

# ANÁLISIS INTERANUAL DE LA ESTACIONALIDAD DE LOS RÍOS ANDINOS

Publicado en el tomo 2007 de Contribuciones Científicas, GAEA Sociedad Argentina de Estudios Geográficos. 66º Congreso Nacional de Geografía - GAEA

LASCANO<sup>1,2</sup>, Marcelo; VILLALBA, Ricardo<sup>2</sup>

1. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Universidad de Buenos Aires

2. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, IANIGLA - CONICET

[mejascano@yahoo.de](mailto:mejascano@yahoo.de), [mlascano@lab.cricyt.edu.ar](mailto:mlascano@lab.cricyt.edu.ar)

## RESUMEN

Los regímenes estacionales de los ríos más importantes del oeste y sudoeste del país responden no sólo a la precipitación sino también a la temperatura. Con el objeto de enriquecer la interpretación genética de la curva media de caudales medios mensuales se analizan las principales submodalidades de régimen según la variabilidad interanual pluvial y térmica. Se halló que respecto a la precipitación la estacionalidad del San Juan y del Mendoza muestran correlaciones débiles pero significativas, mientras el Atuel, el Colorado y el Neuquén no muestran su estacionalidad ligada significativamente. Al contrario el Limay muestra una correlación inversa débil pero significativa. Por otro lado se infiere que la estacionalidad es más sensible a la temperatura que a la precipitación, aunque con diferentes grados de asociación en cada caso.

## Introducción

La adecuada comprensión de la estacionalidad de un río a lo largo del año, esto es en una escala temporal estacional, es fundamental para el diseño y el manejo de una presa. Los períodos largos de anomalías climáticas pueden introducir modificaciones en la estacionalidad del escurrimiento y por lo tanto la necesidad de readecuar pautas de gestión en el manejo de embalses y planes de regadío. Tales modificaciones en la estacionalidad, que no pueden suponerse estables en el tiempo, reflejan generalmente leves aumentos o decrecimientos numéricos en las variables hidrológicas clásicas. De esta manera las épocas de predominio de la restitución o del almacenamiento pueden acortarse o extenderse según las funciones de cada presa o plan de regadío en particular. En esta oportunidad haremos un breve análisis de la forma en que la estacionalidad de los ríos andinos tienen que ver con el monto anual de precipitación y con las temperaturas medias estacionales. Esta presentación pretende situarse en la misma temática desarrollada por Bruniard en dos excelentes trabajos relacionados con los regímenes fluviales de alimentación sólida (Bruniard, 1992,1994), cuya terminología y principios generales nos han servido de orientación.

El desarrollo de las nacientes –cuenca activa- de estos ríos en un ambiente montañoso significa que en mayor o menor medida la nieve es uno de los elementos configuradores de la estacionalidad. En consecuencia no sólo la precipitación, sino también la temperatura incide en la generación del escurrimiento a lo largo de un año. Por el lado de los acumulados anuales de precipitación la estacionalidad puede verse afectada por el desarrollo de un manto nival de espesor mayor a la media. Aquí comenzamos a dilucidar en qué medida tal situación retrasa la culminación de las altas aguas primaverales o estivales de los ríos andinos. O dicho de otra manera se apunta a identificar en que proporción un espesor excepcional asegura una mayor persistencia del manto nival de cada año. Por el lado de la marcha anual de la temperatura la estacionalidad puede verse afectada de forma compleja y según se trate de un régimen nival puro o mixto. Lascano y Villalba (2005) observaron para el río Neuquen, de régimen nivo-pluvial, que las mayores temperaturas medias registradas entre mediados de los '70 y fines de los '90 generaron una mayor contribución de las altas aguas invernales al derrame. El pulso de fines de primavera respondió, aún conservando su primacía, con un adelanto y reducción de su contribución. En cambio los ríos nivales y glaciarios de curva simple, tales como el San Juan, el Mendoza y el Atuel, reaccionaron a mayores temperaturas sólo con un adelantamiento de las altas aguas estivales. Es decir, la variación de año a año de la temperatura con precipitaciones en torno a la media, o las fluctuaciones de la precipitación con temperaturas normales, pueden ser dos escenarios que ayuden a

profundizar la comprensión de los regímenes fluviales de alimentación sólida en la República Argentina. En la realidad ambos factores varían conjuntamente, con igual o distinto signo. Este trabajo presenta un primer análisis de los comportamientos estacionales apuntando a identificar el mayor o menor peso de cada uno en algunas cuencas andinas. Para los ríos cuyas nacientes se desarrollan en las Rocallosas, en el norte del continente americano, la temperatura resultó ser el factor de control casi exclusivo, sólo matizado por la variabilidad y tendencia en la precipitación (ver Stewart *et al*, 2005)

## Datos

Se utilizaron los derrames, por un lado, como indicador del volumen anual de precipitación en la cuenca. Mapeando la pluviometría andina y las láminas de agua escurridas con datos anuales Bruniard ha demostrado que a gran escala “*independientemente de la mayor o menor evapotranspiración y de los diversos coeficientes de escurrimiento de cada una de las cuencas, según sean sus condiciones locales, [las estaciones de aforo] funcionan como enormes pluviómetros naturales...*” (1994, pág. 37). Si bien últimamente la disponibilidad de puestos termopluviométricos en zonas de montaña ha mejorado notablemente, aún faltan datos en zonas por sobre los 3000-3500 metros. Considerando que una buena parte de la superficie de algunas cuencas andinas está sobre esos niveles (ver cuadro 2 más adelante), el derrame es un indicador del monto anual de precipitación preferible a las estaciones de montaña disponibles. En esta ocasión no tomamos una media hidroclimática, sino la serie de valores anuales de derrame. Tomando en cuenta que en los Andes centrales se desarrollan numerosos glaciares se realiza una primera aproximación a su efecto compensador sobre la variabilidad de las precipitaciones. Una segunda cuestión en torno al derrame como proxy tiene que ver con las anomalías en la estacionalidad de la precipitación, que podrían sesgar la marcha anual del caudal y generar confusiones en la interpretación de la incidencia nival. En esta primera aproximación analizaremos también en forma preliminar este “tercer” factor. El análisis de estos dos factores que limitan la validez del monto anual de precipitaciones permite destacar la importancia de factores hidroclimáticos que aún no han sido objeto de análisis particular. La segunda variable utilizada es el Índice de Estacionalidad (IE), calculado a partir de los caudales medios mensuales de los ríos San Juan, Mendoza, Atuel, y Limay, como parámetro de la estacionalidad del escurrimiento. Se trata de un indicador estadístico clásico, aplicado al análisis de la estacionalidad de los ríos nivales en el oeste de los EE.UU (ver Stewart *et al*, 2005), cuya fórmula es :

