



ALGUNAS PRECISIONES SOBRE EL ROL DE LOS GLACIARES EN EL ESCURRIMIENTO ANDINO

DIRECCION GENERAL DE AGUAS
Centro de Información Recursos Hídricos
Área de Documentación

REALIZADO POR :

**MARCELO E. LASCANO
RICARDO VILLALBA.**

2006

**ALGUNAS PRECISIONES SOBRE EL ROL
DE LOS GLACIARES EN EL ESCURRIMIENTO ANDINO**Marcelo E. Lascano^{1,2} y Ricardo Villalba²¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera - UBA²Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales
IANIGLA - CONICETAv. Ruiz Leal s/n, Ciudad de Mendoza. e-mail: mlascano@lab.cri.cyt.edu.ar**RESUMEN**

A lo largo de los Andes se desarrollan glaciares allí donde la temperatura, la precipitación, o una combinación de ambos factores permiten la acumulación de agua en fase sólida de un año a otro. Este fenómeno de balance interanual puede asumir diferentes significados hidrológicos. La influencia de la alimentación interanual, de origen glaciario y nival, en la conformación del escurrimiento suele ser mencionada pero no existen estudios que delimiten su gravitación. En este estudio se compara el comportamiento nivo-glaciario de 7 cuencas ubicadas en las vertientes Este (Blanco, Patos superior, Mendoza, Tunuyán, Atuel y Colorado) y 2 en la vertiente Oeste (Aconcagua y Maipo) de los Andes Centrales, en relación a la variabilidad interanual de la precipitación. Para el desarrollo de este planteo se utilizaron los caudales medios mensuales, la altura de la isoterma de 0 °C, la altimetría de las cuencas y las superficies de cuerpos de hielo relevadas en las cuencas del Atuel y el Mendoza. La menor variabilidad interanual del derrame del Mendoza tiene relación con el volumen de agua suministrada por la sumatoria de los glaciares presentes en su cuenca, así como por manchones de nieve de recarga cíclica. El Tunuyán también posee una componente interanual reconocible, aunque de menor importancia. Los ríos Blanco, Patos superior y Colorado no registran incidencias de importancia. El principal factor de control para la ocurrencia de esta conjugación de factores resultaría ser la altura de las cuencas activas. En los casos donde la alimentación interanual muestra importancia durante años de nevadas escasas debe tenerse en cuenta que estos aportes se producen sólo hacia fines del verano, por lo cual su efecto compensador no es sincrónico con la programación anual de los usos consuntivos.

Almacenamiento interanual - hielo - nieve - variabilidad - derrame

Introducción

El volumen anual de agua que escurre por el cauce de un río, denominado derrame, es el resultado del ciclo anual del clima. En las cuencas donde no se registra una persistencia anual o estacional de temperaturas bajo cero, el escurrimiento reproduce la alternancia y la intensidad de las precipitaciones de forma más o menos inmediata. Por el contrario, en las cuencas frías en cuya superficie total o parcial se acumula el agua en fase sólida, las fluctuaciones del caudal responden a una combinación de la precipitación y la temperatura, o solamente a la temperatura. Es decir que el escurrimiento de un río puede clasificarse desde el punto de vista climático según responda sólo a la precipitación, a una combinación entre la precipitación y la temperatura, o sólo a la temperatura. A escala subregional, el escurrimiento es el resultado total de la intervención de más de una de estas modalidades, en la que una predomina quedando así definido su régimen. En este trabajo dirigimos la atención sobre las cuencas de los Andes Centrales, cuyo escurrimiento se da en forma mayormente o completamente disociada de la estacionalidad de la precipitación. A lo largo de la cordillera se dan condiciones para la acumulación de agua en fase sólida. Este eslabón del ciclo del agua desfasa la ocurrencia de eventos hidrológicos de la ocurrencia de precipitación. Un primer tipo de desfase está relacionado con la nieve que constituye mantos efímeros que se derriten a los pocos días del evento de precipitación. Esta es una primera escala temporal de desfase. Una segunda escala es la estacional, donde la nieve se derrite mayormente luego de la estación invernal de precipitaciones. Y por último existe una serie de comportamientos hidrológicos derivados del desfase interanual, cuando el agua precipitada escurre sólo uno o más años después de caída

(Jansson *et al.*, 2003). Entre estas 3 escalas hay una diferencia en la persistencia temporal del frío que retiene el agua. La persistencia temporal depende de la altitud y de la latitud. A mayor altura y mayor latitud el período durante el cual la precipitación se acumula y permanece retenida en fase sólida es más largo. Los resultados de Bruniard (1992, 1994), de Lascano y Villalba (2005b) y los de Carrasco *et al.* (2005) indican que las diferencias de altura media entre cuencas tienen una importancia mayor a la latitud como factor determinante del rango del ciclo anual de temperaturas. El sólo hecho de que el Colorado tenga su pico un mes y medio antes que el Mendoza, localizado 330 km más al norte, pone en evidencia la gran importancia que tiene la altura media de una cuenca como reguladora de la estacionalidad. En la figura 1 se ilustran las alturas medias de las cuencas activas de vertiente Este de los Andes entre los 31° y 41° 30'. El cambio más brusco se da entre las cuencas del Colorado y el Atuel, con una diferencia de altura media de 800 metros. Del Atuel al norte todos los ríos escurren desde cuencas desarrolladas en promedio por sobre los 3300 metros de altura. Considerando la magnitud de los cambios altimétricos de norte a sur podemos descartar parcialmente la importancia de la latitud, como indicador del gradiente radiativo, y centrar la atención sobre las diferencias altimétricas. De esta manera para un sector latitudinalmente poco extendido puede suponerse que la persistencia de las condiciones para el almacenamiento de agua en fase sólida depende de la altura. Por lo tanto cuanto mayor sea la altura media de una cuenca activa, la duración del almacenamiento se aproxima más al año entero. Esta es la condición para el desarrollo de las llamadas "nieves eternas" y de cuerpos de hielo. Según su distribución altimétrica cada cuenca activa contará con más o menos superficie para el desarrollo del almacenaje de agua en escalas de tiempo iguales o mayores al año. De esta manera el rol hidrológico de los glaciares, y de la nieve interanual, puede ser más o menos importante. En general se habla de la reducción de la variabilidad interanual del derrame sólo como consecuencia del aporte glaciario. Pero en el Ambiente de la cordillera central, sujeto a una intensa variabilidad interanual de la precipitación, la recarga de nieve, por ejemplo en rincones umbríos de la montaña, podría tener la misma incidencia reguladora. Este trabajo tiene por objetivo identificar la importancia del rol del desfase interanual de agua, glaciario y nival, en la configuración del escurrimiento de la vertiente Este de los Andes.

Datos

Se utilizaron los caudales mensuales, provistos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRRHH, Argentina, 2006), de los ríos Jáchal, Blanco, De los Patos Superior, San Juan, Mendoza, Tunuyán, Atuel y Colorado. Los caudales de los ríos de la vertiente Oeste, Maipú y Aconcagua, fueron provistos por la Dirección General de Aguas de la República de Chile. Las estaciones de aforo correspondientes figuran en el cuadro 1. Las extensiones de las series disponibles son diversas, y por otro lado algunos años no están completos, especialmente en el caso de los ríos Aconcagua y Maipú. Al proceder por comparación deben compatibilizarse las series eliminando en todos los casos los años que pueden faltar en un solo río. Luego de evaluar la cantidad de años completos que se perdían, se decidió que lo más conveniente para utilizar la mayor cantidad de información es utilizar un grupo de datos para la comparación entre vertientes (1956-57 a 2005-06) y otro para la comparación latitudinal (1954-55 a 2004-05). Por lo demás estos dos períodos son muy similares en extensión y superposición.

A diferencia de los ríos de la vertiente Este, los ríos de Chile se analizan en base al año hidrológico abril-marzo. En primer lugar porque estos ríos desarrollan un piso de alimentación líquida, y el Índice de Estacionalidad utilizado aquí requiere no fraccionar las dos respuestas hidrológicas que corresponden a un ciclo anual de precipitaciones invernales. Cabe mencionar también que los ríos de la vertiente Este tienen un proceso de memoria (Minetti *et al.*, 1990) por

el cual no corresponde adoptar el año hidrológico abril-marzo. En síntesis en cada caso se adopta el año hidrológico que refleja el derrame que corresponde a cada ciclo invernal de precipitación.

