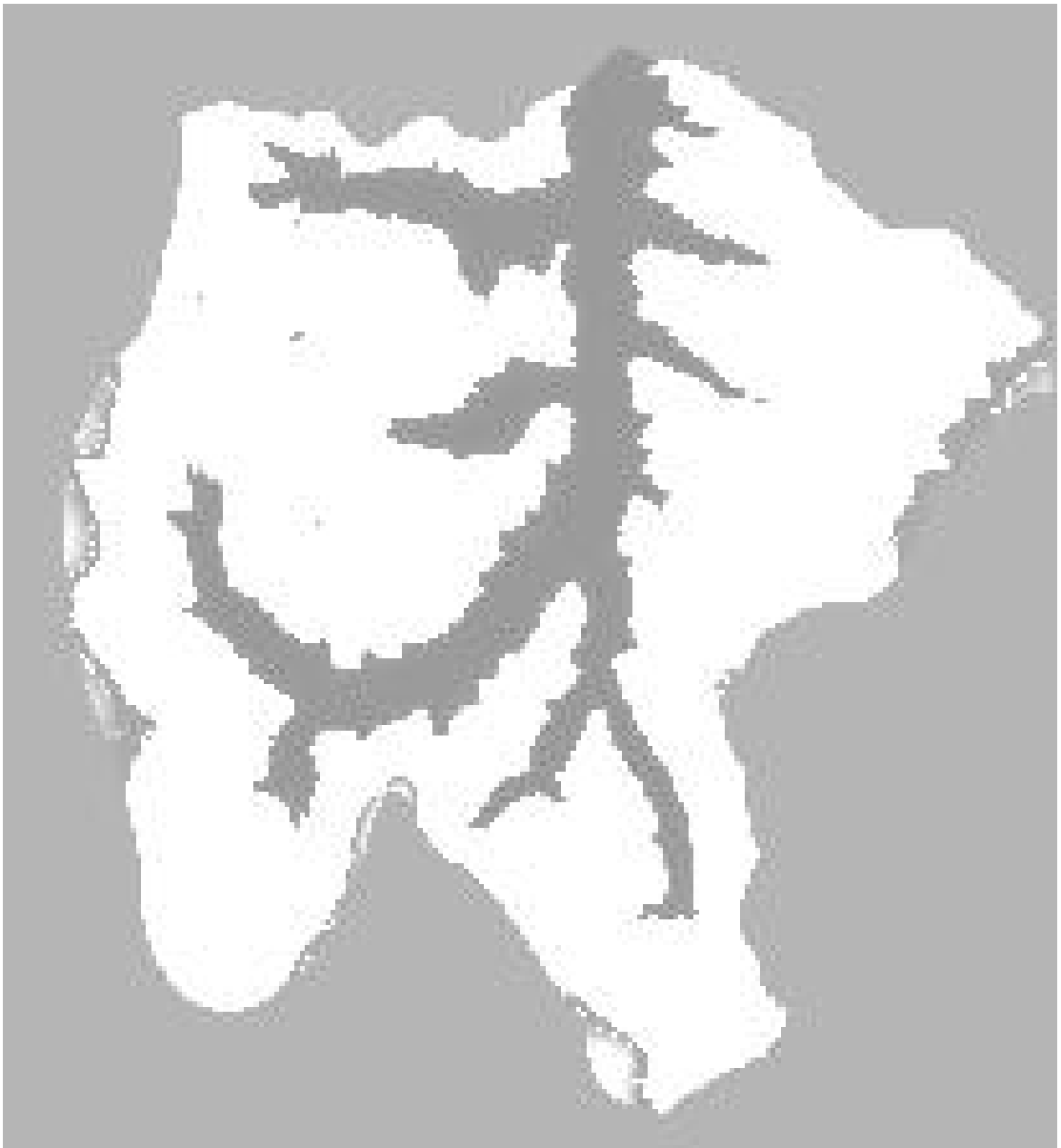


Figura 12. Salida del Modelo NEVE para el 15/10/97



Figura 13. Salida del Modelo NEVE para el 15/2/98

Porcentaje de elementos puros

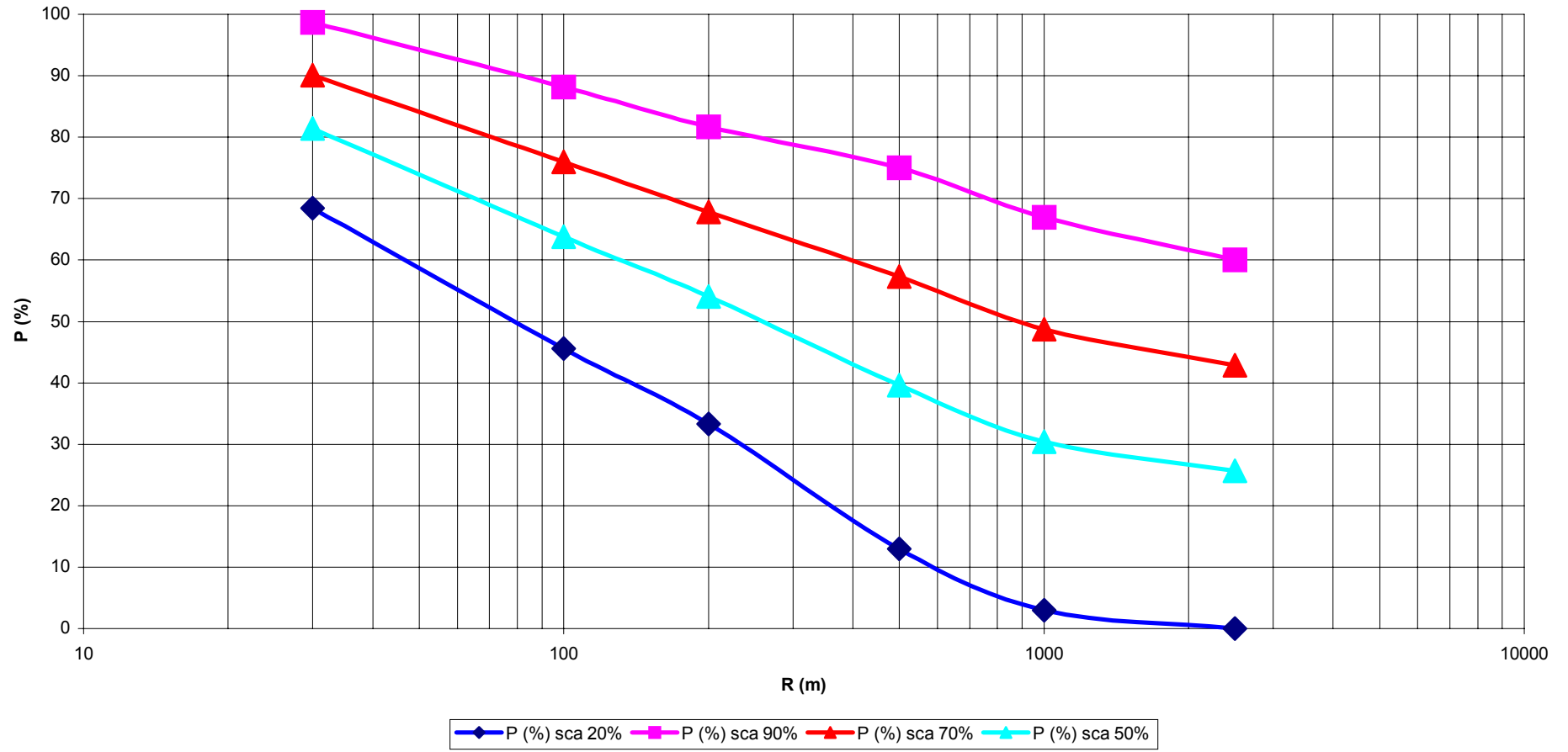


Figura 14

SENSIBILIDAD DEL CMF EN EL MODELO NEVE