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

donde  $t_i$  es el tiempo en meses desde el comienzo del ciclo hidrológico, y  $q_i$  es el caudal medio mensual correspondiente al mes  $i$ . O lo que es lo mismo:

$$(\text{Caudal mes } 1 \cdot 1 + \text{caudal mes } 2 \cdot 2 + \dots + \text{caudal mes } 12 \cdot 12) / \text{caudal mes } 1 + \dots + \text{caudal mes } 12$$

El IE pondera el peso del escurrimiento en cada mes e indica en forma aproximada hacia que momento del año hidrológico se sitúa el mayor dinamismo del caudal. Para los ríos andinos la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación toma en cuenta 4 tipos de año hidrológico. Las cuencas analizadas tienen que ver con 2 tipos: el que comienza en julio y termina en junio del año siguiente (San Juan, Mendoza y Atuel), y el que empieza en abril finalizando en marzo (Limay). Por lo tanto un IE de valor 1 equivale en forma teórica al 1º de julio en el primer caso, y al 1º de abril en el segundo. El valor 2 correspondería al comienzo de agosto y al de mayo respectivamente. En esta ocasión introducimos un énfasis en la necesidad de distinguir el significado de este indicador para ríos de curva simple, o alimentación simple, de aquél para ríos de curva compleja o alimentación mixta. El valor del IE es más representativo para los regímenes de curva simple, indicando de forma aproximada la culminación de las altas aguas. En cambio para los casos de regímenes con dos épocas de altas aguas el IE indica durante

cual de las dos hubo mayor escurrimiento. Esto es, un valor menor corresponderá a un año durante el cual el escurrimiento invernal alcanzó volúmenes por sobre la media, y al contrario, un valor mayor de IE tendrá que ver con mayores volúmenes durante la primavera.

Los datos, el análisis y las conclusiones que veremos aquí tienen validez para las superficies aguas arriba de cada aforo, ya que la estacionalidad del escurrimiento es un proceso areal cuya manifestación visible es un rasgo lineal, es decir, un río. Este carácter se ve reforzado en el caso de la vertiente oriental de los Andes, ya que la aridez que se configura a pocos kilómetros de la línea principal de altas cumbres convierte los datos de caudal en índices sintéticos de la climatología andina. Por tal motivo, creemos que este trabajo también contribuye al conocimiento de la climatología de montaña de la Argentina, allí donde se desarrolla la parte más activa del dominio nival ordinario (ver Snaider, 1998). En los diferentes gráficos expuestos a continuación veremos el valor del Índice de estacionalidad obtenido para cada uno de los derrames registrados en las series de cada río. Se podrá reconocer que el volumen del derrame no se asocia unívocamente a un valor del IE. O dicho de otra forma, que para un valor de derrame puede haber un rango de valores de IE. Tal rango refleja entonces las variaciones del otro condicionante del escurrimiento : la temperatura. En cada caso se comentarán la amplitud del rango del IE tanto en el sentido del eje horizontal, es decir en relación con la temperatura, como en sentido vertical, es decir en relación al derrame. Para una mejor comprensión de los resultados recomendamos leer previamente el estudio de Bruniard (1994) sobre los regímenes fluviales de alimentación sólida, así como tener a mano mapas físicos a escala provincial (son recomendables los del Atlas Total) y las curvas estacionales de los ríos analizados (disponibles en [http://www.obraspublicas.gov.ar/hidricos/estaciones\\_aforo.htm](http://www.obraspublicas.gov.ar/hidricos/estaciones_aforo.htm))

### Los ríos de la cordillera Central

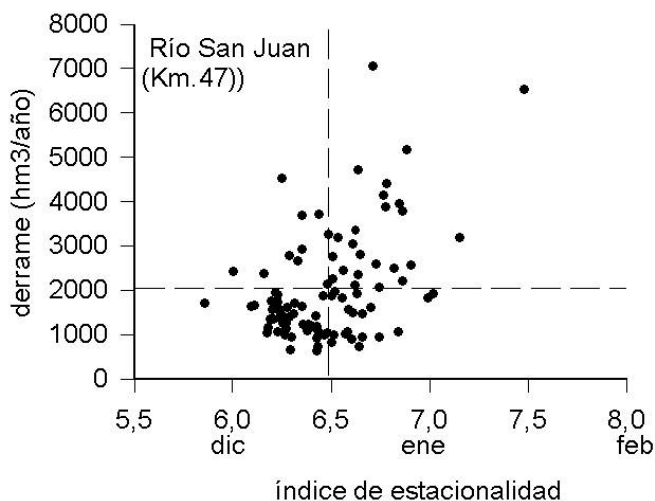


Gráfico 1 : Relación entre el derrame y el IE para la cuenca del río San Juan, serie 1909-2003.

