

## **Documento sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan en escenarios de Cambio Climático**

### **Los escenarios de Cambio Climático y el impacto en los caudales**

**Ing. José A. Boninsegna**

**Dr. Ricardo Villalba**

## **Índice**

<b>1. 0 – Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. 0 - Los Escenarios de Cambio Climático:</b>	<b>4</b>
2.1.- Proyección del Escenario A2 en la Región Cuyana	4
2.2.- Proyección de escenario intermedio	5
<b>3.0. Proyección de los escenarios al Régimen Hídrico</b>	<b>5</b>
3.1- Relación Precipitación de nieve /caudales	5
3.2- Los escenarios de variación de caudales	7
<b>4.- Relación temperatura / caudales y cambio climático</b>	<b>8</b>
<b>5.- Las Variaciones en la altura de la Isotherma de 0°C</b>	<b>13</b>
<b>6.- Discusión</b>	<b>19</b>
<b>7.- Conclusiones</b>	<b>22</b>
<b>8.- Bibliografía Consultada</b>	<b>25</b>

## **Segundo Informe**

En este informe se analiza el posible impacto del Cambio Climático en los recursos hídricos de la región de Cuyo teniendo en cuenta dos escenarios de variaciones de temperatura y precipitación en el siglo XXI.

### **1.- Introducción:**

El aumento de la concentración de los gases de tipo invernadero en la atmósfera está relacionado al Cambio Climático, que en diferentes formas, se manifiesta a nivel mundial. Hay actualmente consenso entre la comunidad científica y los gobiernos de la mayoría de los países en la necesidad de, por un lado, mitigar los efectos y, por otro, en realizar las previsiones de adaptación a las consecuencias esperadas de estos cambios.

La mitigación en general incluye planes de reducción de emisiones de dióxido de carbono utilizando nuevas tecnologías para la generación de energías no contaminantes y el secuestro del carbono emitido mediante distintos procedimientos como la reforestación, la fertilización del mar o la incorporación de CO<sub>2</sub> a presión en antiguos pozos petrolíferos.

Las acciones de adaptación para ser efectivas requieren etapas de implementación que comprenden el estudio de los escenarios probables de cambios a diferentes escalas temporales; la evaluación de las mayores vulnerabilidades de los sistemas físicos, biológicos y económicos en relación con dichos escenarios y la formulación de políticas de mediano y largo plazo que permitan minimizar los efectos adversos o potenciar las ventajas relativas. Quizás una de las zonas que aparecen como más vulnerables al Cambio Climático en nuestro país es la de los oasis del Oeste, en particular la región de Cuyo y el Norte de Patagonia.

Estas regiones son altamente dependientes del recurso agua. En las provincias de Mendoza y San Juan, el agua potable así como la utilizada para regadío y generación de energía eléctrica se origina a partir de la nieve y de los cuerpos de hielo que se encuentran en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes. En el primer Informe (Boninsegna J. y R. Villalba 2006), se analizaron el funcionamiento de las principales cuencas, las variaciones observadas en la temperatura y la precipitación, así como las tendencias del caudal de los ríos y sus correspondientes hidrogramas.

En este segundo informe se plantean dos escenarios de cambio a partir de los trabajos realizados por Nuñez y Solman (2006).

## 2. 0 Los Escenarios de Cambio Climático:

Los escenarios de emisiones considerados son los provistos por el Informe especial del IPCC sobre escenarios de emisión SRES A2 (IPCC SRES: IPCC Special Report on Emissions Scenarios, año?).

Utilizando estos escenarios y el modelo climático regional de alta resolución MM5/CIMA, el Dr. Mario Núñez calculó los cambios para la precipitación y temperatura de superficie en nuestro país (Núñez y Selman, 2006) para el periodo 2081/2090 tomando como base las décadas 1981 – 1990, 1991 – 2000 y el período 1961-1990. Sobre la base de esas proyecciones y mediante la técnica de “pattern scaling”, obtuvieron los escenarios climáticos para la década 2020/2030 para la Patagonia y la zona cordillerana Central.