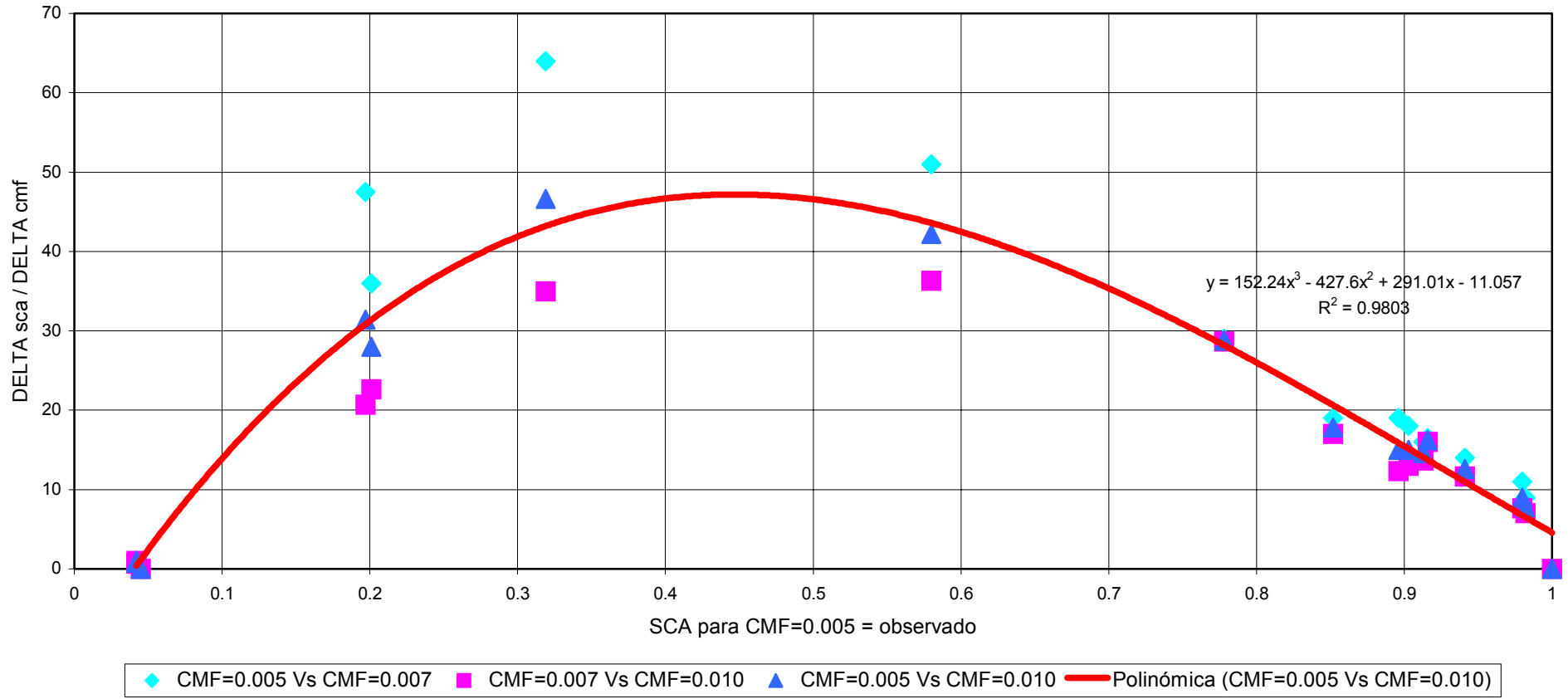


Figura 15

Cambio de SCA en % por cada 0.001 de cambio en CMF

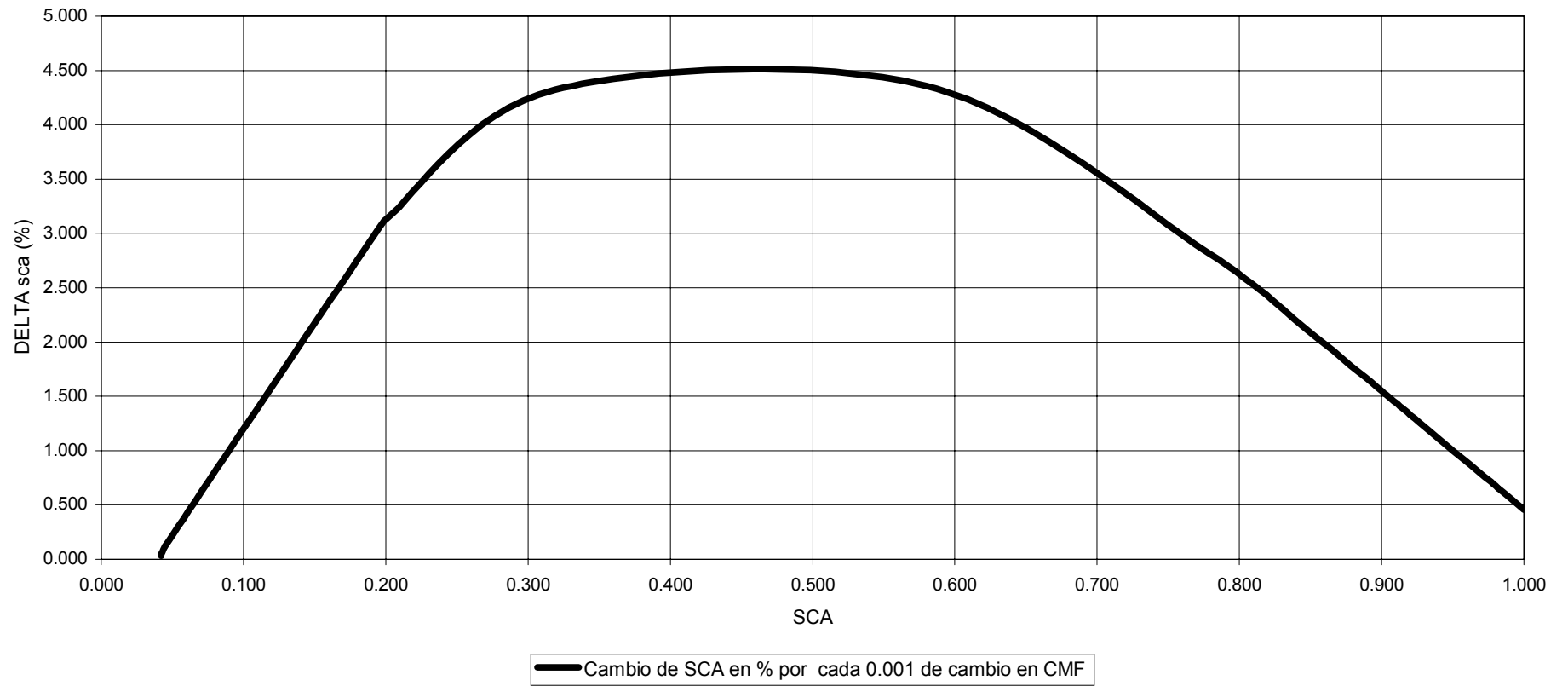


Figura 16

Cuenca Rio Tupungato
Elevation zones

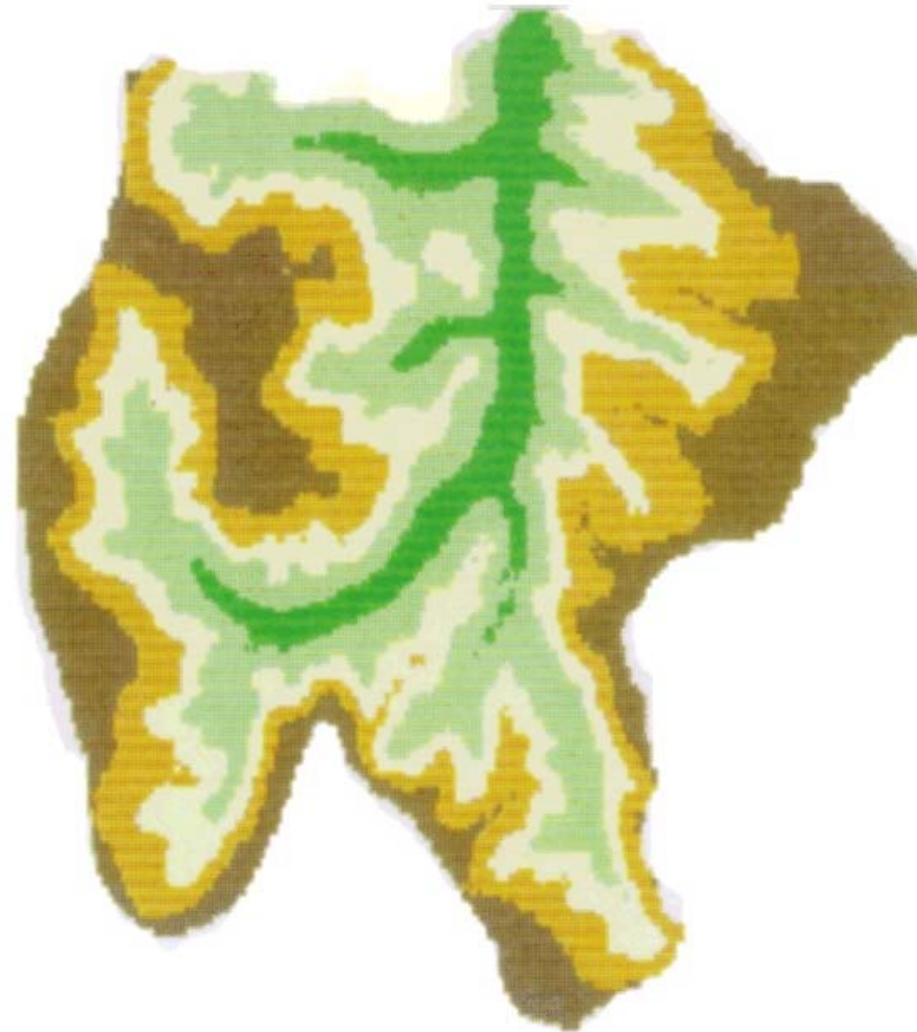
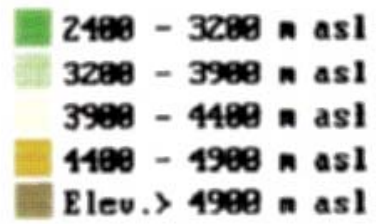