En el gráfico 1 se muestra la relación entre el IE y el derrame en el caso de la cuenca del San Juan. Cada punto se ubica en abcisas según el valor correspondiente de IE y derrame para ese año. El San Juan es un río nival puro, de marcha anual simple, por lo que el IE indica aproximadamente el momento de culminación de las altas aguas. Puede reconocerse que en general los valores del IE para los mayores derrames se desplazan hacia la derecha del gráfico. Por tanto existe cierto nivel de probabilidad de que altas aguas estivales del San Juan no se adelanten, e incluso de que verifiquen cierta ocurrencia tardía, si las precipitaciones invernales en la Cordillera son abundantes. Nótese como los valores de IE son mayores por sobre los 2000 hm<sup>3</sup>, y luego nuevamente por sobre los 3000 hm<sup>3</sup>. La correlación entre

ambas variables en el caso de esta cuenca es de  $r = 0.46$ , con un nivel de significatividad del 99%. En una segunda instancia de análisis puede reconocerse, como fuera mencionado, que para cada valor de derrame se puede registrar un rango de valores de IE, cuya amplitud en este caso es de aproximadamente un mes. El factor al que está vinculado este rasgo es la temperatura y su incidencia de año a año. Este capítulo merece consideraciones particulares en el caso del San Juan y el clima en su cuenca activa. El mapa pluviométrico cordillerano muestra un decrecimiento paulatino de los montos de sur a norte, que se intensifica desde los 32° (ver Hoffmann, 1975; Minetti *et al.*, 1986). Tal aumento del gradiente refleja el carácter marginal del régimen climático, correspondiente a la zona de mayor variabilidad en las expansiones del frente polar. Hacia los 39-40° S Compagnucci y Vargas (1998) identifican una zona de gradiente en la variabilidad interanual de las precipitaciones invernales similar en cuanto a la intensificación de la tasa de variación norte –sur. La importancia de este aspecto se comprende más acabadamente en el análisis del Mendoza.

### Río Mendoza

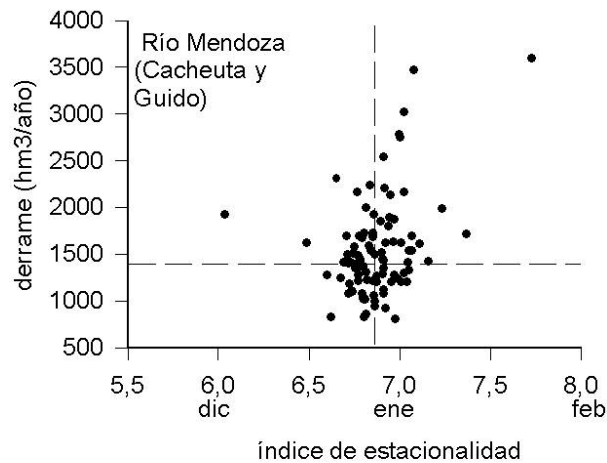


Gráfico 2 : relación entre el derrame y el IE para la cuenca del río Mendoza, serie 09-00.

La correlación entre el derrame y el IE para el caso del Mendoza es menor, ( $r = 0.35$ ) significativa al 99%. A comparación del gráfico anterior puede verse que la pendiente de la nube de puntos es mayor y muy próxima a ser vertical, aunque aún muy visible. Esto puede deberse en primer lugar a la menor variabilidad de las precipitaciones en el segmento cordillerano correspondiente, ubicado más al sur que el caso anterior. En segundo término, la mayor altura media de la cuenca (ver cuadro 2) permite un mayor desarrollo de glaciares, y por lo tanto cabe suponer un mayor efecto amortiguador sobre la variabilidad del monto anual de precipitaciones. Otro aspecto destacable es la menor amplitud del rango de valores del IE para cada nivel de derrame. En este caso se aproxima a 0.5, es decir, medio mes. Es decir que el Mendoza no sólo tiene un derrame menos fluctuante, sino también una estacionalidad más regular. Esto es, el volumen de agua disponible de año a año es menos variable y tiende a distribuirse de forma más parecida a lo largo de cada año hidrológico. Ahora bien, muchas veces se han hecho referencias al rol hidrológico interanual de los glaciares presentes en esta cuenca (Argentina CFI, 1961; Menegazzo *et al.*, 1985; Bruniard, 1992). Luego del análisis del caso siguiente intentaremos profundizar este tema como parámetro para distinguir la mayor o menor incidencia de la precipitación o de la temperatura en la conformación de la estacionalidad.

### Río Atuel

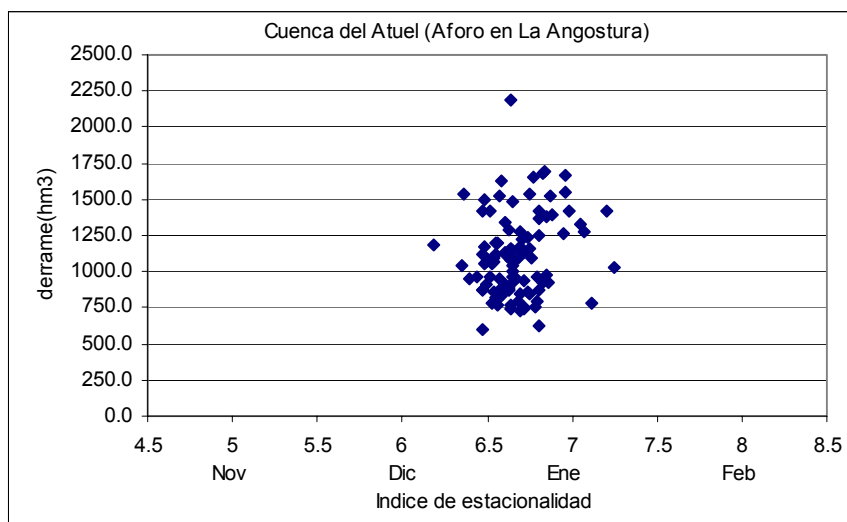


Gráfico 3 : Relación entre el derrame y el IE para la cuenca del río Atuel, serie 1906-03.