Cuadro 1 : ríos y estaciones de aforo seleccionadas

Río	Estación de aforo	Período (años Hidrol.)	Años hidrol. Completos	Presas aguas abajo	Potencia instalada (Kw)
Mendoza	Guido			1	s/d
Tunuyán	Valle de Uco	1956-57 a 2005-06	44	1	
Aconcagua	Chacabuquito				
Maipo	El Manzano				
Jáchal	Pachimoco	1950-51 a 1989-90	38	1	43.000
Blanco	El Horcajo				
Patos Superior	Álvarez Condarco				
San Juan	Km. 47			2	45.000
Mendoza	Cacheuta/Guido	1954-55 a 2004-05	46		s/d
Tunuyán	Valle de Uco				s/d
Atuel	La Angostura			2	281.960
Colorado	Buta Ranquil			1	60.000

Todas las estaciones de aforo miden caudales naturales, no sujetos a regulación por operación de embalses. Los datos de potencia instalada fueron tomados del Informe anual del sector eléctrico (Argentina, 2004)

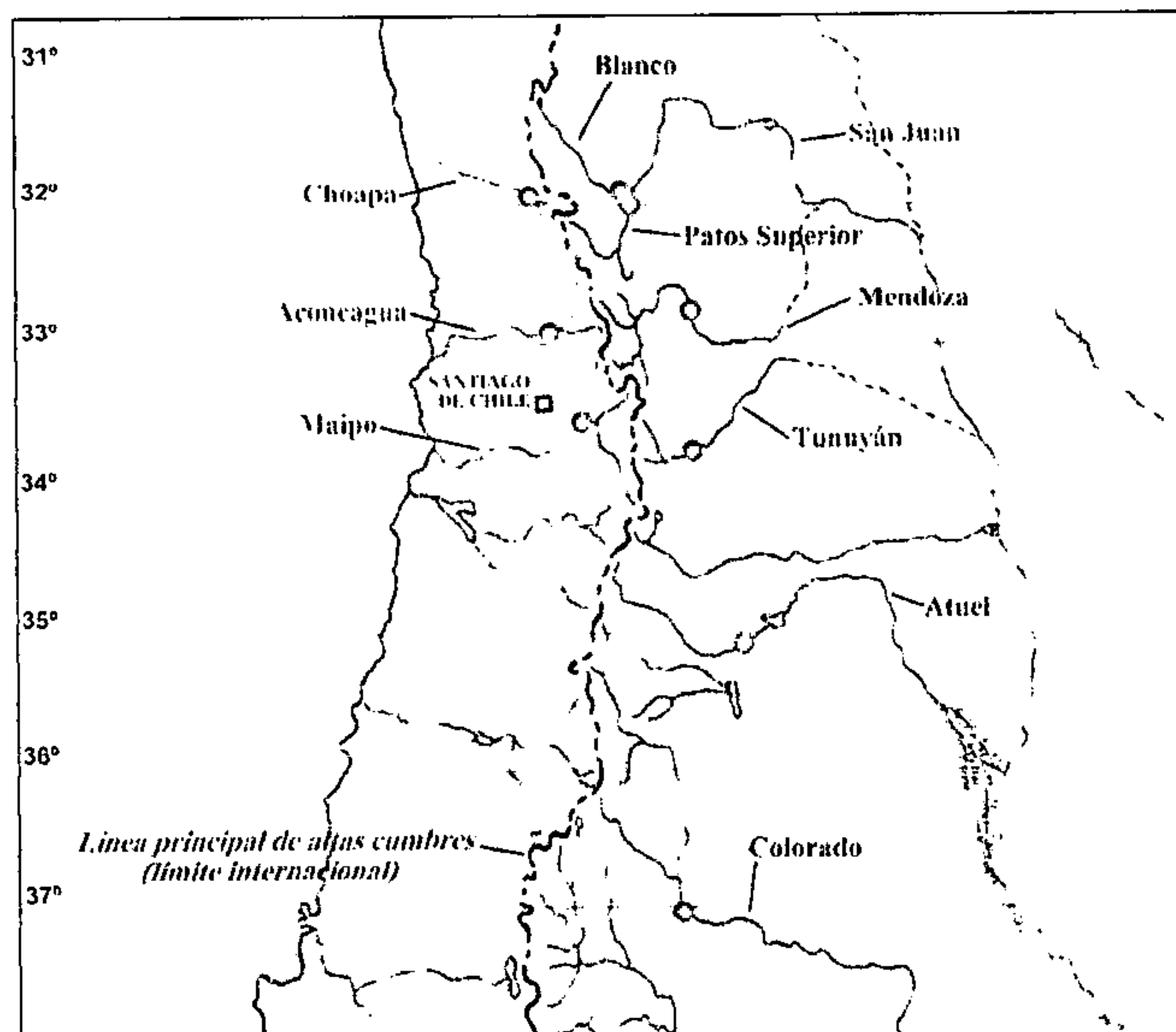


Figura 1 : ríos y ubicaciones de aforos.

Con los caudales mensuales se calcularon los derrames (volúmenes escurridos por año). Los derrames se utilizan, luego de exponer la correspondiente justificación, en determinados casos

como indicadores del monto anual de precipitación en la cuenca activa correspondiente. Este punto de vista, formulado por Bruniard para valores hidrodinámicos, fue aplicado por estos autores (Lascano y Villalba, 2005b) ante la falta de representatividad o brevedad de las pocas series pluviométricas medidas en los Andes (Lascano, 2006). El derrame también fue utilizado como *proxy* del monto anual de la precipitación sobre la vertiente Oeste de los Andes en el estudio de Aceituno y Vidal (1990). Al tratarse de un sector del país con una marcada estacionalidad invernal de la precipitación, el derrame en determinados casos no sólo indica el monto invernal de precipitación, sino también de la magnitud de la acumulación estacional de nieve. A medida que crece la incidencia del desfase interanual el valor del derrame como *proxy* del monto de precipitación se reduce. La retención de una parte de la precipitación que se produce durante años abundantes y la restitución que ocurre en años secos pueden apartar significativamente el ritmo del derrame del ritmo de la variabilidad de la precipitación. Por esta razón se discriminan fisiográfica e hidrológicamente los casos en que la componente glaciario-nival no existe o donde no es significativa, para luego resaltar su incidencia en otros casos.

Todo el desarrollo del trabajo tiene como base el concepto de cuenca activa (Barrera, 2002), particularmente útil para la comprensión del escurrimiento de la vertiente Este de los Andes. Sobre este flanco los aportes se producen sólo en una parte de la superficie total aguas arriba de cada aforo. Su delimitación precisa requeriría conocer en detalle la pluviometría de montaña y esa información no está disponible. A los fines de este estudio se adopta un criterio morfológico: la cuenca activa corresponde al ámbito comprendido entre la línea principal de altas cumbres, coincidente con el límite internacional entre la Argentina y Chile, y la cresta del siguiente cordón al Este, que para las cuencas de los ríos Blanco, Patos Superior, Mendoza y Tunuyán coincide con la Cordillera Frontal. Como fuera señalado por Vallejos (1973) existen buenas correlaciones entre el máximo de nieve acumulada en puntos de registro y los caudales de fusión a raíz la estructura topográfica y climática del macizo andino central, donde los cordones son paralelos. De esta forma el volumen crítico de la precipitación, 100% nival, se acumula en una estrecha franja entre la cresta del cordón principal, y la de la Cordillera frontal, donde no se producen lluvias, ni invernales ni estivales, que puedan distorsionar la relación entre nieve y escorrentía (Vallejos 1973). Las superficies resultantes de la aplicación del criterio enunciado pueden verse en la figura 2. En la figura 3 se muestran las alturas medias de cuenca correspondientes, ordenadas de norte a sur y en forma consecutiva.

Para el análisis altimétrico de la vertiente Este se utilizó la cobertura de curvas de nivel de las cartas 1:250000 del IGM, con equidistancias de 200 y 250 metros según el caso, aplicando los conceptos metodológicos expuestos por Bruniard (1992). Para la vertiente Oeste se procesaron las coberturas vectoriales del Ministerio de Obras Públicas de la República de Chile, disponible en forma gratuita en www.sinia.cl. Para hacer comparaciones entre las distintas cuencas se reconvirtieron los resultados a una equidistancia de 250 metros.

Por último, para ilustrar algunos caracteres hidrológicos, se calculó a partir de los 12 caudales medios mensuales de cada año hidrológico un Índice de Estacionalidad (de ahora en adelante IE), aplicado al análisis de los ríos del Oeste de los EE.UU (Stewart *et al*, 2005) y de la Argentina (Lascano y Villalba, 2005a, Lascano y Villalba 2005b). El IE mide el carácter tardío o temprano del escurrimiento estacional cada año. Su fórmula es:

$$IE = \sum (t_i q_i) / \sum q_i$$

donde t_i es el tiempo en meses desde el comienzo del año hidrológico, y q_i es el caudal medio mensual correspondiente al mes i . Al ser aplicado a un año hidrológico Julio-Junio un IE de

valor 1 equivale en forma teórica al 15 de julio. El valor 2 correspondería al 15 de agosto. En el caso del Colorado adoptamos el año hidrológico abril-marzo, por lo que el valor 1 del IE corresponde al 15 de abril. Este indicador es independiente de los volúmenes de derrame, al igual que los coeficientes mensuales de Pardé (1968).

Metodología

Así como el derrame puede ser un buen indicador de la precipitación anual, otros parámetros hidrológicos sencillos contienen información sobre la configuración ambiental de una cuenca cuando se procede de forma comparativa entre varias cuencas que comparten varios atributos. En este trabajo se hacen por un lado comparaciones en el sentido latitudinal entre las cuencas y escurrimiento de los ríos Blanco, Patos Superior, Mendoza, Tunuyán, Atuel y Colorado. Por otro se comparan dos pares de cuencas, cada uno con nacientes en el mismo rango latitudinal: en primer término la del Mendoza junto a la del Aconcagua, y luego la del Tunuyán con la del Maipo. Es decir, se comparan los regímenes hidrológicos y la altimetría de norte a sur y entre las dos vertientes de los Andes en un trecho para el cual se dispone de series hidrológicas completas.

La atención se dirige a los datos de caudal mensual de fines de primavera y verano sobre todo. El valor de esta información como indicador de la acumulación invernal y la fusión y/o derretimiento durante la estación cálida tiene que ver con la persistencia de la estacionalidad de la precipitación en la alta Cordillera. El desplazamiento anual cíclico del anticiclón del Pacífico sur (Minetti *et al.*, 1982) determina una regularidad mínima en la concentración de la precipitación durante el invierno, así como la sequedad del verano. En otras regiones del mundo las precipitaciones estivales impiden la interpretación de los datos de caudal realizada aquí (ver Stahl y Moore, 2006).

Resultados

Como primer recurso comparativo se utiliza la altura media de las cuencas activas correspondientes. Para los ríos de la vertiente Oeste la cuenca activa es el total de la superficie cerrada en el aforo. Para la vertiente opuesta se aplica el criterio enunciado. En la figura 2 se presentan las superficies utilizadas, y en la figura 3 las alturas medias obtenidas.