Figura 17. Mapa de zonas de elevación (WODITE) utilizadas por el Modelo SRM

SCA 1997-98 con y sin Cambio Climático producidos por el Modelo NEVE

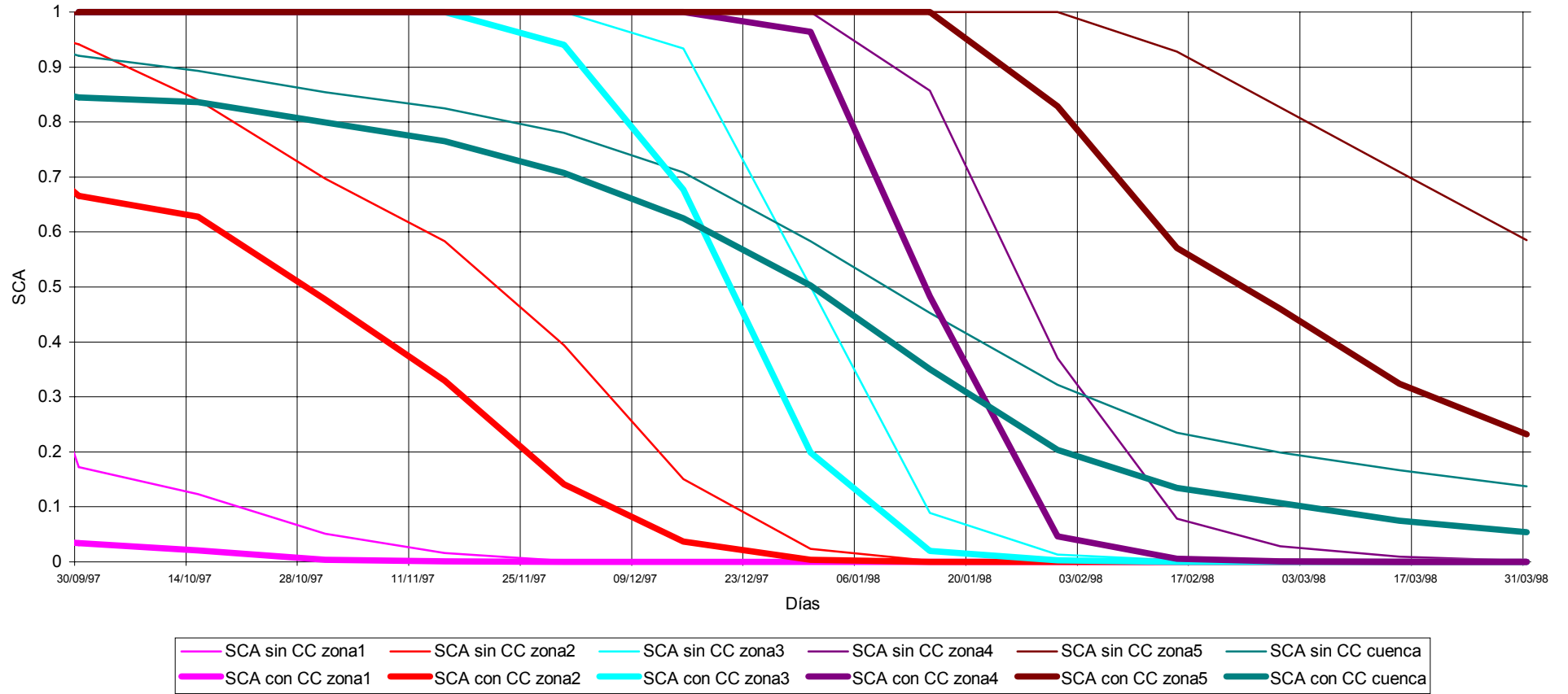


Figura 18

Hidrogramas del Rio Tupungato

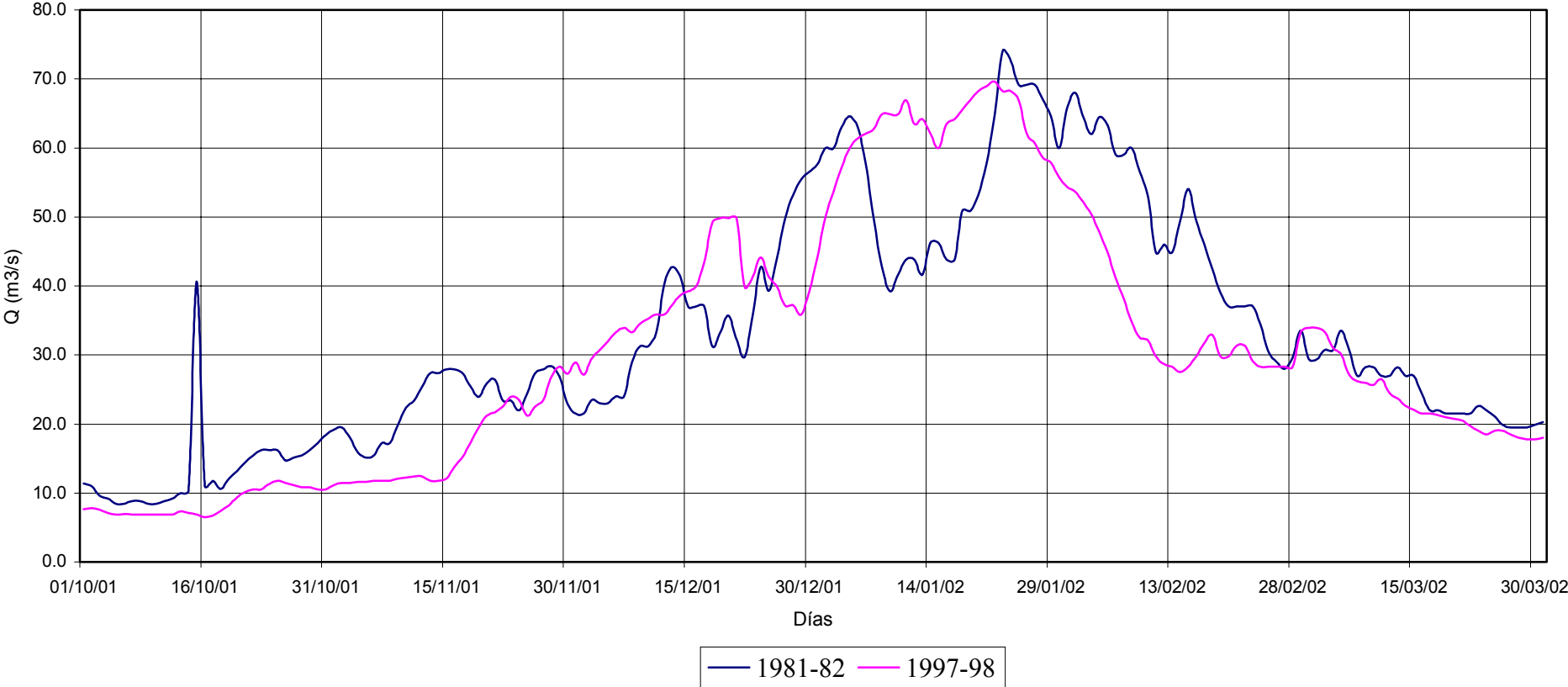


Figura 19

Río Tupungato 1997-98

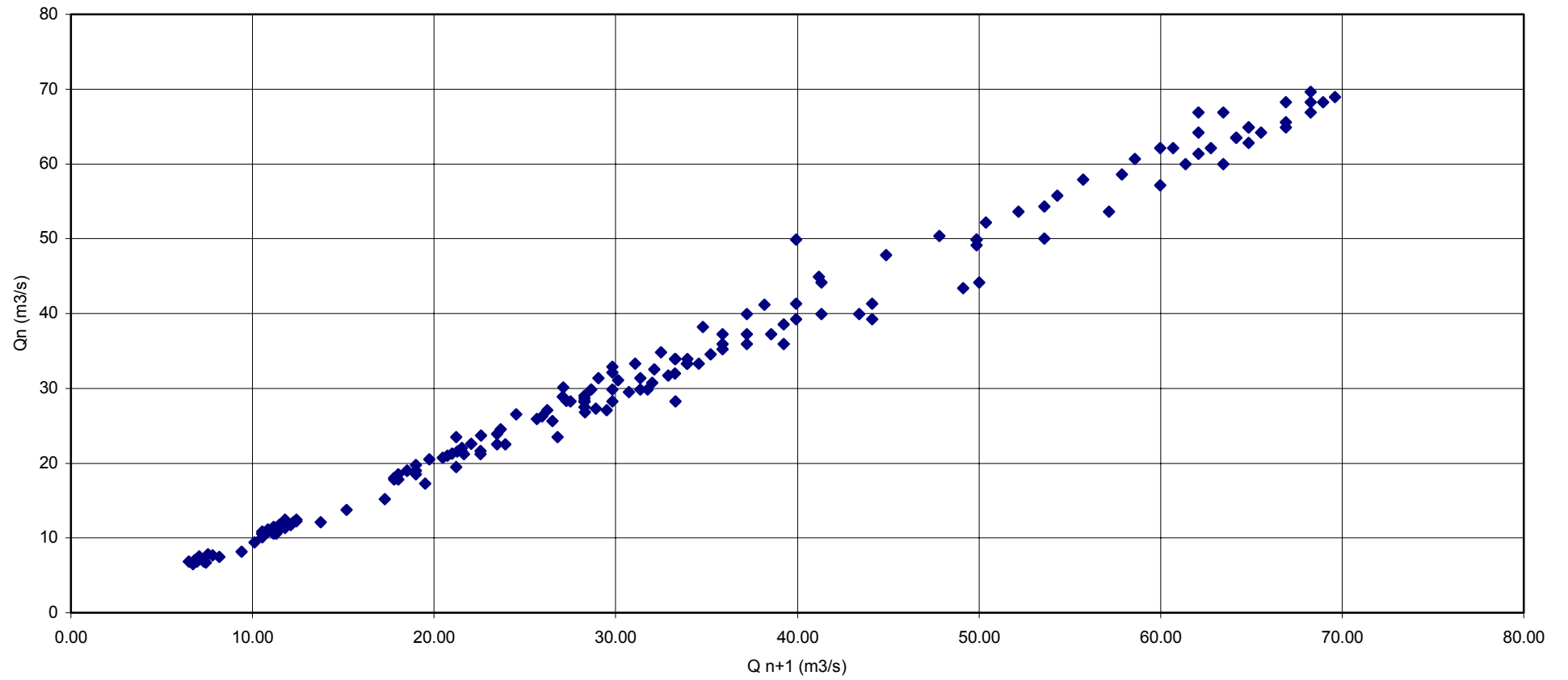


Figura 20. Análisis de caudales de recesión (coeficiente K del Modelo SRM)