En el caso del Atuel no existe una correlación entre el derrame y el IE ( $r= 0.18$ , sin significatividad estadística), resultado particularmente confiable tratándose de una serie hidrológica de 98 años. Esta cuenca se ubica a los  $35^{\circ}$  S, es decir, ya fuera de la franja-límite norte del régimen pluvial mediterráneo del piso superior cordillerano (ver Hoffmann:1975). Es decir, dentro de un ámbito que en cuanto a el monto anual de precipitación probablemente es mucho menos variable que los correspondientes a las cuencas del Mendoza y del San Juan. Este aspecto es clave para aclarar la mayor incidencia que tendría la temperatura en la definición de la estacionalidad del Atuel, por lo que ampliaremos su análisis. Como señaláramos en la introducción la precipitación en los Andes por sobre los 3000-3500 aún no ha sido medida más que en puntos aislados. Por lo tanto al igual que para el caso del monto anual de precipitación, el derrame y en este caso su variabilidad es también un indicador general del comportamiento de la precipitación. Cabe aclarar aquí que la presencia de glaciares limita la validez del derrame como indicador, motivo por el cual debe considerarse la presencia de glaciares en ambas cuencas, que constituyen dos casos bien diferenciados. La del Atuel, a diferencia de las cuencas al norte, no desarrolla desde las nacientes un patrón de “embudo” que concentra los superávits hídricos cordilleranos. Más bien sus cabeceras se proyectan hacia un tramo del frente cordillerano de poca longitud. En razón de esta diferencia puede inferirse que el eventual desarrollo de glaciares cuenta con una menor superficie apta, esto es, un porcentaje lo suficientemente importante de la cuenca activa por sobre el nivel de el umbral climático correspondiente. Los otros cuatro ríos que figuran en el cuadro 2 desarrollan sus nacientes en una mayor amplitud sobre la cresta principal de los Andes. Aún así el Atuel muestra menor variabilidad, que en razón del presumible menor desarrollo de cuerpos glaciarios puede vincularse más directamente a la variabilidad de la precipitación que en el caso del Mendoza. Es decir, en una cuenca en la que probablemente el efecto amortiguador glaciario es menor la variabilidad no sólo no aumenta, sino que disminuye. Por lo tanto puede concluirse que la variabilidad del derrame del Atuel tendría mayor dependencia directa de la precipitación de cada año, y que el efecto regulador interanual de los glaciares sería secundario. A continuación se analiza someramente la presencia de glaciares en estas dos cuencas y su relación con este planteo.

### Breve evaluación de la regulación glaciaria de las fluctuaciones del derrame

A los fines de discriminar mejor el rol de la variabilidad interanual de la precipitación en las cuencas estudiadas indagamos de forma preliminar el nivel de significatividad hidrológica de la presencia de cuerpos de hielo en zonas altas de los Andes. La capacidad reguladora interanual que los glaciares de

una cuenca ejerce depende del volumen de agua que almacenan, o mejor dicho, de la capacidad de la cuenca para almacenar agua allí donde las condiciones del clima lo permiten en años de nevadas abundantes o de bajas temperaturas. La nieve, que difiere una parte del escurrimiento desde una época del año a otra. Por su parte en el caso del hielo además de jugar un rol en la estacionalidad lo hace en un plazo de tiempo que supera el año hidrológico durante el cual una parte de la precipitación comienza a incorporarse a un glaciar. Para las cuencas del Atuel y del Mendoza se conoce la superficie ocupada por glaciares, ya sea descubiertos, de escombros y las diferentes variantes intermedias. En el cuadro 1 se presentan las superficies glaciarias para ambas cuencas y su relación con otros parámetros. Las superficies de cuenca corresponden al área cuyos glaciares se inventariaron, por lo demás muy ajustadas a las respectivas cuencas activas. Para los módulos se eligió el período 56-02 para contar con los datos actualizados del Mendoza. Conforme a la menor amplitud latitudinal de sus nacientes, el Atuel cuenta con menor superficie cubierta de glaciares. Pero debe tenerse en cuenta que mientras la capacidad reguladora glaciaria en alguna medida está sujeta a la superficie de la cuenca, el caudal no lo está. El caudal específico del Atuel es 2.5 veces el del Mendoza. Por lo tanto un simple cociente entre la superficie de glaciares y el módulo es más ilustrativo de la significatividad de la componente glaciaria en el cuadro genético de cada una de estas cuencas. Las dos cifras obtenidas (ver cuadro 1) indican que en el caso del Atuel ocurren mayores superávits hídricos por unidad de superficie glaciaria. Por lo tanto, la capacidad de regulación interanual de génesis glaciaria en el Atuel es mucho menor que en el caso del Mendoza, cuenca en la que por cada volumen de superávit hídrico la regulación glaciaria es casi el triple. Téngase en cuenta que estas cifras y las conclusiones que sacamos deben interpretarse a partir de la sucesión de ciclos húmedos y secos de varios años en los que se manifiesta la retención y la fusión interanual. Para obtener un resultado un poco más preciso en la fila 8 del cuadro 1 ajustamos la superficie glaciaria, asignando al hielo cubierto (morenas glaciarias, termokarst, glaciares de escombros, etc.) el 50% del rol hidrológico que se puede suponer para 1km<sup>2</sup> de glaciar descubierto. En la fila 9 se divide el módulo por la superficie obtenida, y al igual que en la 6 la diferencia entre una cuenca y otra es muy significativa. Ambos resultados parten de datos indirectos, por lo que las conclusiones que puedan sugerir deben ser tomadas con carácter provisorio. En definitiva nuestro objetivo es optimizar la información disponible para avanzar sobre una cuestión aún no resuelta.