La cuenca activa del Mendoza es la única que supera los 4000 metros de altura media, con una diferencia de más de 300 metros respecto a las del Tunuyán y Patos Superior. Como puede observarse, los cambios meridionales de altura de los Andes sugieren ya de por sí un ámbito de grandes alturas, del Atuel al norte. Al contrario entre esta cuenca y la del Colorado Superior (Grande) la diferencia de altura media es de más de 700 metros. Un segundo salto se produce entre el área de aporte del Barrancas y la del alto Neuquén. Sintetizando algunos resultados que veremos a continuación, y retomando la interacción estacional entre la isoterma de 0 °C y el volumen orográfico (Bruniard, 1994), se puede asociar estos dos “escalones” con las componentes de alimentación sólida en la vertiente oriental: del Barrancas al norte predomina la alimentación nival y la pluvial no está presente de manera significativa (aunque durante algunos años alcance algo de visibilidad). Del Atuel al norte la componente líquida desaparece por completo, la nival es la más importante, a su vez que se agrega la glaciaria con distintos grados de incidencia. El planteo desarrollado a continuación apunta a comprender de forma más precisa el rol de esta última.

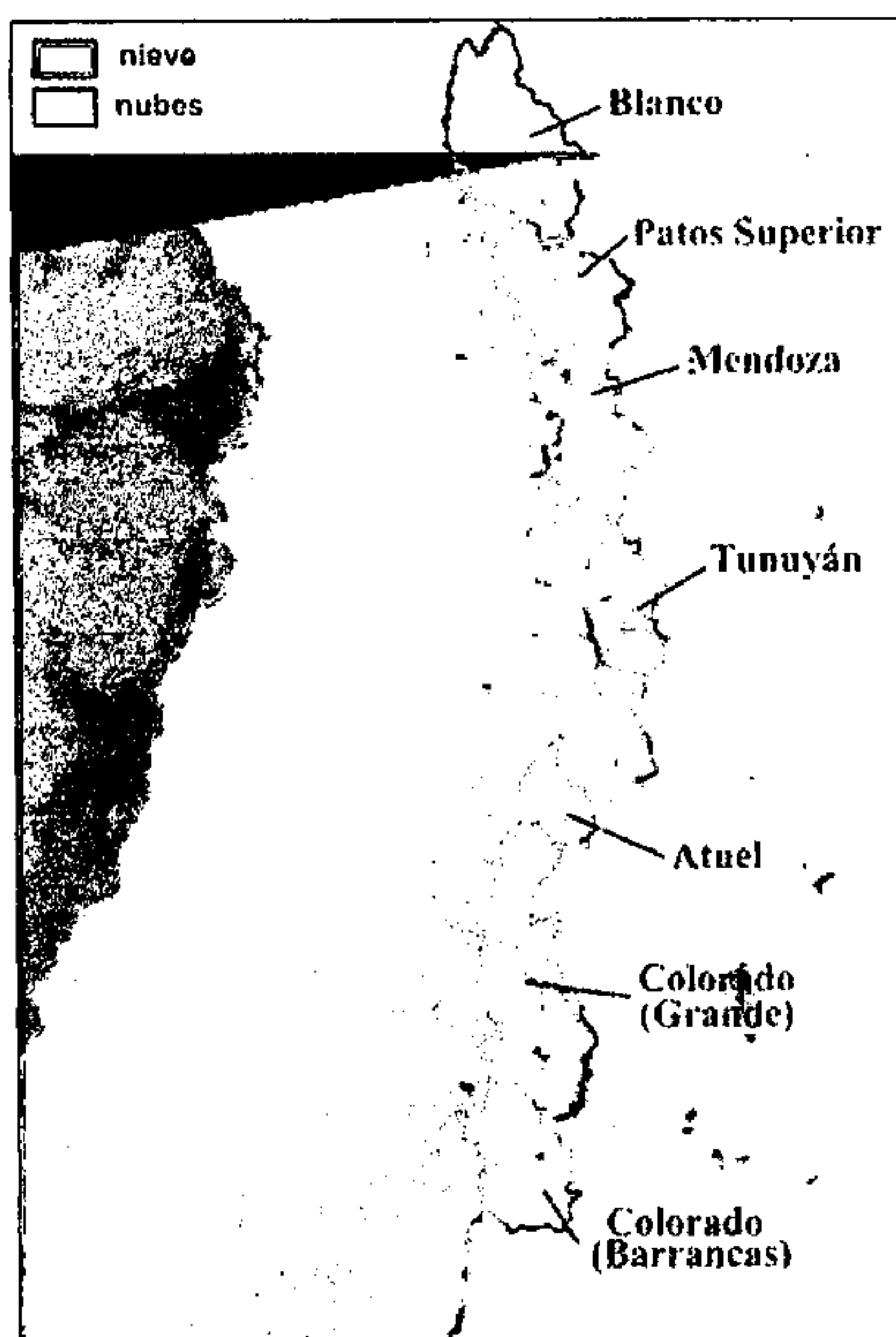


Figura 2 : delimitación de cuencas activas en Cordillera central. Perímetros impuestos sobre el manto nival definitivo del año hidrológico 2002-03. Imagen NOAA AVHRR del 29/09/02, canales 1,3,5.

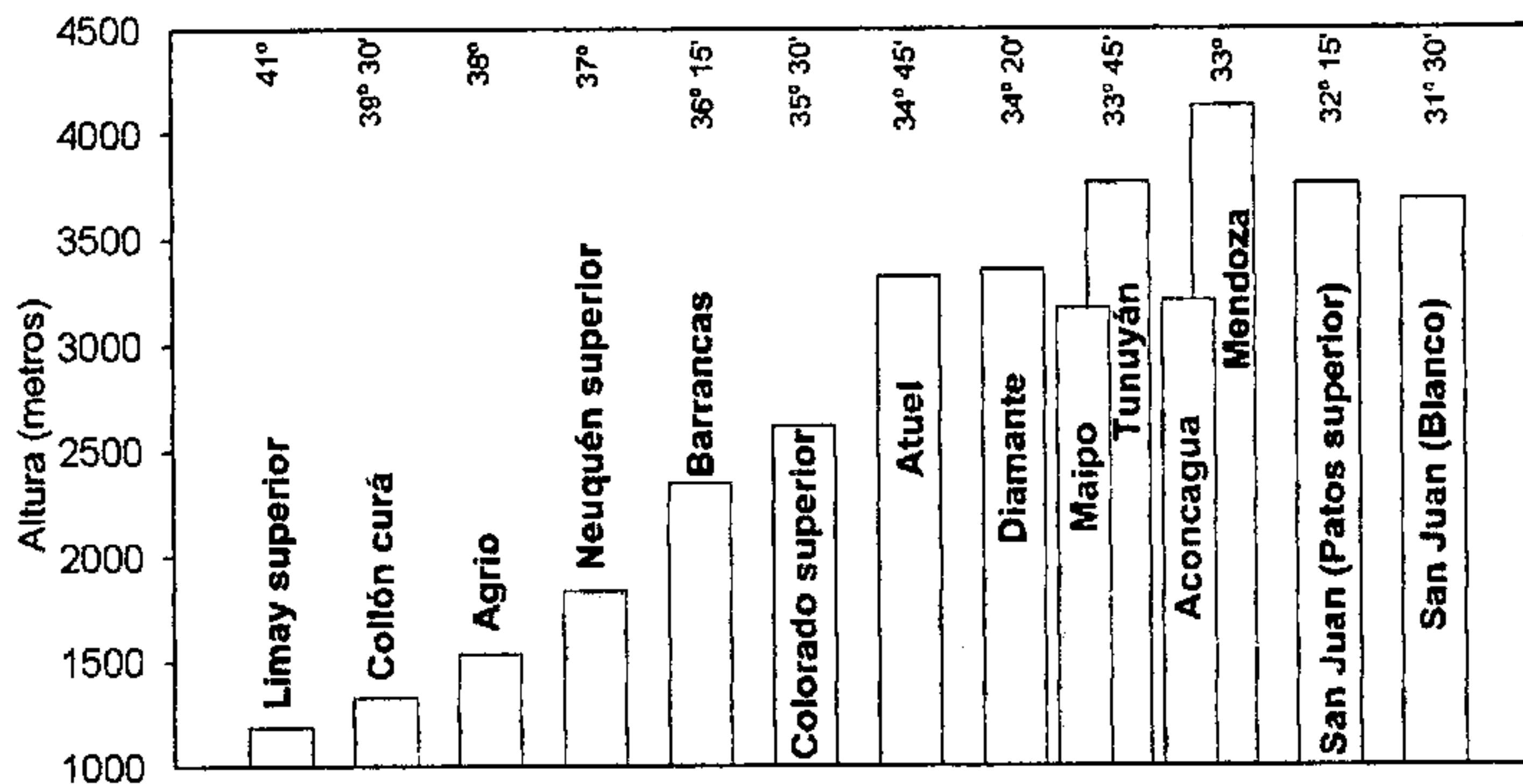


Figura 3 : alturas medias de las áreas de aporte hídrico efectivo (cuencas activas) de la vertiente oriental de los Andes entre los paralelos 31° y 41° 30' S. Las superficies correspondientes figuran en el plano n° 4 y el criterio de delimitación es explicado en el texto.