Río Tupungato - Grados Día Acumulados

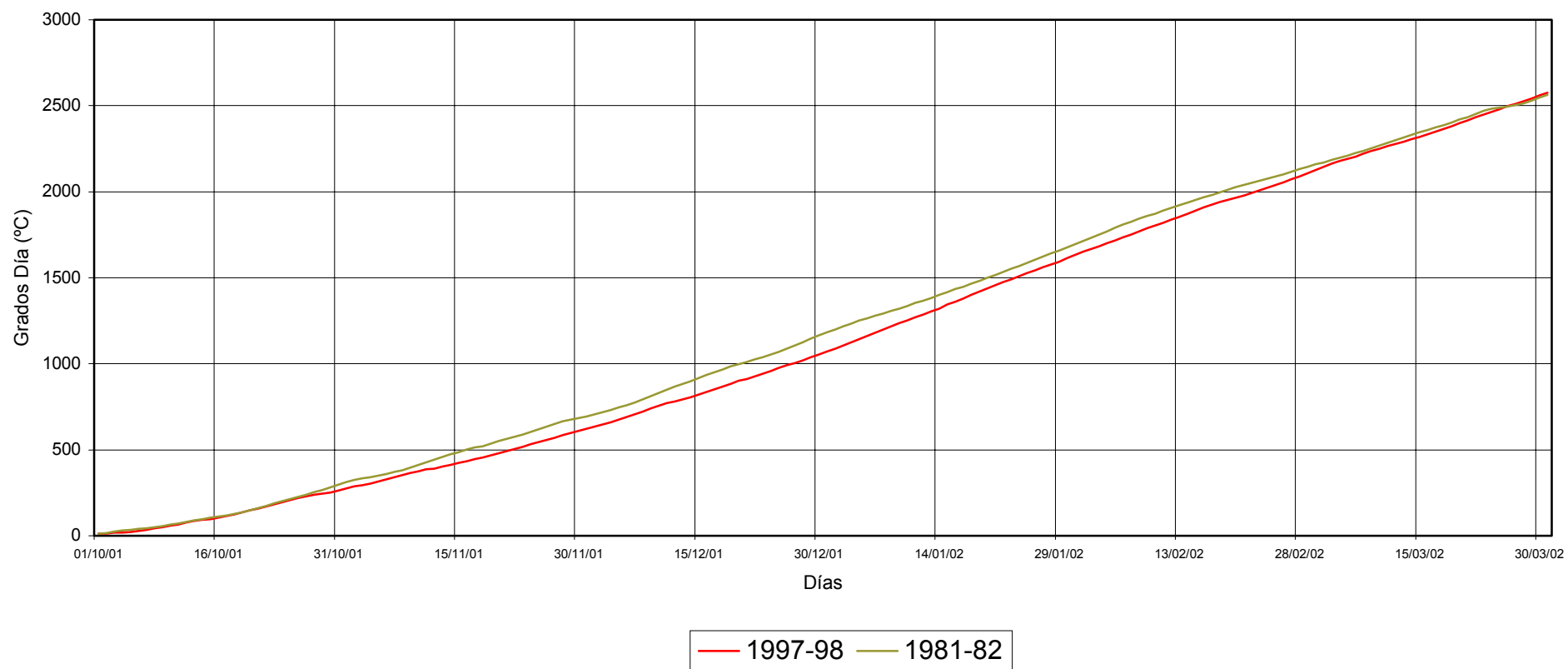


Figura 21

Río Tupungato GRADOS DIA

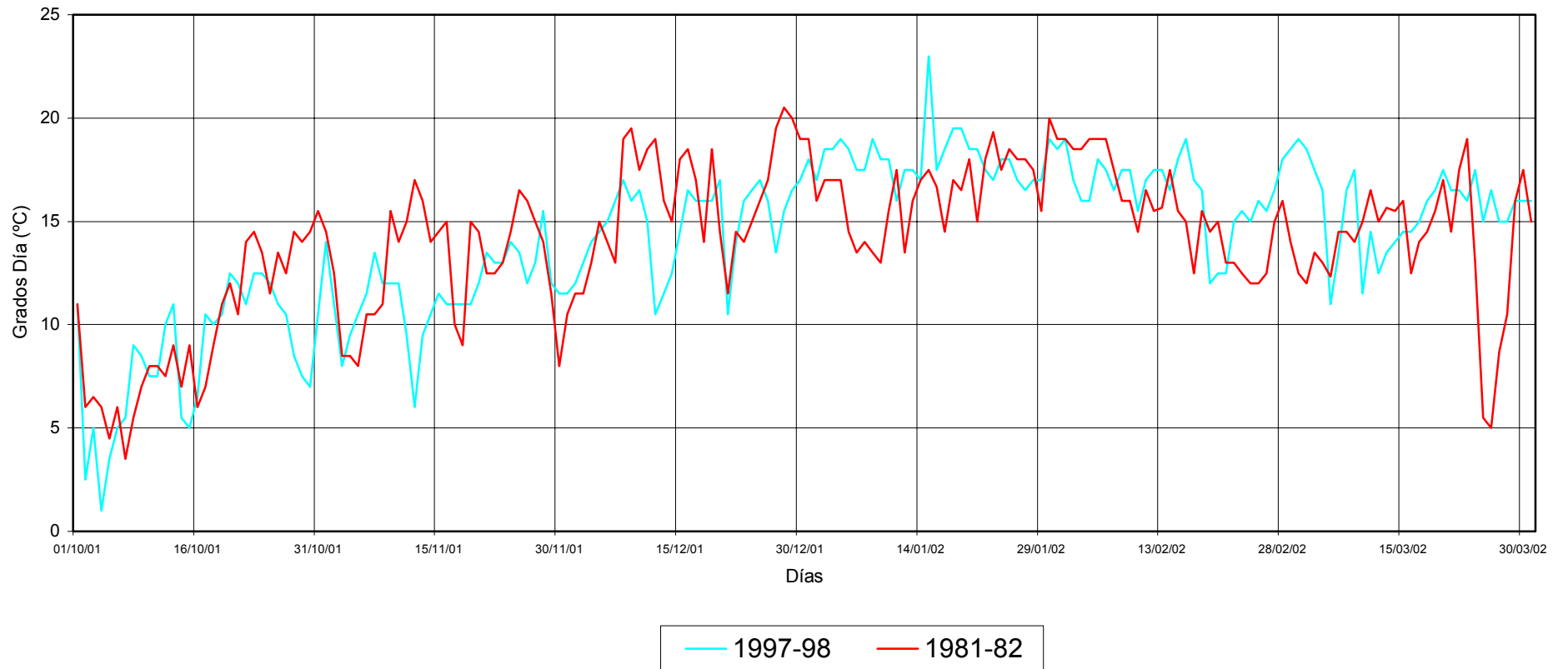


Figura 22

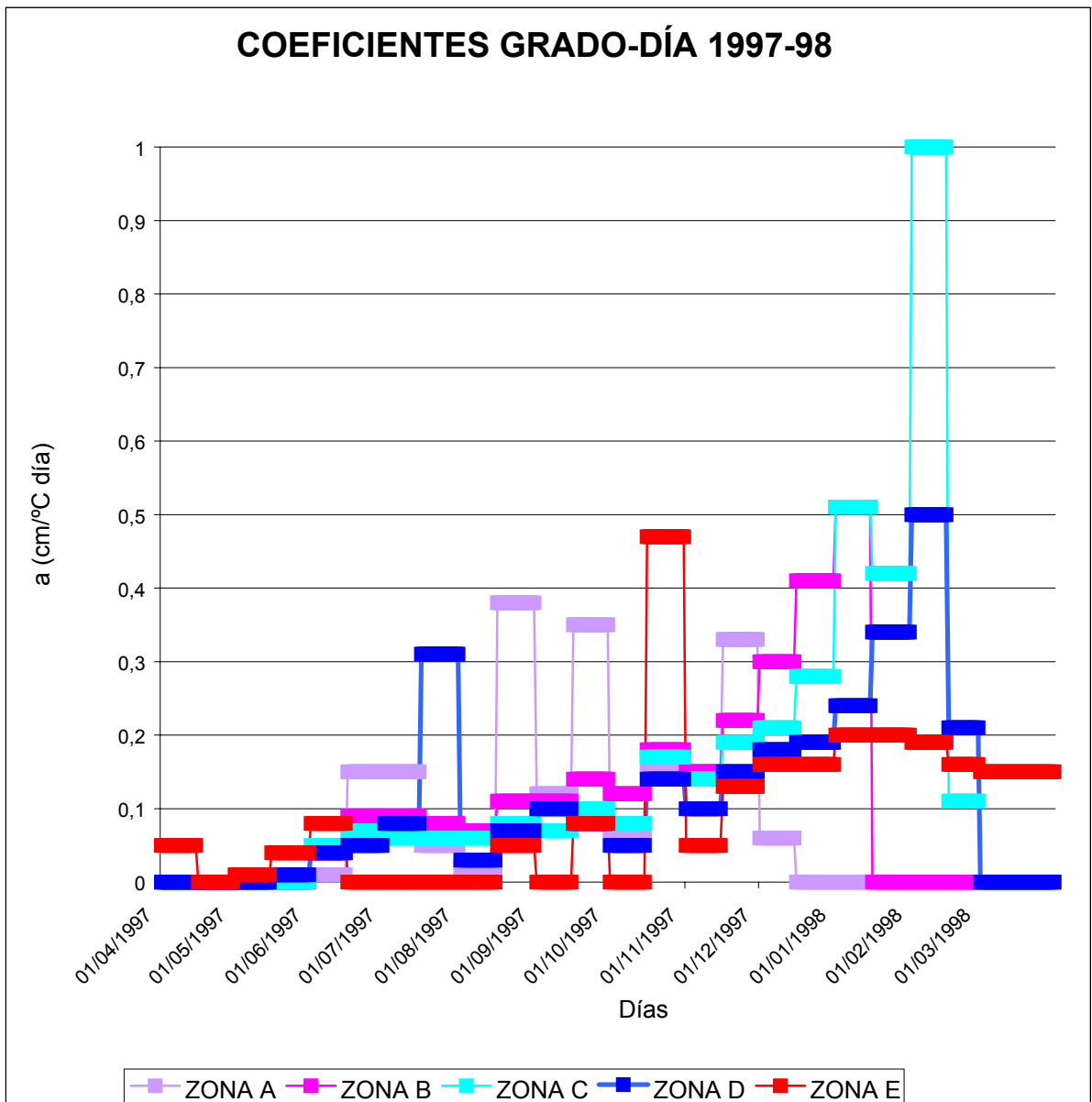
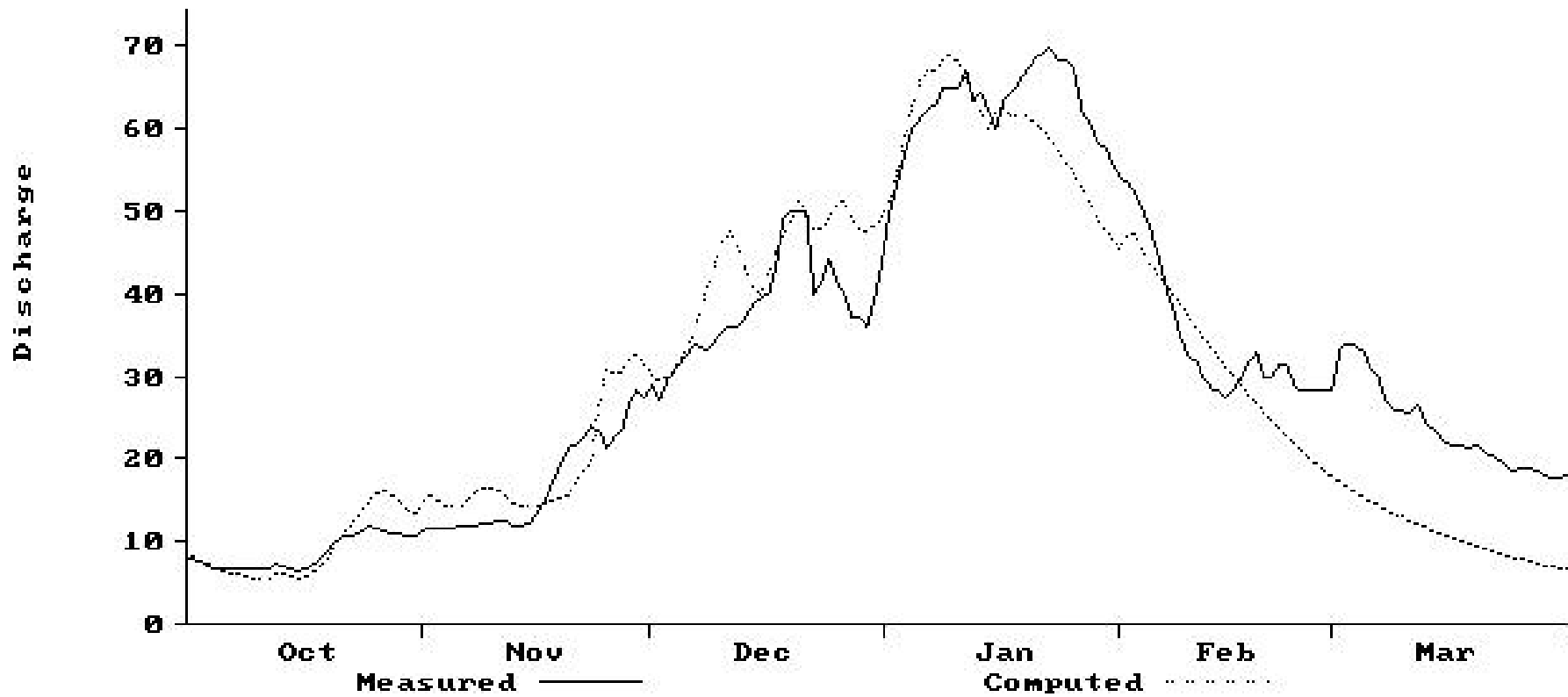


Figura 23



Ref: Measured = observado