Cuadro 1 : Superficie ocupada por cuerpos glaciarios y su relación con otros parámetros

	<b>Cuenca</b>	<b>Mendoza</b>	<b>Atuel</b>
1	Superficie de la cuenca activa (km <sup>2</sup> )	6311	2965
2	Superficie de glaciares (total, en km <sup>2</sup> )	647	186
3	Glaciares descubiertos (km <sup>2</sup> )	304.09	148.8
4	Glaciares cubiertos	342.91	37.2
5	Sup total gl/sup cuenca activa (2/1)	10.25%	6.27%
6	Módulo 56-57/ 02-03	45.1	35.6
7	Sup gl/módulo (2/7)	14.346	5.225
8	Sup. de glaciares ajustada (total, en km <sup>2</sup> )	475.5	167.4
9	Sup gl ajustada / módulo (8/6)	10.544	4.702

Elaboración a partir de datos consignados por Espizúa (1981)

Pasamos así a analizar brevemente la variabilidad de los derrames cordilleranos de sur a norte, como indicador de la variabilidad interanual de la precipitación. En el cuadro 2 se presenta el porcentaje del derrame medio que representa la desviación estándar para algunos ríos cordilleranos, siguiendo el orden norte-sur. Probablemente el gradiente más representativo de la variabilidad de la precipitación, que se reduce de norte a sur, pueda construirse tomando los valores de derrame referidos a los ríos Blanco y Atuel. Las cifras del Mendoza y del Tunuyán por lo tanto pueden considerarse resultados hidrológicos apartados del ritmo pluvial a partir de una mayor presencia de la regulación interanual de génesis glaciaria.

Cuadro 2: Variabilidad del derrame de cuencas andinas entre los paralelos 31° y 35°

Cuenca	Blanco	De los Patos	Mendoza	Tunuyán	Atuel
Rango latitudinal	31°-32°	32°-32°30'	32°30'-33°20'	33°20'-34°	34°30'-35°
Derrame (hm3)	743,4	598,1	1423,6	891,2	1087,6
Desv.est del derrame	531,6	291,8	418,4	269,0	293,2
DE/derrame	70,9 %	47,3 %	29,3 %	30,4 %	27,5 %
IE promedio	6,34	6,49	6,85	6,75	6,62
IE desv.est	4,0%	3,5%	2,8%	2,6%	2,8%
altura media		3700	4200	3700	3300
% sobre 3750		50,0%	71,8%	50,5%	28,1%

-Río blanco en El Horcajo, De los Patos en Alvarez Condarco

Este planteo preliminar se muestra coherente con las correlaciones entre el derrame (como índice del monto anual de la precipitación en alta montaña) y la estacionalidad. La cuenca activa del San Juan tiene una altura media menor y menores precipitaciones que la del Mendoza. Por lo tanto el desarrollo de glaciares es de menor importancia. De allí que el IE sea más sensible a la alta variabilidad de la precipitación, determinada por la posición de la cuenca en la proyección de los frentes fríos provenientes del pacífico. Esta amplia fluctuación de año en año permite que el monto anual de precipitaciones alcance una alta visibilidad como factor de control de la estacionalidad, expresada en la correlación más alta entre las cuencas analizadas (0.46). En el caso de la cuenca activa del Mendoza todos los factores varían de forma que se reduce la respuesta del IE al monto anual de precipitación : los volúmenes de aportes atmosféricos aumentan y la altura media es mayor, lo cual implica una mayor proporción de la cuenca con condiciones para el desarrollo de cuerpos de hielo. De esta forma podemos aproximarnos a explicar la abrupta caída de la variabilidad del derrame de una cuenca a otra : a la reducción de la variabilidad de la precipitación que se produce hacia el sur se suma el efecto suavizador de la suma del conjunto de cuerpos de hielo presentes en la cuenca activa del Mendoza. La cuenca activa del Atuel, con una morfometría más desarrollada de oeste a este que de norte a sur presenta aún menor variabilidad, al tiempo que su correlación es menor y ya no es significativa. Es el caso exactamente opuesto al San Juan : la mayor estabilidad interanual de la precipitación deja mayor capacidad de control de la estacionalidad a la temperatura. Por lo tanto en este río la distribución del derrame a lo largo del año hidrológico queda determinada principalmente por el balance energético local. Mientras en el San Juan la precipitación varía en un rango lo suficientemente amplio como para constituirse en factor de control.

Esta importancia de la precipitación en la conformación de la estacionalidad del San Juan no parece haberse hallado en el norte del continente, donde Stewart *et al.* (2005) encontraron un fuerte predominio de la temperatura cm factor de control. Esto puede deberse a varias causas : en primer lugar en ningún caso los regímenes pluviométricos en el oeste de los EE.UU. son tan marcadamente invernales como en los Andes entre los 31 y 35°S (ver Serreze *et al.*, 1999). Por otro lado la mayor intensidad de los oestes del hemisferio sur también se traduce en fuertes anomalías de precipitación cuando se desplazan en forma excepcional al norte de su posición invernal media. Cabe destacar que entre los 30° y 35° tiene lugar un régimen de precipitación homogéneo, en cuanto a concentración invernal, es decir, en cuanto al control estacional del anticiclón del pacífico sur (ver Minetti *et al.*, 1982) que inhibe la ocurrencia frecuente de episodios de lluvia fuera del período mayo-agosto. Y también, aunque en menor medida en cuanto a variabilidad interanual (incluyendo un mismo tipo de comportamiento en años niño, ver Compagnucci y Vargas 1998), sobre todo en comparación con lo que sucede al sur de 35°S que parece mostrar un comportamiento independiente. Por otro lado las diferentes condiciones geográficas sobre las

cuales se despliega este régimen de precipitación quiebran la homogeneidad pluvial, generando distintos regímenes fluviales, y por lo tanto generando diferentes estrategias de adaptación por parte del hombre.