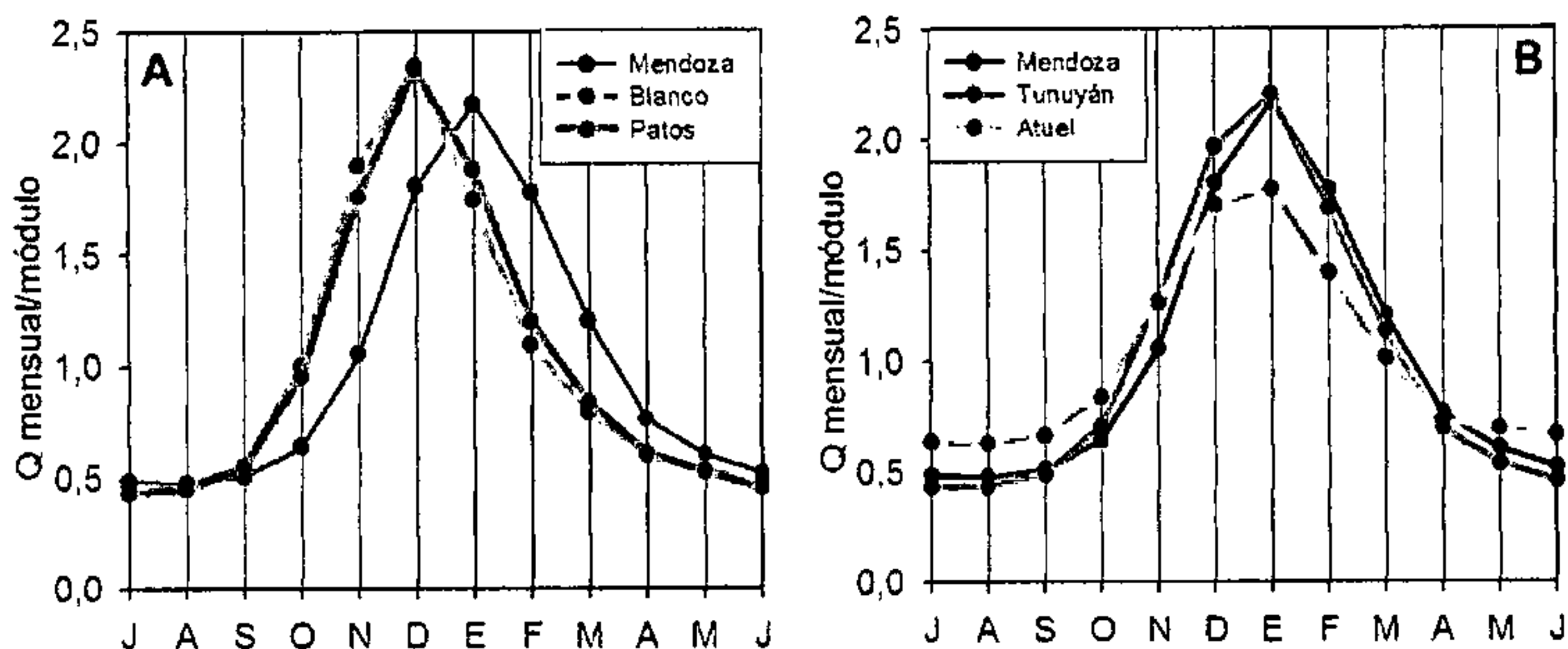
En primer lugar identificaremos los ríos de alimentación netamente nival donde la estacionalidad no responde ni a la precipitación líquida ni a los aportes del derretimiento de hielo o nieve interanual. Esto puede hacerse a partir de la clasificación de regímenes fluviales (Pardé 1968; Bruniard, 1992), que evalúa la reacción más o menos inmediata del caudal al incremento de la temperatura desde fines de primavera, es decir, con el comienzo de la fusión de la nieve y, cuando corresponde, con el comienzo del derretimiento de hielo. Se trata entonces de una clasificación que apunta a identificar, aunque sólo de manera general, los tipos de alimentación, a partir de los 3 caudales mensuales máximos. En el cuadro 2 se presenta la clasificación genética de regímenes hidrológicos estacionales (Bruniard, 1992).

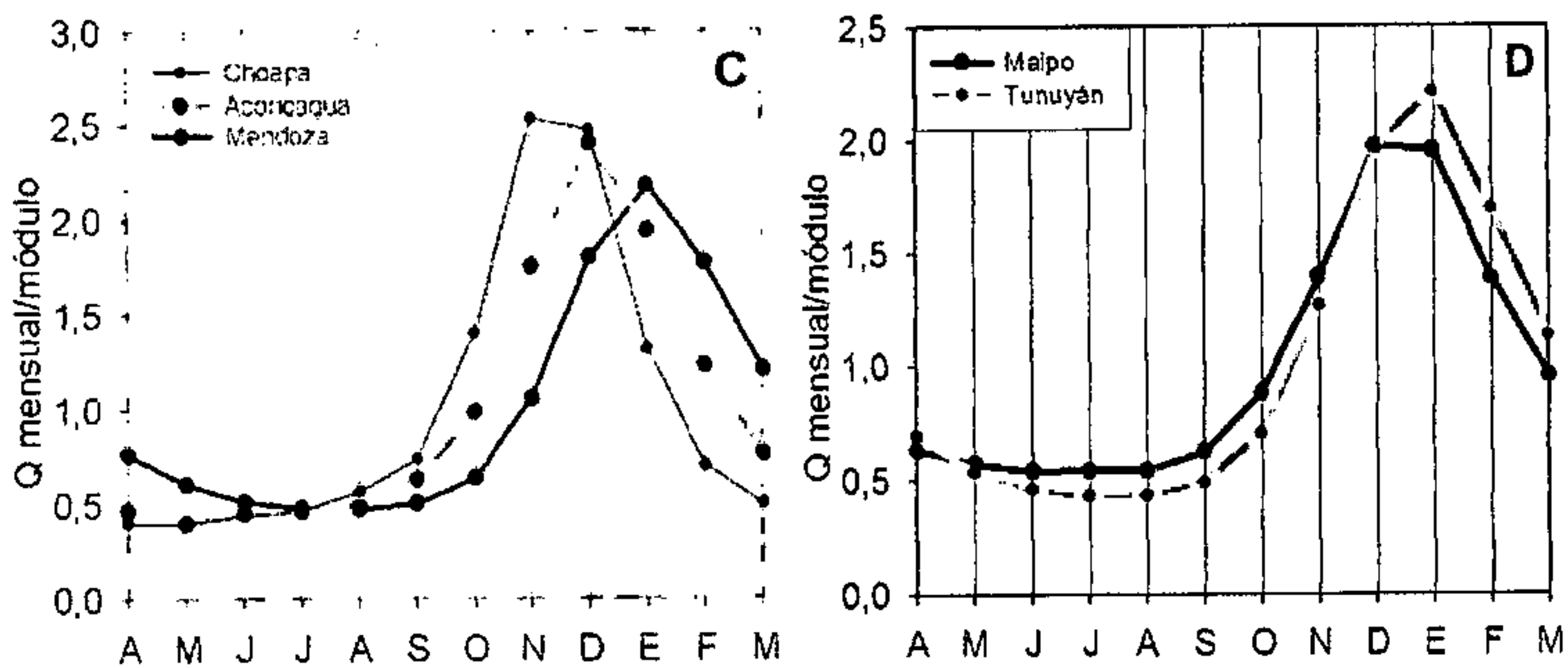
Cuadro 2 : Clasificación genética orientativa de regímenes fluviales

	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO	
ULTRAGLACIARIO												1°	
GLACIARIO CLASICO									3°	1°	2°		
GLACIARIO MITIGADO									2°	1°	3°		
NIVO-GLACIARIO								4°	1°	2°	3°		
NIVAL PURO								2°	1°	3°	4°		
NIVAL MITIGADO							3°	2°	1°				
NIVO-PLUVIAL												1°B	
PLUVIO-NIVAL				1°A	1°A								1°B

Tomado de Bruniard (1992) con modificaciones. 1A es el pico principal y 1B el secundario

Teniendo en cuenta la clasificación según los máximos mensuales, en la figura 4 presentamos las curvas estacionales de los ríos analizados en este trabajo. Se estandarizan los valores medios mensuales (Pardé, 1968) para facilitar la comparación entre ríos de distinto módulo.





Figuras 4 a, b, c y d : curvas estacionales de diferentes rios de los Andes centrales, vertientes Este y Oeste, entre los 31° y los 36°.

Esta información puede ingresarse en el cuadro anterior, que propone las clases de referencia, y aproximarse a la composición de la alimentación hidrológica:

Cuadro 3 : Regímenes fluviales de alimentación sólida en los Andes Centrales, vertientes occidental y oriental, clasificados según los 3 caudales medios mensuales máximos.

	tipología genética	OCTUBRE	NOVIEMBRE	NOVIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
Blanco	Nival puro		2°	1°	3°		
Choepa	Nival puro temprano	3°	1°	2°			
De los Patos	Nival puro a nivo glaciario		3°	1°	2°		
Aconcagua	Nival puro a nivo glaciario		3°	1°	2°		
Mendoza	Glaciario clásico a glaciario mitigado			2°	1°	2°	3°
Maipo	Nival puro a nivo glaciario		3°	1°	2°		
Tunuyán	Glaciario mitigado			2°	1°	3°	
Atuel	Glaciario mitigado			2°	1°	3°	
Colorado	Nival puro		2°	1°	3°		

Sobre la vertiente Este los ríos Blanco y Colorado quedan identificados como nivales puros, sin incidencias significativas ni de precipitación líquida ni de glaciares/nieve interanual. En cuanto al Mendoza puede señalarse que el comportamiento de febrero es alternante, así como el coeficiente para Marzo es mayor al de noviembre. Estos rasgos y algunos comportamientos que se analizan luego nos llevan a clasificar a este régimen de forma un tanto más cercana a los glaciarios. Por otro lado la componente glaciaria debe entenderse como una combinación del rol hidrológico de los cuerpos de hielo y del aporte desde nieves de persistencia interanual. Este último factor, que responde a las condiciones de aridez de los Andes, sólo pudo ser identificado recientemente mediante el uso de información satelital de alta resolución.