 Computed = calculado

Figura 24. Calibración del SRM

TEMPERATURA EN PUNTA DE VACAS 1997-98

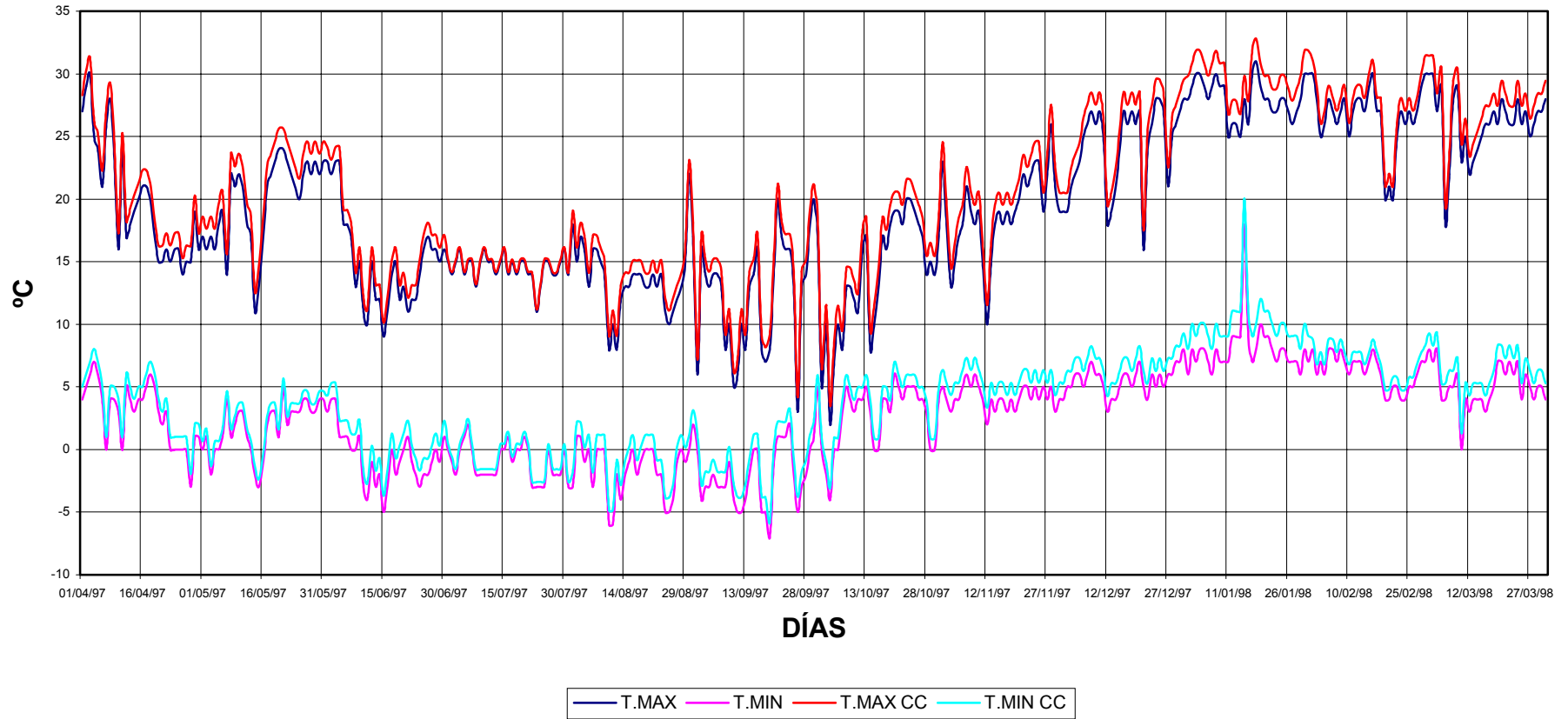


Figura 25

- ◆ Temp
- ∨ Sea level

- Ref. range
- Ref. best
- Ref. user
- Ref. con SO2
- ┘ Pol. range
- ┘ Pol. best
- ┘ Pol. user
- ┘ Pol. con SO2