## Río Limay

El Limay es un río de alimentación mixta. En su cuenca activa una proporción importante de la precipitación escurre inmediatamente o a los pocos días, mientras otra cuota se acumula en forma de nieve y permanece almacenada hasta la primavera y principios del verano. Por otra parte el desarrollo de glaciares es muy escaso y no tiene significado hidrológico. Las nacientes del Limay se desarrollan entre los 39° y 41° 30'S. Este tramo de los Andes ha sido siempre merecedor de un análisis particular por dos razones : por ser el de menor altitud media y por las disecciones de la cadena principal originadas en los glaciares del pleistoceno. Hacia el norte sólo se encuentran algunas hoyas lacustres glaciarias pequeñas, mientras al sur tienen un tamaño sólo un tanto menor. Pero en ambos casos la cordillera principal no pierde continuidad, como sucede a la largo de la cuenca del Limay a partir de las “abras” o pasos abiertos por el hielo hace 20.000 años. Bruniard (1981) destacó el efecto climático de este rasgo morfológico de los Andes al estudiar la trayectoria de las bajas presiones en invierno, generando una proyección mayor hacia el este de la franja de lluvias activadas por el ascenso orográfico. De esta forma la cuenca activa del Limay no sólo es más baja ( por ejemplo la cuenca superior alcanza una altitud media de sólo 1190 metros), sino además más amplia (ver el mapa pluviométrico del Limay elaborado por Barros *et al*). Dentro de este sector una serie de cordones y contrafuertes de la cordillera desarrollan mayores alturas. Sobre ellos se asienta el manto nival de desfase con un patrón no continuo, como muestran indefectiblemente las imágenes satelitales tomadas durante septiembre, octubre y noviembre de cada año (esto puede verse muy bien en la primera imagen del SAC-C, disponible en el sitio de la CONAE ). Sólo la continuidad de la nieve acumulada sobre la sierra de Catán Lil se asimila al patrón de la nieve en los Andes centrales. Desde el punto de vista hidrológico la menor proporción del área de la cuenca activa a cotas que permitan el desfase nival del escurrimiento implica el protagonismo de los aportes pluviales. Una vez comprendido el dispositivo geográfico se enriquece la interpretación de la relación entre los valores del IE y los del derrame del Limay. El gráfico 4 muestra la nube de puntos IE/derrame, para la cual se contó con 101 años hidrológicos.

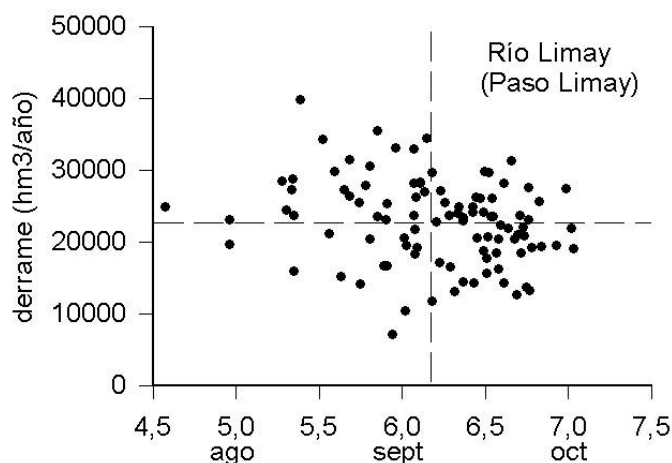


Gráfico 4 : Relación entre el derrame y el IE para la cuenca del río Limay, serie 1903-03.

La serie de aforos de la estación “Paso Limay”, interrumpida en abril de 1990, se continúa con la suma de las entrantes a Alicurá y a Piedra del Águila, aforadas en los afluentes correspondientes. Se evaluó la diferencia entre la suma de afluentes y el valor de Paso Limay y no se hallaron apartamientos significativos. Por otro lado los el cálculo del IE obtiene un resultado independiente del valor de

derrame, al igual que los coeficientes mensuales de Pardé. De entre los ríos andinos aforados el Limay es el único que presentó una correlación inversa entre el derrame y el IE ( $r = -0.24$ , significatividad 99%): es decir que cuando las precipitaciones anuales superan la media es probable que el escurrimiento tienda a ser más activo hacia el invierno (de Junio a Agosto). Esta particular respuesta de la estacionalidad es ante todo consecuencia de la baja altura media de la cuenca, lo cual implica una presencia limitada de ámbitos con condiciones para el almacenamiento inter-estacional de nieve. Es decir que en los años de precipitaciones extraordinarias es frecuente que la mayor parte del desvío pluviométrico se manifieste hidrológicamente como componente pluvial. De esta forma tiende a aumentar la contribución al derrame de los meses de mayores precipitaciones, esto son los invernales, y por lo tanto el valor del IE será menor. Por otro lado la amplitud del rango de valores del IE a igual volumen de derrame alcanza el mes y medio (1,5) siendo la más alta entre los casos analizados aquí. En primera instancia la temperatura parece ser el factor con mayor capacidad para controlar esta parte de la estacionalidad que no tienen que ver con los diferentes valores de derrame. Sin duda durante un año frío es esperable que las altas aguas de primavera ocurran hacia finales de la primavera. Pero en estas latitudes una buena parte del caudal primaveral parece tener una vinculación importante con el “tercer” factor que señaláramos en la introducción.