A partir de diferentes análisis hidrológicos adicionales puede ponerse a prueba este primer resultado. Un primer paso tiene que ver con la relación entre la fluctuación estacional de la temperatura y la del caudal en el caso del río Mendoza. En la figura 5 se muestra las curvas

estacionales del caudal, y las temperaturas medias máximas medias en Cristo Redentor para el período 41-84. Como señala Bruniard (1994), en el caso de los ríos que cuentan con alimentación glaciaria significativa la curva del escurrimiento es solidaria con la de la temperatura.

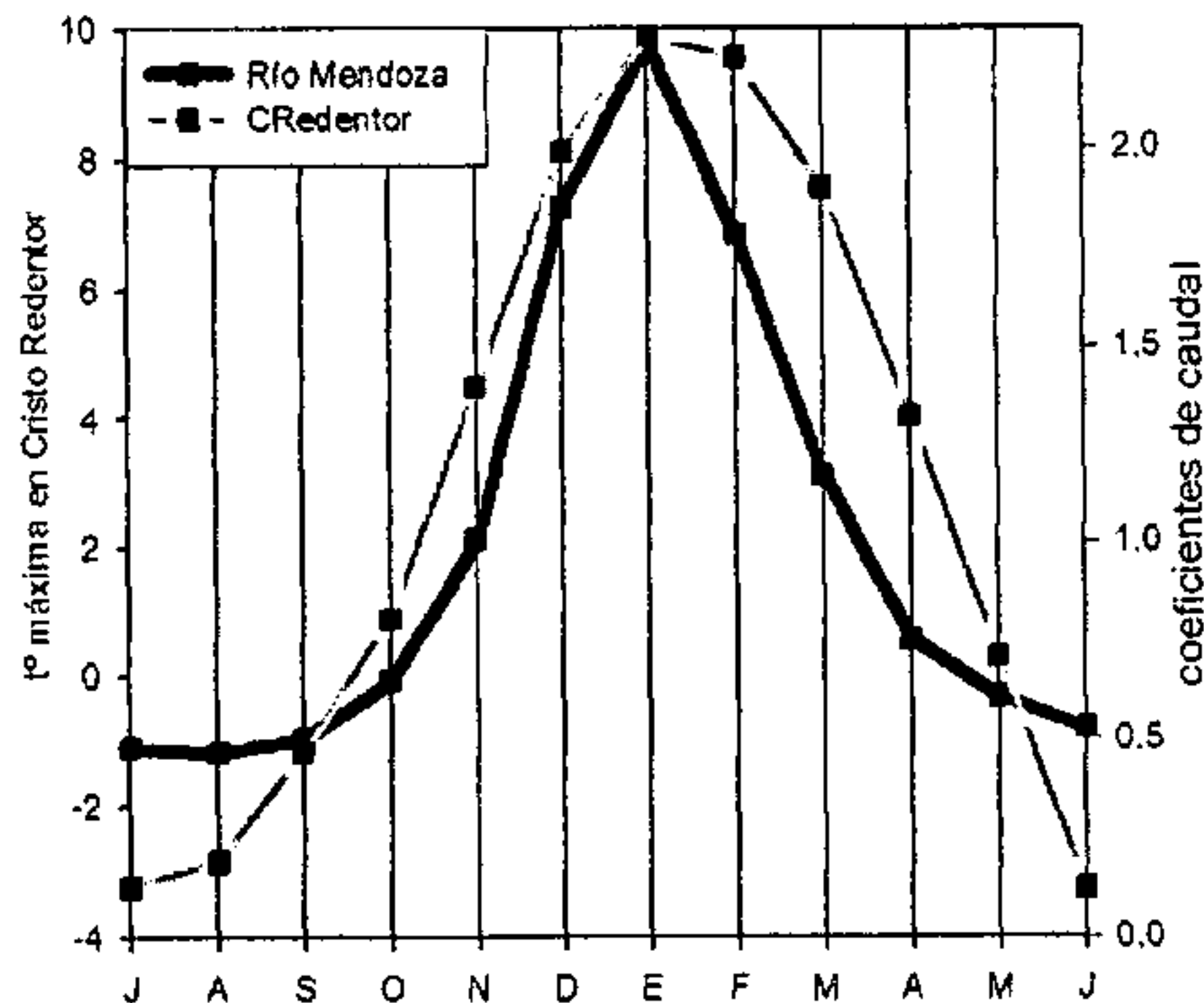


Figura 5 : coeficientes de caudal y temperatura máxima mensual en Cristo Redentor, 41-84.

La presencia de glaciares indica que dentro de la cuenca se dan las condiciones para el desfase interanual de agua. Por lo tanto, así como el ascenso de la isoterma de 0 °C marca el comienzo de la alimentación nival, su descenso a partir de fines del verano determina el cese de los aportes desde los cuerpos de hielo y manchones de nieve situados a lo largo de los rangos altimétricos superiores. De ahí que en términos medios la curva de caudal tienda a seguir la de temperatura. Por esta razón, a modo de comparación en la figuras 4 a, b y c siempre se incluye la curva estacional del Mendoza. Cuanto más tempranos sean los otros regímenes mayor es la importancia de la componente nival, y menor es la eventual incidencia hidrológica del desfase interanual de agua. Un buen indicador general de esta componente es el coeficiente de febrero de cada río, que puede compararse con el del río Mendoza.

Un segundo paso tiene que ver con la prolongación de las altas aguas del ciclo hidrológico determinada por la disponibilidad de nieve. La estacionalidad puede verse afectada por el desarrollo de un manto nival de espesor mayor a la media (Lascano y Villalba 2005b). Aquí comenzamos a dilucidar en qué medida tal situación retrasa la culminación de las altas aguas primaverales o estivales de los ríos andinos. De igual manera el pulso estacional será más temprano (además de volumen reducido) si durante el invierno la precipitación estuvo por debajo de la media. En las cuencas con aportes sustantivos desde los reservorios interanuales de hielo y nieve el efecto compensatorio en años de escasez invierte la correlación entre derrame e IE: en los años de precipitación escasa o muy escasa el agua proveniente de glaciares o neveros puede ser el principal aporte.

Esta fuente de aportes está presente a lo largo de los rangos altimétricos máximos, asociados al máximo ascenso de la isoterma de 0 °C. De esta forma en los años de componente nival estacional reducida, gran parte o la mayor parte del derrame ocurre hacia enero y febrero. En síntesis, cuando la componente nival es extremadamente reducida, se vuelve mucho más visible

la glaciario-nival interanual. En la figuras 6a y 6b se presenta el comportamiento que registraron los ríos Blanco y Mendoza durante dos años hidrológicos resultantes de precipitaciones invernales muy escasas. Los inviernos de 1968 y 1996 fueron precedidos a su vez de inviernos con aportes atmosféricos por debajo de la media. Como puede observarse en ambos casos, para el año hidrológico 68-69 el primer máximo se dio en febrero, y durante 96-97 en enero con el segundo caudal en febrero (notablemente mayor al de diciembre). Lo que diferencia las respuestas de estos dos ríos es el apartamiento del módulo respecto a la media, indicados en el cuadro 4. La magnitud de este apartamiento es un índice de la importancia hidrológica del desfase interanual en cada caso. En el caso de la cuenca del Mendoza el desvío del derrame es mucho menor, en correspondencia con su mayor altura media. Es interesante notar lo reducido de los desvíos registrados en marzo de estos dos años. En el mismo cuadro 4 figuran los valores de IE correspondientes a los dos años seleccionados, que no se apartan significativamente del promedio. Es más, en el caso del Mendoza son más tardíos.

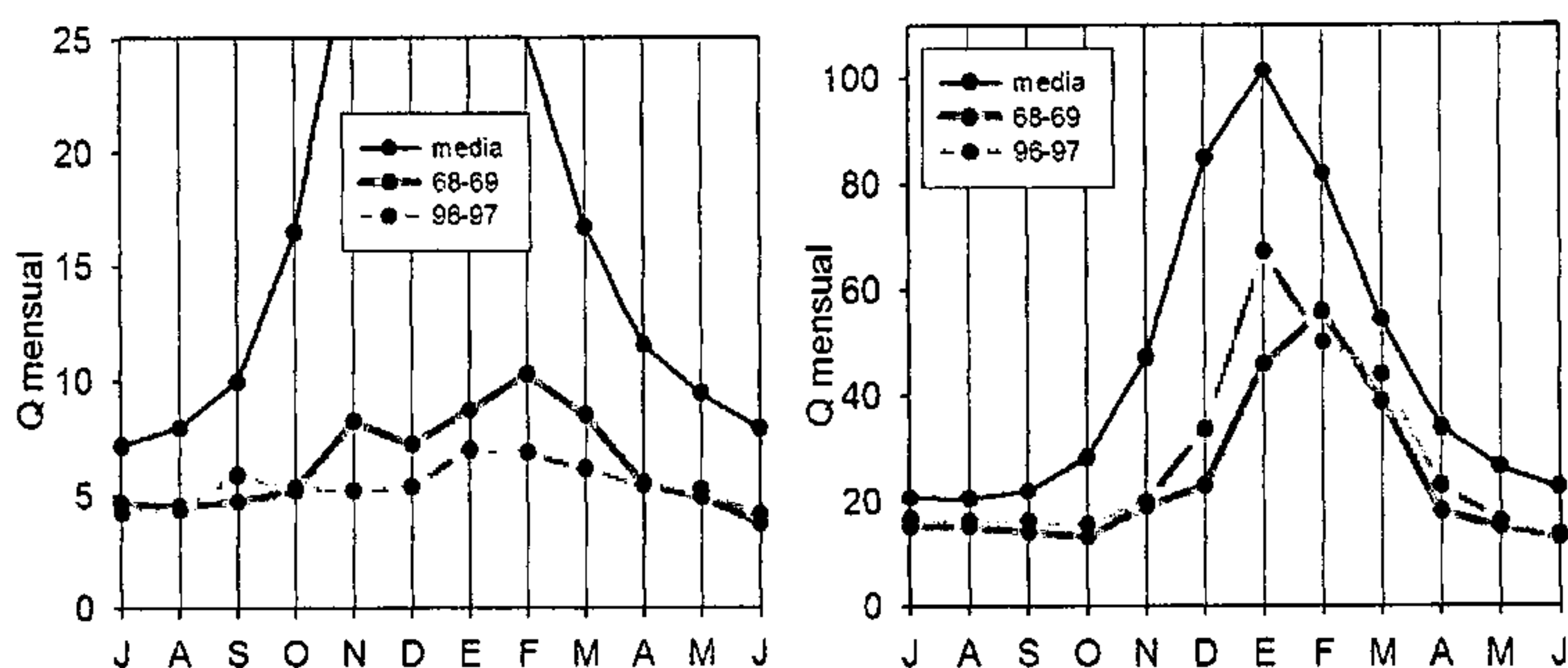


Figura 6 : escurrimientos de los años hidrológicos 68-69 y 96-97 de los ríos Blanco y Mendoza.