1990 - 2040
1990 - 2040
1765 - 1990
1765 - 2040

- Help
- EPS file
- Print
- OK

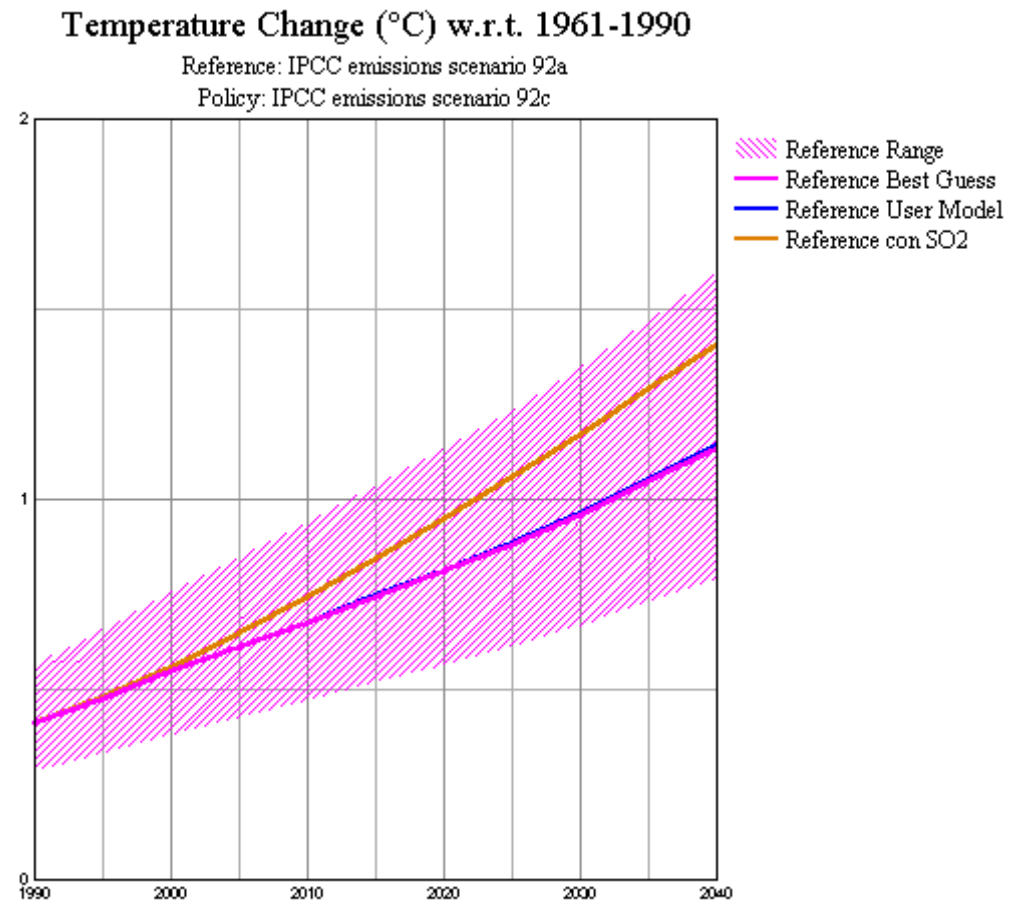


Figura 26. Cambio global de temperatura (Modelo MAGICC)

- ◆ Temp
- ∨ Sea level

- Ref. range
- Ref. best
- Ref. user
- Ref. con SO2
- └ Pol. range
- └ Pol. best
- └ Pol. user
- └ Pol. con SO2

- 1765 - 2040
- 1990 - 2040
- 1765 - 1990
- 1765 - 2040

- Help
- EPS file
- Print
- OK

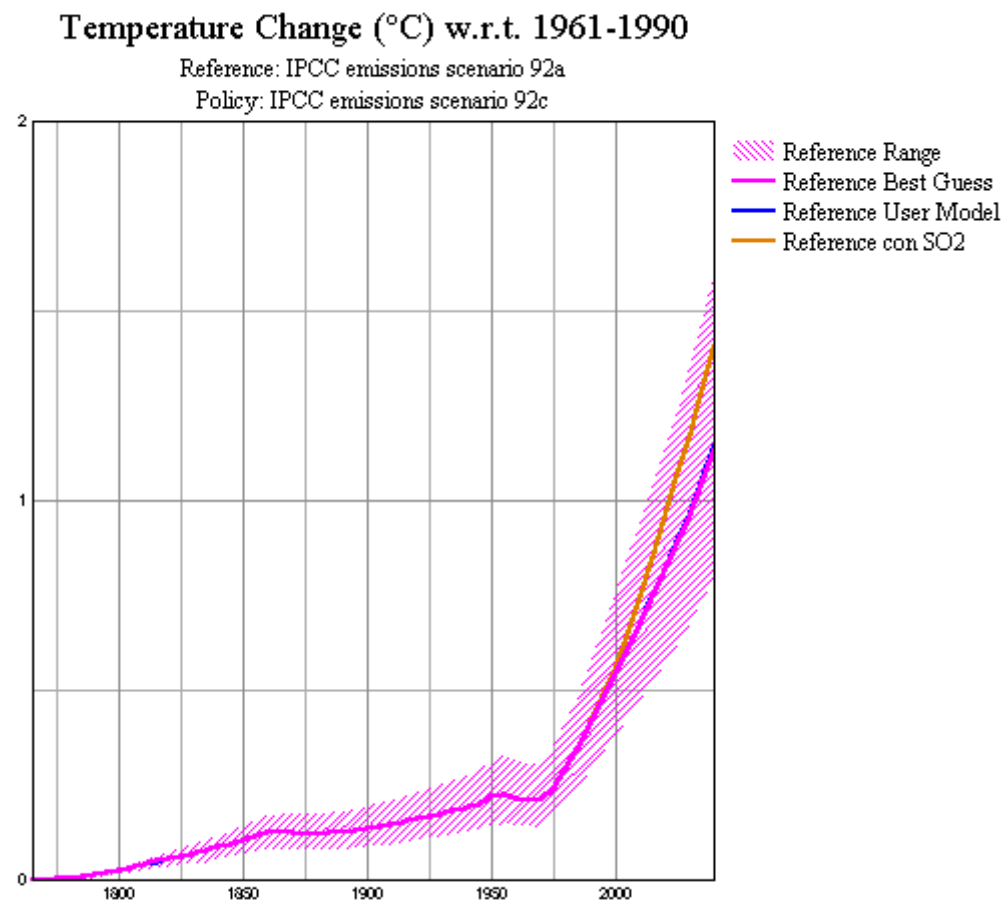


Figura 27. Evolución de la temperatura global (Modelo MAGICC)