Cuadro 3 : precipitación mensual media y su variabilidad para estaciones seleccionadas

40°04'	Collun-co												875
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
MEDIA	17.1	19.5	27.4	53.4	157.3	158.9	158.1	121.1	69.8	55.8	26.7	32.0	894.2
DE	20.5	21.0	27.0	45.9	101.1	79.9	85.6	65.6	51.0	59.5	27.8	36.4	221.8
C.V.[%]	120%	108%	99%	86%	64%	50%	54%	54%	73%	107%	104%	114%	24.8%
40°09'	Estancia Quechuquina												640
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
MEDIA	60.5	48.0	67.3	143.6	328.7	336.1	347.8	294.0	172.2	142.2	99.0	96.7	2136.1
Desvío	49.6	41.0	36.9	103.5	162.0	127.5	158.4	126.2	86.4	87.8	68.3	96.0	388.1
C.V.[%]	82%	85%	55%	72%	49%	38%	46%	43%	50%	62%	69%	99%	18.2%
33°26'	Santiago (Quinta Normal)												520
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
MEDIA	0.4	1.1	3.7	15.4	43.9	76.4	79.4	48.2	26.9	13.2	7.1	2.4	318.1
Desvío	1.5	4.0	6.5	20.5	43.3	76.0	73.1	44.5	29.4	16.1	14.7	5.7	154.9
C.V.[%]	395%	357%	178%	134%	99%	100%	92%	92%	109%	122%	207%	236%	49%

DE= desvío estándar. Fuente : datos de Hidronor-AIC y de la DM de Chile.

Entre los 31° y 35° la precipitación de cada año en los Andes ocurre entre Mayo y Agosto, y en pocos casos se dan acumulados hidrológicamente extraordinarios fuera de estos 4 meses. Es decir que la estacionalidad de la precipitación es muy regular de año a año, o lo que es lo mismo, son poco frecuentes las anomalías en la estacionalidad de la precipitación. En este tramo de la cordillera el desplazamiento del Anticiclón del Pacífico Sur inhibe la proyección de sistemas frontales fuera de los meses invernales referidos. Pero este control deja de ser eficaz hacia el sur del paralelo 35°. Y particularmente al sur de los 39° las series de precipitación mensual muestran que no son poco frecuentes los acumulados extraordinarios en septiembre, octubre y noviembre. En el cuadro 3 se ilustra esta característica a partir de los montos mensuales de precipitación y su variabilidad de en tres puntos del ámbito cordillerano: Santiago de Chile como indicativa del régimen estacional que se extiende entre los 31° y 35°. Luego se consignan los datos de dos estaciones de la cuenca activa del Limay, Estancia Collun-co, representativa del tramo de transición del gradiente pluvial oeste-este. Y por último los correspondientes a la Estancia Quechuquina, más cercana al encadenamiento principal de los Andes. Las cifras corresponden a series homogéneas. El dato central es la diferencia entre el coeficiente de variabilidad (CV) de los meses invernales y el de octubre y noviembre. En todos los casos se da un incremento del valor del CV, pero es mucho más importante en la cuenca activa del Limay. Por otro lado los acumulados medios primaverales en Santiago desde el punto de vista hidrológico no tienen

significado. No ocurre lo mismo en las nacientes del Limay donde no sólo los montos medios son mayores, sino que las temperaturas medias son más bajas. En cuanto al balance hidrológico, entonces, las cifras medias y las anomalías positivas de las estaciones ubicadas en Neuquen sí implican una alimentación del escurrimiento.

En vista de estas cifras podemos considerar que las altas aguas primaverales del Limay deben comprenderse como un promedio complejo, en el que intervienen la nieve y la precipitación. Por lo tanto, la componente nival en la configuración del régimen del Limay es mucho menos importante de lo que parece a primera vista. De allí que el monto anual de precipitación pueda alcanzar alguna visibilidad como factor configurador de la estacionalidad de un río de alimentación mixta. Un modelo sencillo del IE que parte de la temperatura media entre junio y diciembre y del monto anual de precipitación explica el 40% de la variabilidad del Limay. Los años en los el IE modelado difirió significativamente del IE real fueron aquellos en los que la estacionalidad de la precipitación fue completamente diferente a la marcha anual media. Por ejemplo durante los años '49 y '81 cuando la mayor parte de las precipitaciones se produjeron durante el primer semestre del año calendario, con acumulados extraordinarios durante mayo.

### **El manejo de los recursos hídricos**

En este apartado haremos algunos comentarios sobre las infraestructuras hídrica y su relación con los caracteres de los ríos vistos. En primer lugar la alta variabilidad interanual del San Juan marca la importancia de contar con una capacidad de almacenamiento en embalses equivalente o próxima al derrame ( $2059\text{hm}^3$ ). Un avance muy importante en relación a este tema es la próxima finalización de una presa en la cuenca que reemplace a la de Ullum, ya en estado avanzado de colmatación. De este río depende el aprovisionamiento de agua para 530.000 personas (INDEC) y una importante producción rural. En cuanto al Mendoza si bien su variabilidad es menor, también lo es su módulo (76% del San Juan), y por otro parte se relaciona con el doble de población (1 millón de personas, INDEC). Por lo que es igualmente importante reducir el riesgo de escasez de agua durante años secos. También respecto a este río debe tomarse en cuenta la persistencia de su estacionalidad. Los requerimientos de riego comienzan en septiembre, cuando aún no ha finalizado el receso invernal del río. Durante este mes y octubre la estacionalidad de la vegetación se activa mientras las altas aguas del Mendoza sólo comienzan a ocurrir a partir de noviembre. La poca capacidad del embalse Potrerillos, concebido en realidad por Agua y Energía Eléctrica como un compensador integrado en un plan de varias presas (Argentina, 1987), obviamente no es suficiente para compensar el derrame de años secos. Y asimismo, si bien reduce el problema, es insuficiente para lograr un adecuado aprovisionamiento a contraestación. Es imprescindible construir nuevos diques en esta cuenca. Asimismo podría aumentarse la eficacia en el uso agrícola del agua introduciendo nuevas técnicas que reemplacen el riego en manto, método que genera grandes pérdidas. Esto también vale para el río San Juan. En el caso del aprovechamiento del Mendoza también deberían reconstruirse algunos tramos del Canal Guaymallén donde el cemento está fracturado y descalzado, a lo que se agrega un crecimiento espontáneo de vegetación que aumenta las pérdidas por evaporación.