Cuadro 4 : apartamientos del derrame y del IE durante dos años hidrológicos escasos.

	Blanco		Mendoza		ppt sgo d c
	IE	módulo	IE	módulo	
68-69	6,39	-77,8%	6,97	-47,8%	-78,6%
96-97	6,27	-66,7%	6,93	-39,0%	-49,3%
media	6,33	---	6,87	---	

Esta determinación del ritmo estacional generada en años escasos por el almacenamiento interanual produce una interferencia en la correlación entre el derrame y el IE: la buena correlación que se da en años abundantes se invierte en el caso de los años más escasos, es decir, la curva estacional es más tardía cuanto menor es el derrame. Esto se debe a que cuanto menor es el derrame un mayor porcentaje de la alimentación tiene origen glaciario/nival interanual y por lo tanto una mayor proporción del escurrimiento se da en torno a enero y febrero. Esto quedó constatado durante los dos años hidrológicos analizados. Los niveles de correlación aumentan en todos los casos al separar los años de menor derrame (Lascano y Villalba, en preparación). Esta inversión de la correlación desaparece en aquellas cuencas donde el aporte glaciario es despreciable. En estos casos la dependencia de la estacionalidad respecto al volumen del manto nival es notablemente mayor. En el cuadro 5 se presentan las correlaciones entre derrame y el IE.

Cuadro 5 : correlaciones entre el derrame y el IE

blanco	Patos	Mdz	Tnyn	At	Col
,3808	,3769	,0702 ns	,3213 ns	,0610 ns	,7203
		0,3126	0,548		
		Accg	Mpo		

Correlaciones significativas al 99% de confianza, excepto donde se indica *ns* (no significativa)

La correlación más alta se da en el caso del río Colorado, donde la precipitación anual explica el 52% de la variabilidad de la estacionalidad. Esta cuenca es la más baja entre las que muestran un solo pulso estacional anual. La altura, como quedara señalado al comienzo, indica a grandes rasgos sobre que proporción de la superficie de una cuenca se dan las condiciones para el desfase interanual de agua. En el caso del río Blanco el r es menor por la inversión de la correlación en años como el 68-69 y 96-97. Comparando la distribución altimétrica de la cuenca del Colorado con aquellas para las cuales se ha relevado la superficie de cuerpos de hielo puede identificarse aún con mayor seguridad el carácter nival de su régimen de alimentación, ya reflejado sustancialmente en el cuadro 5.

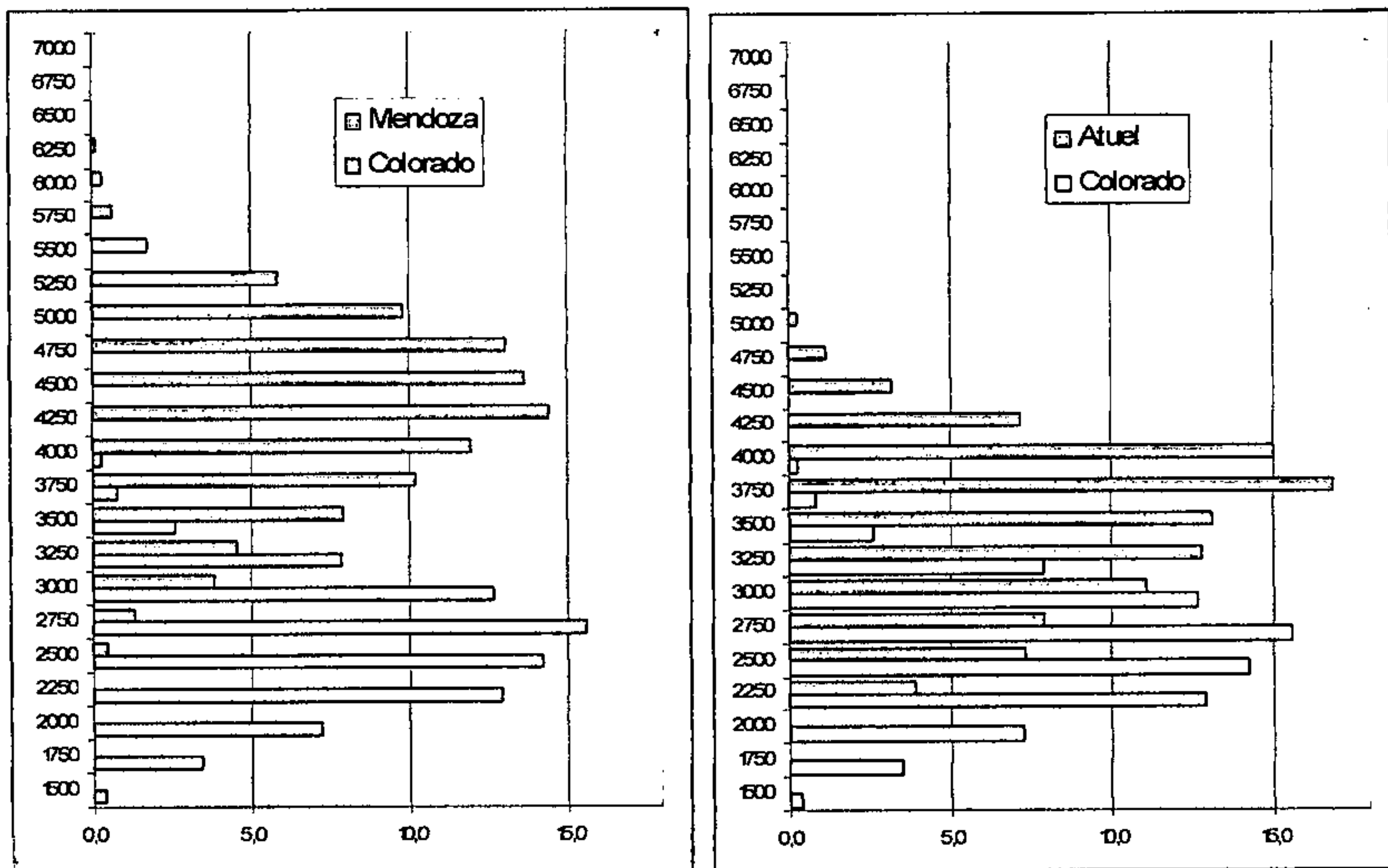


Figura 7 : comparación de la altimetría de varias cuencas de la vertiente Este de los Andes.

Hay dos diferencias importantes en las distribuciones altimétricas. Por un lado puede tenerse en cuenta que el rango con mayor superficie del Colorado está comprendido entre los 2500 y los 2750, mientras que en los casos del Atuel y el Mendoza está entre los 3500 y 3750, y los 4000 y los 4250. La segunda diferencia puede verse en relación con algunos umbrales que han

señalado algunos autores respecto a la acumulación sólida interanual. Trombotto *et al.* (1999) indican que el límite inferior del desarrollo de glaciares de roca está a los 3700 metros en cordillera central. Bruniard (1994) halló que en la cuenca del Mendoza la cota promedio de la isoterma media de 0 °C de enero está a los 4257 metros. En el cuadro 6 se compara la proporción de cada cuenca por sobre estos umbrales, tomando las isohipsas de 3750 y 4250.

Cuadro 6: rangos altimétricos críticos en cuencas activas de los Andes Centrales

	blanco	Patos	Mdz	Tnyn	At	Col
% sobre 3750	39,7	50,00%	71,80%	50,50%	28,10%	3,1%
% sobre 4250	15%	22,2%	45,4%	25,5%	5,4%	0,6%
% sobre 4250			5,5%	10,3%		
% sobre 3750			24,5%	24,9%		
			Accg	Mpo		

Estos dos umbrales señalan de forma general y a escala de las cuencas la estratificación hidroclimática en la que se desarrollan los procesos hídricos de almacenamiento interanual. Esta interpretación es posible a través del modelo hidroclimático propuesto por Bruniard (1994) para la vertiente Este de los Andes. Considerando que se trata de los rangos altimétricos referidos a la alimentación interanual, también presente en la vertiente Oeste, extendemos la aplicación del modelo al lado opuesto de la Cordillera. Por otro lado cabe tener en cuenta que los dos umbrales altimétricos elegidos fueron identificados en la cuenca del Mendoza. Hacia el norte por lo tanto los procesos hídricos asociados se desplazan hacia sectores algo más altos, y hacia el sur hacia sectores más bajos. Esto tiene que ver con la pendiente latitudinal de la isoterma de 0 °C (ver Bruniard, 1994; Carrasco *et al.*, 2005), cuya incidencia es constatable al comparar los resultados vistos para el Blanco y el Atuel. Con mayor altura media el comportamiento del caudal en el primer caso responde a la alimentación nival, y en el segundo la componente glaciaria es significativa. Desde este marco general es que realizamos la lectura de las cifras consignadas en el cuadro 6.