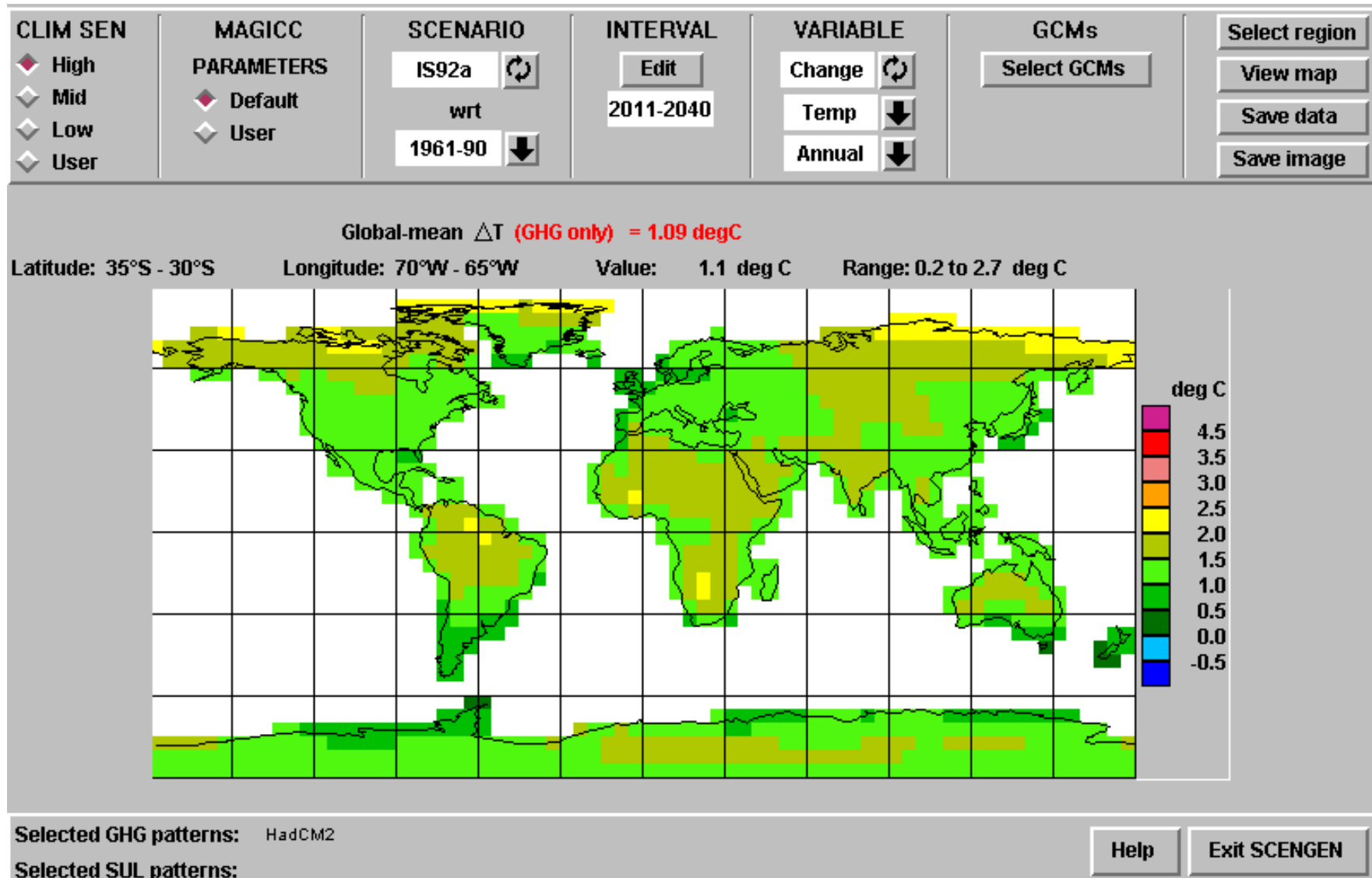


Figura 28. Cambio de temperatura anual (AR = 1.1°) en la cuadrícula Lat 35°S - 30°S, Long. 70°W-65°W (Modelo SCENGEN)

07-28-2001
Run# 01, Step 6

Snowmelt Runoff Model (SRM4)
CDCclimWA,MA (Model Adjusted)
TUPUNGATO, 1997-98
(NEVPPZON.SRM)

04/01 to 03/31
Changed Clim
5 Zones

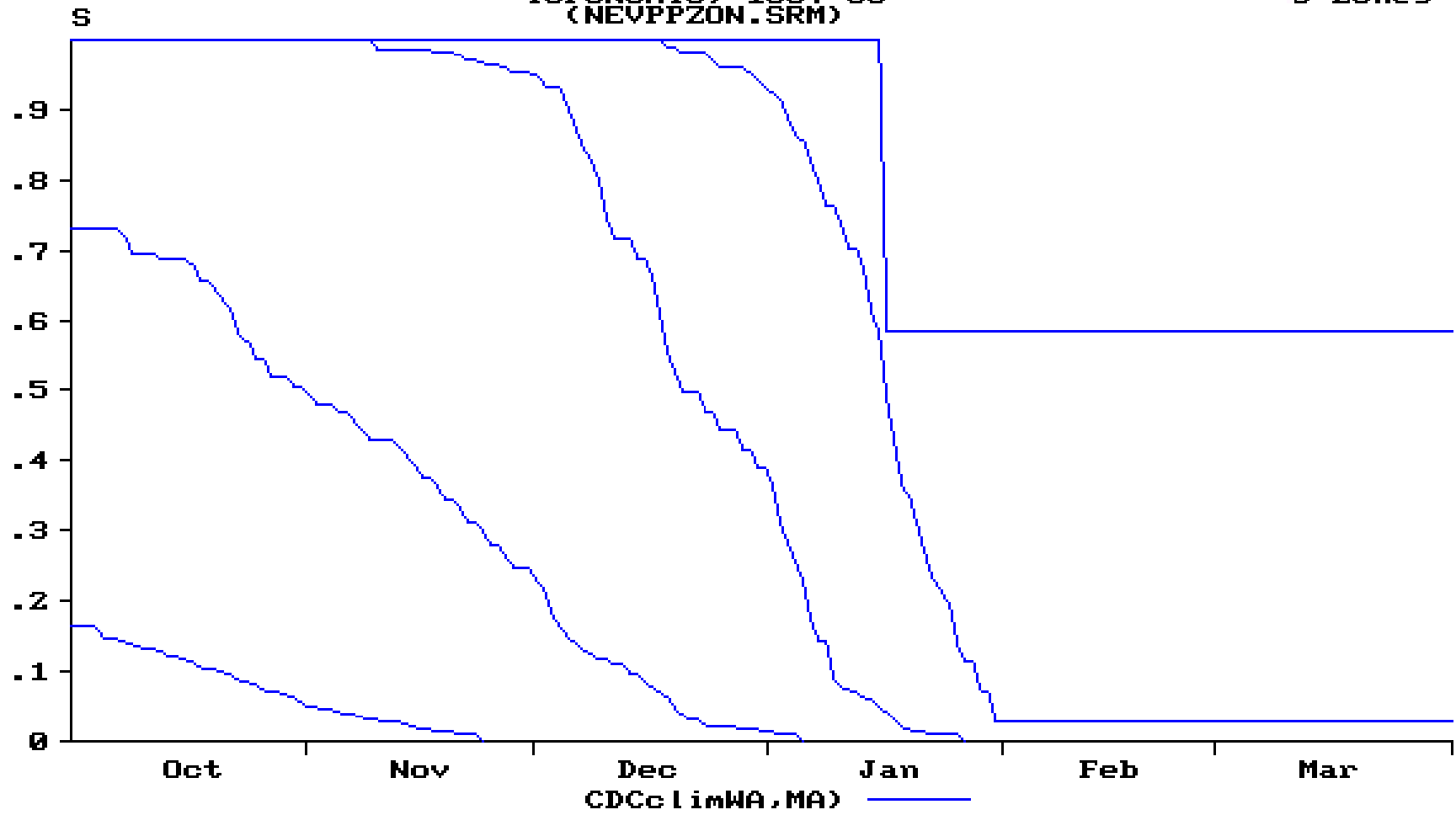


Figura 25. Curvas SCA generadas por SRM con cambio climático

SCA con Cambio Climático producidos por los Modelos NEVE y SRM

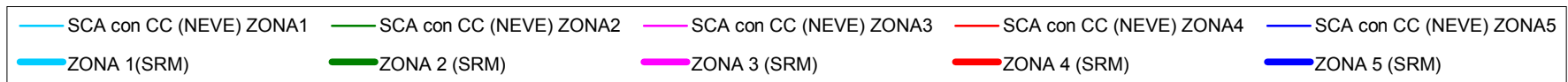
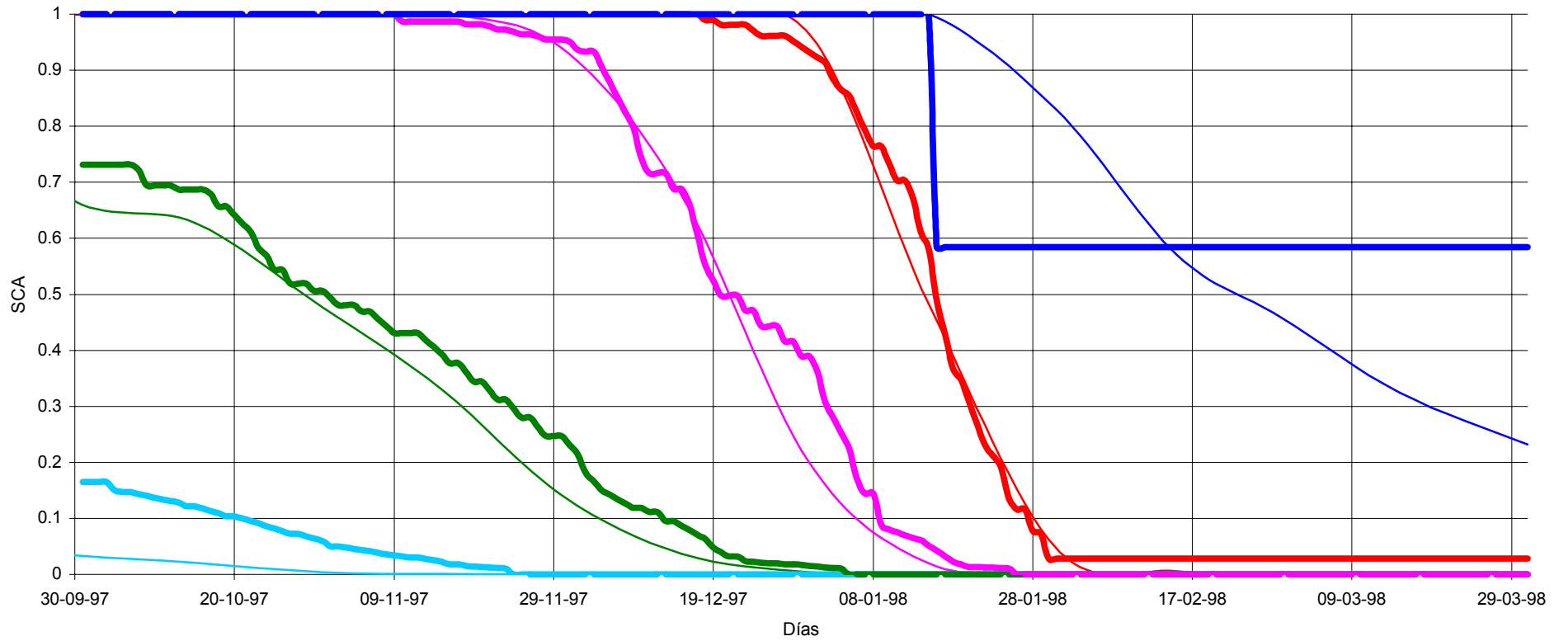