En cuanto al Atuel la baja variabilidad interanual del derrame y la regularidad estacional, además de la menor población asociada, indican una buena adecuación de la capacidad de manejo resultante de las presas del Nihuil y Valle Grande, la cual por lo demás debe considerarse junto a la instalada sobre el Diamante. Un punto interesante es el trasvase de caudales hacia el Atuel desde la cuenca del Colorado, proyecto ya acordado entre las provincias por las que pasa el río y el Estado Nacional. Este plan parte del carácter interprovincial del Atuel, ratificado por la corte suprema de justicia de la Nación. Si bien

algunos funcionarios públicos de la provincia de Mendoza consideraron que se trató de una batalla perdida, en definitiva el trasvase producirá un efecto muy positivo en la economía de todo el oeste del país. La expansión de los cultivos ligados al regadío y sus industrias conexas es hoy posible en torno a la ciudad de San Rafael, evitando un estancamiento agrícola de toda Mendoza. Estas posibilidades se ampliarán una vez concretado el trasvase, lo cual asegura un horizonte mínimo de planificación productivo hacia el futuro. En definitiva la ratificación del carácter interprovincial del Atuel ha redundado en un proyecto de infraestructura hídrica cuyo impacto territorial alcanza a todo el oeste del país. Por supuesto que este tema puede ser objeto de consideraciones más amplias.

## Conclusión

Los regímenes fluviales y sus componentes de alimentación constituyen una metodología práctica para comprender la disponibilidad de agua allí donde los ríos son la fuente principal de abastecimiento. En esta presentación nos hemos referido a algunos casos donde la intervención de la componente nival y glaciaria tienen algún grado de protagonismo. En cada caso se intentó aportar elementos para la comprensión del rol de la temperatura, por un lado, y de la precipitación, por otro, en la configuración de la estacionalidad del derrame. El derrame es un buen indicador de la pluviometría cordillerana, y el análisis de las restricciones de este uso permite comprender mejor algunos rasgos de los regímenes estacionales de escurrimiento. Por una cuestión de orden lógico en esta oportunidad presentamos el cuadro hidroclimático, para ampliar en otra ocasión las consideraciones operativas de la construcción y operación de infraestructuras de manejo de cuencas, que en este trabajo se presentan sólo de forma preliminar.

## Referencias

- Argentina. Consejo Federal de Inversiones. Evaluación de los recursos naturales de la Argentina (primera etapa). Tomo IV, parte I: Recursos Hídricos Superficiales. 1961.
- Argentina. Ministerio de Obras y Servicios Públicos. Agua y Energía Eléctrica. 40 años Agua y Energía Eléctrica. Buenos Aires. 1987.
- Argentina. Ministerio de Planificación Federal. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH). Caudales de los ríos analizados.
- Barros, Vicente y otros. Cartas pluviométricas del Limay. UnComa. Cinco Saltos. 1983.
- Bruniard, Enrique. El clima de las planicies del norte argentino. Dirección de Impresiones, Fac. de Humanidades. UNNE. Resistencia. 1981. Publicado en 1995.
- Bruniard, E. Hidrografía. Procesos y tipos de escurrimiento superficial. Ed. Ceyne. Buenos Aires. 1992.
- Bruniard, E. Los regímenes fluviales de alimentación sólida en la República Argentina. Academia Nacional de Geografía, publicación especial n° 7. Buenos Aires. 1994.
- Compagnucci, Rosa; Vargas, Walter. Interannual variability of the Cuyo rivers' streamflow in the Argentinean Andean mountains and ENSO events. International Journal of Climatology 18. Royal Meteorological Society. Londres. 1998.
- Espizúa, Lidia. Glacier and moraine inventory on the eastern slopes of Cordón del Plata and Cordón del Portillo, central Andes, Argentina. Inqua Symposia on the genesis and lithology of quaternary deposits. 1981.
- Hoffmann, José (Director). UNESCO. Atlas Climático de América del sur. Ed. OMM. Budapest. 1975.

- Lascano, M. Villalba, Ricardo. Impacto del calentamiento regional en los ríos de alimentación nival de la Argentina. XXXIII Congreso nacional del Agua. Mendoza, Mayo de 2005. Disponible en [www.infraestructura.co.nr](http://www.infraestructura.co.nr)
- 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. IPGH. Méjico. 1985.
- Minetti, Juan ; 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; Poblete, A ; Carletto, M ; Barbieri, P ; Sierra, E. El régimen de precipitaciones de San Juan y su entorno. CONICET. San Juan. 1986.
- Serreze, Mark; Clark, Martyn; Armstrong, Richard. Characteristics of the western United States snowpack from snowpack telemetry (SNOTEL) data. Water Resources Research, EE.UU., Julio de 1999.
- Snaider, Patricia. Las precipitaciones nivales en la República Argentina. Secretaría de Ciencia y Técnica-Universidad Nacional del Nordeste. Informe inédito. Resistencia. 2000. Resumen presentado en las IV Jornadas de Geografía Física. Universidad Católica de Santa Fe. Santa Fe. 1998.
- Stewart, I; Cayan, D; Dettinguer, M. Changes toward earlier streamflow timing across western united states. Journal of Climate, EE.UU., abril de 2005.