Todas las cuencas, excepto la del Colorado, desarrollan un parte importante de sus superficies por sobre los 3750 msnm. Esta cota, aún considerando la pendiente latitudinal de la estratificación térmica, no parece tener un rol explicativo desde el punto hidrológico, por ejemplo, tomando nuevamente las diferencias entre las curvas del Blanco y el Atuel. De la misma manera los regímenes del Patos y el Tunuyán deberían estar más desplazados hacia febrero, ya que la mitad de sus áreas de aporte estarían en el piso glaciario. La cota promedio de la isoterma media de enero parece mostrar más correspondencia con la temporalidad de las estacionalidades de los diferentes ríos. La cuenca activa del Mendoza, de acuerdo con el carácter tardío del régimen de escurrimiento, muestra la mayor proporción por sobre los 4250 msnm. El Blanco, con una altura media de cuenca activa similar a la del Patos, muestra un menor desarrollo por sobre este umbral. El área de aporte del Colorado sobrepasa los 4250 msnm en una parte mínima de su superficie.

En síntesis, a partir de la distribución mensual de su escurrimiento, de la variabilidad interanual de su derrame, y finalmente a partir de sus estructuras altimétricas, puede considerarse que los ríos Blanco y Colorado se alimentan a partir de la fusión de la nieve de modo dominante. Los aportes de otros componentes (aporte líquido invernal, aporte líquido estival y aporte glacio-nival interanual), presentes o no, no se reflejan de manera significativa en la variabilidad interanual. Para el objetivo de este trabajo es particularmente importante haber identificado que en años de escasez el aporte glaciario-nival interanual no alcanza volúmenes significativos. En el caso del Blanco esto se verificó a partir de la estacionalidad y el volumen escurrido de los

años 68-69 y 99-99. En el caso del Colorado el salto altimétrico (ver figura 3) y el escaso desarrollo de su área de aporte por sobre los 4250 msnm indican de manera concluyente la falta de relevancia de los aportes que puedan corresponder a un desfase interanual de precipitaciones.

De esta manera los derrames de los ríos Blanco y Colorado son indicadores de la variabilidad interanual de la precipitación en la Cordillera central. Tomando los coeficientes de variabilidad de estos ríos puede establecerse un gradiente latitudinal de variabilidad de la precipitación anual. De esta forma puede obtenerse un dato aproximado de la variabilidad interanual de la precipitación en las cuencas situadas entre las del Blanco y Colorado. Aunque sólo de manera preliminar, se soluciona el problema de la falta de mediciones de precipitación en los sectores de los Andes más altos, es decir, aquellos hidrológicamente significativos.

Discusión

En el cuadro 7 presentamos para cada río la variabilidad interanual del derrame y la variabilidad interanual estimada de la precipitación para la latitud central de cada cuenca activa. Se agrega la variabilidad de la precipitación en Santiago de Chile, que muestra la buena adecuación de la extrapolación latitudinal realizada. Todos los datos se refieren al período 54-04.

Cuadro 7 : variabilidad interanual del derrame y variabilidad estimada de la precipitación para cuencas de los Andes centrales entre los 31° y 35°.

54-04	Cca del río Blanco	Cca del Patos Superior	Cca del Mendoza	Cca. Del Tunuyán	Cca. Del Atuel	Cca. Del Colorado
1 variabilidad derrame (C.V.%)	68,4	50,2	25,0	27,4	22,7	31,1
2 variabilidad ppt anual estimada (C.V.%)	68,4	61,4	54,4	47,4	38,1	31,1
3 variabilidad ppt Sgo d c (C.V.%)				47,7		
4 dif entre var ppt y var derrame (puntos porcentuales, 2-1)	0,0	11,1	29,4	20,0	15,4	0,0
5 % dif de variabilidad / var ppt (3/2*100). Porcentaje de variabilidad suavizado por almacenamiento interanual	0,0	18,1	54,0	42,2	40,4	0,0

La información desplegada en este cuadro permite separar la variabilidad compensada por los aportes interanuales de la variabilidad interanual de la precipitación que muestra un gradiente norte-sur. Se trata de una serie de dinámicas hidrológicas que resultan de la conjugación del campo pluvial (ver Vargas y Compagnucci, 1985) y de la altimetría de los Andes. A grandes rasgos puede reconocerse que el apartamiento entre los valores de las filas 1 y 2 siguen los cambios altimétricos en los Andes. Los ríos Mendoza y Tunuyán, cuyos regímenes son los más tardíos, muestran el mayor apartamiento.

La distancia entre la variabilidad estimada de la precipitación y la del derrame es el dato central para responder las preguntas que generaron este trabajo. El modelo planteado supone que esta es cero en los extremos, desde que se trata de cuencas cuyo drenaje es mayormente nival. En el caso del río Blanco, la estacionalidad de los años 68-69 y 96-97 muestran que existe un volumen reconocible de alimentación glaciaria, pero que sólo alcanza una parte reducida del derrame. Pero en definitiva el aporte glaciario, aunque mínimo, está ejerciendo un efecto compensador. A los fines de señalar de manera algo más precisa esta restricción del modelo propuesto se analizan en el cuadro 8 los derrames de los años 68-69 y 96-97 con y sin el volumen estimable aportado por el desfase interanual (glaciares+nieve interanual). Los derrames parciales de los meses de enero, febrero y marzo ofrecen, para estos dos casos, una estimación satisfactoria a los fines de este trabajo. Se presentan entonces los derrames registrados y los derrames correspondientes sólo a la componente nival estimada, equivalente al derrame total menos el aporte glacio-nival estimado.

Cuadro 8 : desagregación general de componentes de alimentación del río Blanco para los años hidrológicos 68-69 y 96-97

	1	2	3	4	5	6
	derrame total (hm3)	alimentación interanual estimada (hm3), 1-3	componente nival estimada(1-2), en hm3	% respecto a la media de 1	% respecto a la media de 2	diferencia (puntos porcentuales, 4-5)
Blanco 68-69	168,2	52,0	116,3	22,5%	15,5%	6,9%
96-97	252,5	81,4	171,1	33,8%	22,9%	10,9%

Como puede observarse en el caso del río Blanco puede estimarse que en un año seco la alimentación interanual sólo incrementaría el derrame algunos puntos porcentuales. Por lo tanto durante años de precipitación abundante la retención sería igualmente reducida. De forma que si bien efectivamente existe una componente interanual, esta no es significativa. Esta falta de importancia puede verse nuevamente en comparación con el escurrimiento del río Mendoza, cuya cuenca tiene otra estructura altimétrica. El cuadro 9 reproduce el 8 pero referido al Mendoza.

Cuadro 9 : desagregación general de componentes de alimentación del río Mendoza para los años hidrológicos 68-69 y 96-97

	1	2	3	4	5	6
	derrame total (hm3)	alimentación interanual estimada (hm3), 1-3	componente nival estimada(1-2), en hm3	% respecto a la media de 1	% respecto a la media de 2	diferencia (puntos porcentuales, 4-5)
Mendoza 68-69	746,0	363,1	382,8	52,7%	27,1%	25,7%
96-97	871,0	420,1	450,9	61,6%	31,9%	29,7%

La comparación de la incidencia de la alimentación interanual puede hacerse de varias maneras. Conviene comenzar por los valores de la columna 2. El aporte glacio-nival interanual fue 7 y 5 veces mayor en el caso del Mendoza, con un área de aporte menor. Este dato refleja las diferencias en las estructuras altimétricas entre ambas cuencas. En segundo término, esta fuente de alimentación constituyó no más del 33% del derrame para el Blanco, a diferencia del casi 50% que aportó en el caso del Mendoza.

En síntesis, la variabilidad del caudal del río Blanco refleja adecuadamente la de la precipitación anual en su cuenca. Y aunque no sea significativa, la mínima componente glaciaria existente si nos permite afirmar que la variabilidad real probablemente sea levemente mayor. Ante la falta de datos para dilucidar esta última cuestión de detalle, adoptamos el valor de la variabilidad del derrame.

En el cuadro 7 también se incluyó la variabilidad de la precipitación anual en Sgo de Chile, ciudad localizada aproximadamente a la latitud de la cuenca de los ríos Maipo y Tunuyán. El ajuste del gradiente Blanco-Colorado es muy satisfactorio.

Por otro lado los resultados para el Mendoza y el Atuel van en el mismo sentido a lo identificado por Lascano y Villalba (2005b) a partir de las superficies de glaciares descubiertos y cubiertos (Corte, 1978a, 1978b) en ambas cuencas. En el cuadro 10 se reproducen las relaciones entre caudal y superficies de cuerpos de hielo.

Cuadro 10 : cuencas de los ríos Atuel y Mendoza. Superficie ocupada por cuerpos glaciarios y su relación con otros parámetros

Cuenca	Mendoza	Atuel
1 Superficie de la cuenca activa (km ²)	3153	2965
2 Superficie de glaciares (total, en km ²)	379,3	186
3 Glaciares descubiertos (km ²)	234,4	148,8
4 Glaciares cubiertos	144,83	37,2
5 Sup total gl/sup cuenca activa (2/1)	12,0%	6,3%
6 Módulo 55-56/ 99-00 (m ³ /s)	33,6 (PDVacas)	35,6
7 Sup gl/módulo (2/6)	11,3	5,2
8 Sup. de glaciares ajustada (total, en km ²)(3+4*0,5)	306,8	167,4
9 Sup gl ajustada / módulo (8/6)	9,1	4,7

Elaboración a partir de datos consignados por Corte y Espizúa (1981) y Cobos (1983)

Tanto en la fila 4 del cuadro 7 como en la fila 9 del cuadro 10 hay una relación de 2 a 1.