Figura 30

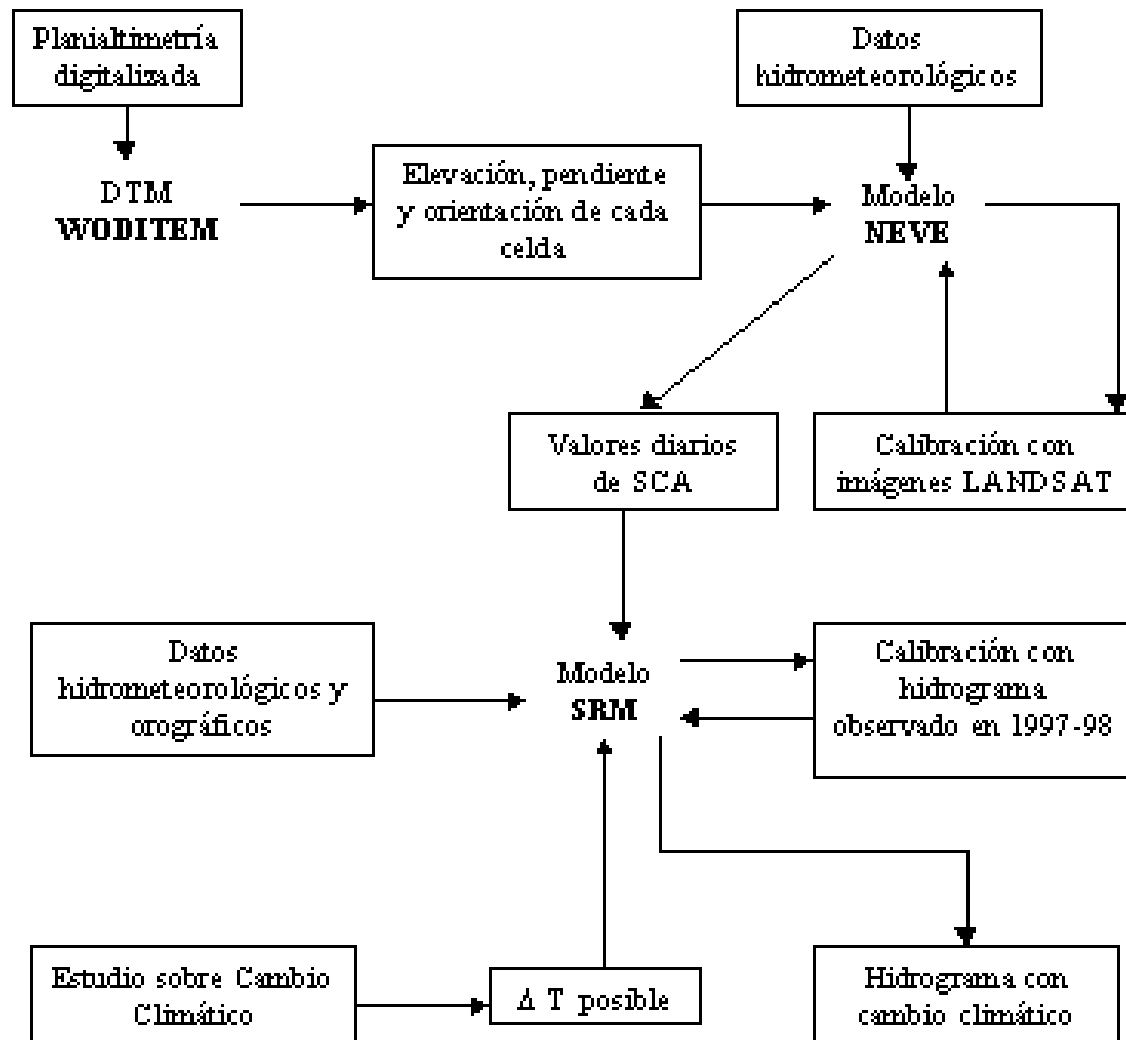


Figura 31. Esquema metodológico

07-28-2001
Run# 01, Step 6

Snowmelt Runoff Model (SRM4)
Computed Flow Before/After Climate Change
TUPUNGATO, 1997-98
(NEVPPZON.SRM)

04/01 to 03/31
Changed Clim

Vol Before (10 ⁶ m ³)	469.555
Vol After (10 ⁶ m ³)	480.845
AvgQ Before (m ³ /s)	29.8661
AvgQ After (m ³ /s)	30.579
R Squared	0.9402
Vol Diff ()	-2.404

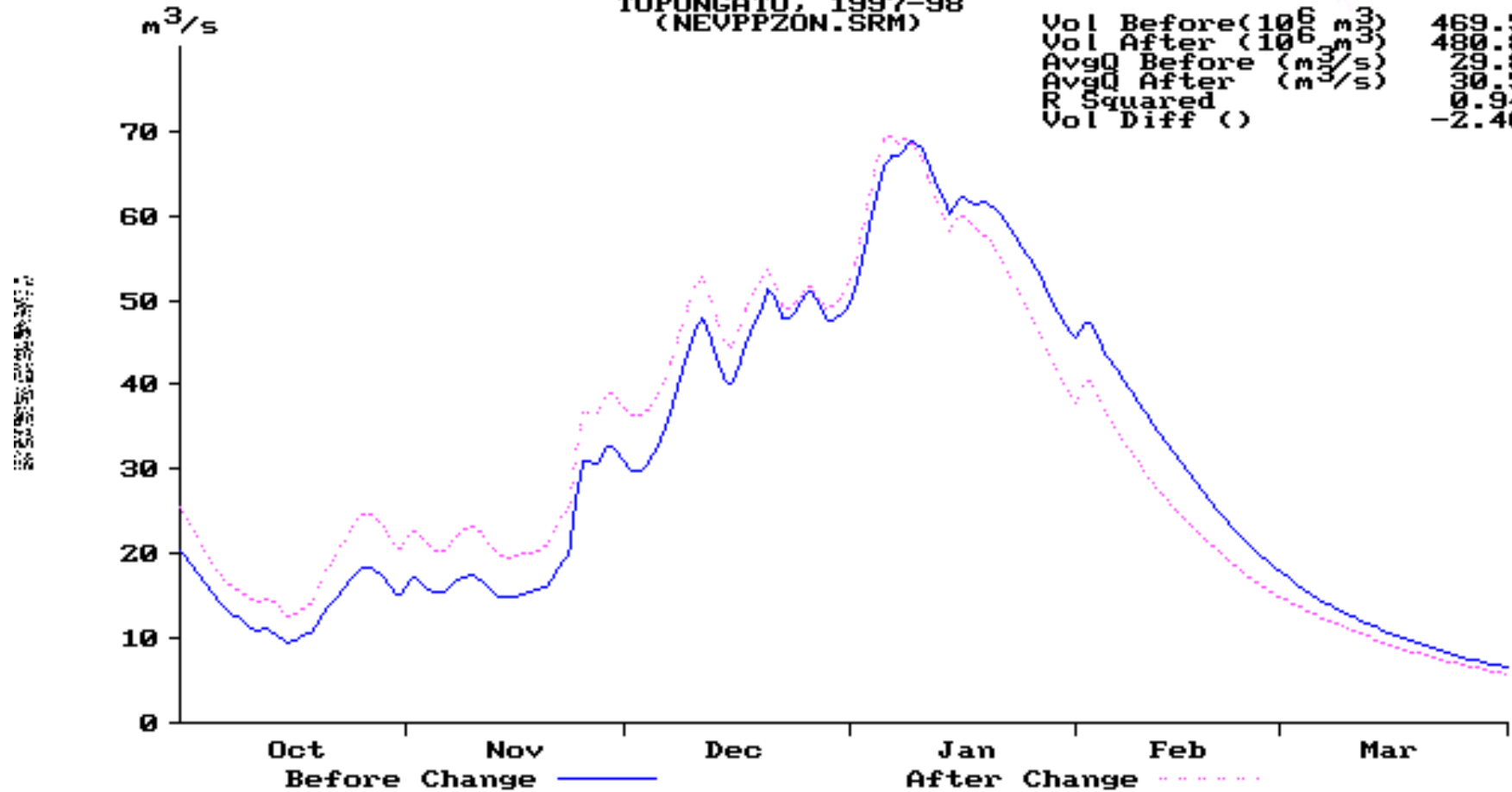


Figura 32. Comparación de hidrogramas generados por SRM sin cambio climático (before change) y con cambio climático (alter chane)