Conclusiones

A partir de la correspondencia entre precipitación anual en cuenca y derrame que puede establecerse en el caso de los ríos nivales, y con la aplicación de este recurso al caso de los Andes centrales, puede conocerse el rol de glaciares y nieves "eternas" en la alimentación de los ríos de la cordillera central. Las filas 4 y 5 del cuadro 7 proveen el panorama general sobre la incidencia de la alimentación glacio-nival interanual : la variabilidad interanual del derrame del río Mendoza queda determinada en gran medida por la existencia de condiciones ambientales para el almacenamiento interanual de agua. En los casos del Tunuyán y del Atuel se reduce la variabilidad estimada de la precipitación anual, así como la proporción de la cuenca para el desarrollo de reservorios interanuales de agua. La variabilidad del derrame queda entonces determinada principalmente por la de la precipitación. De acuerdo a su altimetría y a su posición septentrional, la cuenca del Patos Superior genera un escurrimiento levemente influenciado por la alimentación interanual, por lo que la variabilidad del derrame se aparta débilmente de las fluctuaciones de la precipitación anual.

Aún en el caso del río Mendoza, donde la alimentación interanual es significativa, cabe ampliar el análisis de las estrategias dirigidas a garantizar a los usuarios la disponibilidad de un mínimo volumen de agua cada año. Si bien la alimentación interanual garantiza un piso de derrame en años de precipitación escasa deben tenerse en cuenta dos factores en la interpretación de este rasgo del régimen fluvial.

En primer término la política hídrica debe apuntar a satisfacer el volumen mínimo requerido por los usos consuntivos (Sánchez Guzmán, 2005), y debe tender a independizarse del derrame mínimo garantizado por la componente interanual. Esto es particularmente relevante en el caso del río Mendoza, del cual depende la mayor ciudad del Oeste de la Argentina. Los requerimientos actuales de la industria, de la agricultura y de la población de la ciudad de Mendoza, en permanente crecimiento, pueden estar acercándose a superar el derrame garantizado por la componente interanual. El embalse Potrerillos restituye agua en el ciclo hidrológico siguiente, por lo cual constituye un primer nivel de provisión de infraestructura para la disminución del riesgo económico vinculado a la hidroclimatología andina. Lamentablemente en el plano público la presa es mencionada más que nada en relación a cuestiones sobre su construcción, y de esta forma han quedado de lado los beneficios y la seguridad que ha comenzado a brindar a la actividad productiva.

Aún considerando la capacidad interanual del nuevo embalse cabe prestar atención a situaciones hidrológicas como las de los años 68-69 y 96-97. Como fuera mencionado, estos dos años fueron precedidos de otros años secos. En este tipo de circunstancias debería evaluarse la capacidad de Potrerillos para garantizar la restitución de un aporte adicional durante el segundo año seco.

El segundo factor de la alimentación interanual a tomar en cuenta tiene que ver con su distribución a lo largo del año. Desde el punto de vista estacional la compensación hidrológica glacio-nival tiende a darse hacia fines del verano, es decir, defasada del comienzo (fines de agosto) y gran parte de la duración de los requerimientos de riego agrícola. Esto fue lo que sucedió durante los años hidrológicos 68-69 y 96-97. En las figuras 6a y 6b se aprecia como sobre todo durante noviembre y diciembre se agudiza la expresión hidrológica de un invierno poco nevador. Es decir que además de las necesidades de agosto, septiembre y octubre se requeriría cubrir las de otros 2 meses.

En síntesis, desde el punto de vista de la gestión del agua, la alimentación interanual que algunas cuencas están en condiciones de proveer no debe ser sobreestimada, sino más bien ser comprendida de manera precisa. En general se habla de "reservas de agua" contenidas en los glaciares, concepto que ha alcanzado un lugar en la sabiduría popular. Dentro de esta idea están también los neveros "permanentes", allí donde la variabilidad de la precipitación es alta. Esta "reserva" es tal en relación al nivel de utilización del agua, y en la toma de decisiones debe considerarse con la dimensión que le corresponde dentro del sistema de gestión. Este trabajo apunta a valorar de manera precisa el rol de los "glaciares" en el escurrimiento cordillerano.

Referencias :

- Accituno, Patricio; Vidal, Fernando. Variabilidad interanual en los caudales de Chile central en relación con la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico Ecuatorial. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Vol 5, núm. 1. Santiago de Chile. 1990.

- Argentina. Ministerio de Planificación Federal. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Caudales de los ríos analizados. Buenos Aires. 2006.
- Argentina. Provincia de Mendoza. Dirección General de Irrigación. Caudales 2005-06 de los ríos Mendoza, Tunuyán y Atuel. Mendoza. 2006.
- Barrera, Daniel. Apuntes de la Cátedra de Hidrología. Depto de Cc.s de la Atmósfera. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. 2002
- Bruniard, Enrique. Hidrografía. Procesos y tipos de escurrimiento superficial. Ed. Ceyne. Buenos Aires. 1992.
- Bruniard, E. Los regímenes fluviales de alimentación sólida en la República Argentina. Ensayo de elaboración de un modelo hidroclimático de la vertiente oriental de los Andes. Academia Nacional de Geografía, publicación especial n° 7. Buenos Aires. 1994.
- Carrasco, Jorge; Casassa, Gino; Quintana, Juan. Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences-Journal*. Diciembre de 2005.
- Chile. Dirección General de Aguas. Caudales mensuales de los ríos Choapa, Aconcagua y Maipo.
- Cobos, Daniel. Inventario de glaciares de la cuenca del río Atuel. Inédito. IANIGLA. CONICET. Mendoza. 1983.
- Corte, Arturo. La distribución de los glaciares, glaciares cubiertos y/o de escombros en la región de los Andes centrales y su relación con la distribución de las precipitaciones. *Anales del IANIGLA*. CONICET. Mendoza. 1978a.
- Corte, A. Significado hidrológico de los glaciares descubiertos, glaciares cubiertos y/o de escombros, cordillera de los Andes, Mendoza. *Anales del IANIGLA*. CONICET. Mendoza. 1978b.
- Corte, A; Espizúa, L. Inventario de glaciares de la cuenca del río Mendoza. CONICET. Mendoza. 1981.
- Jansson, Peter; Hock, Regine; Schneider, Thomas. The concept of glacier storage: a review. *Journal of Hydrology*. Febrero de 2003.
- Lascano, Marcelo E; Villalba, Ricardo. Impacto del calentamiento regional en los ríos de alimentación nival de la Argentina. XXXIII Congreso nacional del Agua. Mendoza, Mayo de 2005a.
- Lascano, M; Villalba, R. Análisis interanual de la estacionalidad de los ríos andinos. 66° Congreso Nacional de Geografía. GAEA, Sociedad Argentina de Estudios Geográficos. Buenos Aires. 2005b.
- Lascano, M; Villalba, R. Los desvíos en la estacionalidad de ríos de alimentación nival. En preparación. Departamento de Ccs. de la Atmósfera, UBA, y IANIGLA – CONICET. 2006.
- Lascano, M. Variabilidad del régimen de la cuenca del río Negro en relación al clima y al aprovechamiento energético. IX Jornadas Cuyanas de Geografía. Mendoza. 2002.
- Lascano, M. Dónde y como se mide la nieve en la Argentina. www.infraestructura.co.nr ► red nivométrica. 2006.
- Menegazzo, M; Minetti, J; Carletto, M; Barbieri, P. Régimen de variabilidad estacional y aperiódico de los escurrimientos superficiales de río andinos. *Revista Geofísica* 41, 159-176. Madrid. 1985.
- Minetti, Juan. Precipitación y escurrimientos superficiales de ríos andinos. *Geoacta*, vol 13 n° 1. Buenos Aires. 1985
- Minetti, J.; Radicella, Sandro ;Menegazzo de García, María; Sal Paz, Julio. La actividad anticiclónica y las precipitaciones en Chile y la zona cordillerana central andina. *Geofísica* 16. Méjico, 1982.
- Minetti, J; Carletto, Martha; de Ferrero, María. Proceso de memoria en el escurrimiento superficial del río San Juan. *Geoacta*. Buenos Aires. 1990.
- Pardé, Maurice. *Fleuves et rivières*. 4eme edition. París. 1968.
- Sánchez Guzmán. *Hidráulica aplicada*. Apuntes de cátedra. Facultad de Ingeniería. UBA. Buenos Aires., 2005
- Snaider, Patricia. Las precipitaciones nivales en la República Argentina. Secretaría de Ciencia y Técnica- Universidad Nacional del Nordeste. Informe inédito. Resistencia. 1999. Resumen presentado en las IV Jornadas de Geografía Física. Universidad Católica de Santa Fe. Santa Fe. 2000.
- Stahl, K; Moore, R. Influence of watershed glacier coverage on summer streamflow in British Columbia, Canada. *Water Resources Research*. Junio de 2006.
- Stewart, Iris; Cayan, Daniel; Dettinger, Michael. Changes toward earlier streamflow timing across western united states. *Journal of Climate*, EE.UU., abril de 2005.
- Trombotto, Darío. Buk, Enrique; Hernández, José. Rock glaciers in the southern central Andes (aprox. 33°-34° S), cordillera frontal, Argentina. *Bamberger Geographische Schriften* 19. Bamberg. 1999.
- Vallejos, Rubén M. Estudios nivológicos en los Andes cuyanos. En "El agua y el futuro regional". Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. 1973.
- Vargas, Walter; Compagnucci, Rosa. Relaciones del régimen de precipitación entre Santiago de Chile y la región cordillerana. *Geoacta*, vol 13 n° 1. Buenos Aires. 1985.