Debe mencionarse que el escenario A2 es un escenario que considera una proyección del mundo como heterogéneo en donde continuara el aumento de la población mundial, el desarrollo económico estará fuertemente marcado por los sesgos regionales y los cambios tecnológicos serán fragmentados, con una evolución lenta. En este contexto se prevé una emisión de CO<sub>2</sub> cercana a 850ppm para el año 2100, con un aumento de temperatura con respecto a los valores de la década del 1990 de 3.8°C ±1°C.

Este escenario es un escenario moderadamente pesimista ya que debido a la concepción del desarrollo y de la economía mundial, no se prevén medidas efectivas de mitigación o de desarrollo tecnológico que atenúen la evolución de las emisiones y por lo tanto del aumento de la temperatura (IPCC, Síntesis Report 2001).

### 2.1.- Proyección del Escenario A2 en la Región Cuyana

Tomando como base el citado trabajo de Nuñez y Solman (2006), se establecieron valores de temperatura, precipitación y altura de la isoterma de 0°C proyectados para los años 2020-2030, para cada una de las cuencas de los principales ríos cordilleranos de la región cuyana. En la tabla I se observan dichos valores.

Cuenca	San Juan	Mendoza	Tunuyan	Diamante	Atuel
Temperatura	+1.50°C	+1.50°C	+1.25°C	+1.25°C	+1.25°C
Precipitación	-105mm	-105mm	-105mm	-100mm	-100mm
Isoterma 0°C	+150mts	+150mts	+130mts	+130mts	+130mts

Tabla I: Los valores de temperatura, precipitación y altura de la isoterma Cero están referidos al periodo base de 1961-1990 y representan valores medios anuales.

Debe tenerse en cuenta que estos valores son valores medios que se toman como referencia, y que los mismos tienen una dispersión anual y espacial. Así la elevación relativa de la isoterma de 0°C es diferente durante los meses de verano que durante los meses de invierno, lo cual afecta sin duda la estimación del hidrograma. Igualmente el aumento relativo de la temperatura (estrechamente ligado a la posición de la isoterma de 0°C) es diferente en el verano y en el invierno.

En el caso de la precipitación, la estimación resulta mas ajustada dado que en la región prácticamente se registran solamente precipitaciones invernales, siendo las que ocurren en el verano de menor importancia en la formación de los caudales.

## 2.2.- Proyección de escenario intermedio

Como ha sido señalado, el escenario A2 es un escenario moderadamente pesimista. Es por ello que se han realizado también cálculos para los volúmenes de caudales futuros con un escenario en el cual los parámetros de precipitación tienen un aumento relativo a los valores del periodo 1960-1990 igual a la mitad de los considerados en el escenario A2. Es altamente probable que las presiones internacionales tendientes a la reducción de las emisiones de gases tipo invernadero tengan algún efecto en el corto plazo y por lo tanto no se alcancen las concentraciones de 850 ppm de CO<sub>2</sub> en la atmósfera a fines del siglo XXI como lo establece el escenario A2 (Stone and Bohannon, 2006)

## 3.0. Proyección de los escenarios al Régimen Hídrico

La proyección de la influencia de los nuevos parámetros de temperatura, precipitación y altura de isoterma 0°C sobre los caudales no es una tarea sencilla. Como las variables que regulan la escorrentía superficial son numerosas y las relaciones entre si y con los caudales muy complejas, se requiere la formulación de modelos de funcionamiento para cada cuenca. En ausencia de estos modelos, las estimaciones realizadas en este informe deben tomarse como datos de tendencias y de órdenes de magnitud. Ellos deberán ser corregidos cuando se cuente con modelos ajustados y sobre todo con mayor cantidad de datos instrumentales.

### 3.1- Relación entre caída de nieve y caudales

La relación entre la nieve que cae en la cuenca y los caudales emergentes depende fuertemente de la escala temporal que se utilice, ya que existe un retardo entre el momento en que ocurre la caída de una partícula de nieve en la cuenca superior hasta el momento en que esa partícula, transformada en agua líquida, pasa por la estación de aforo, normalmente ubicada al pie de la montaña.

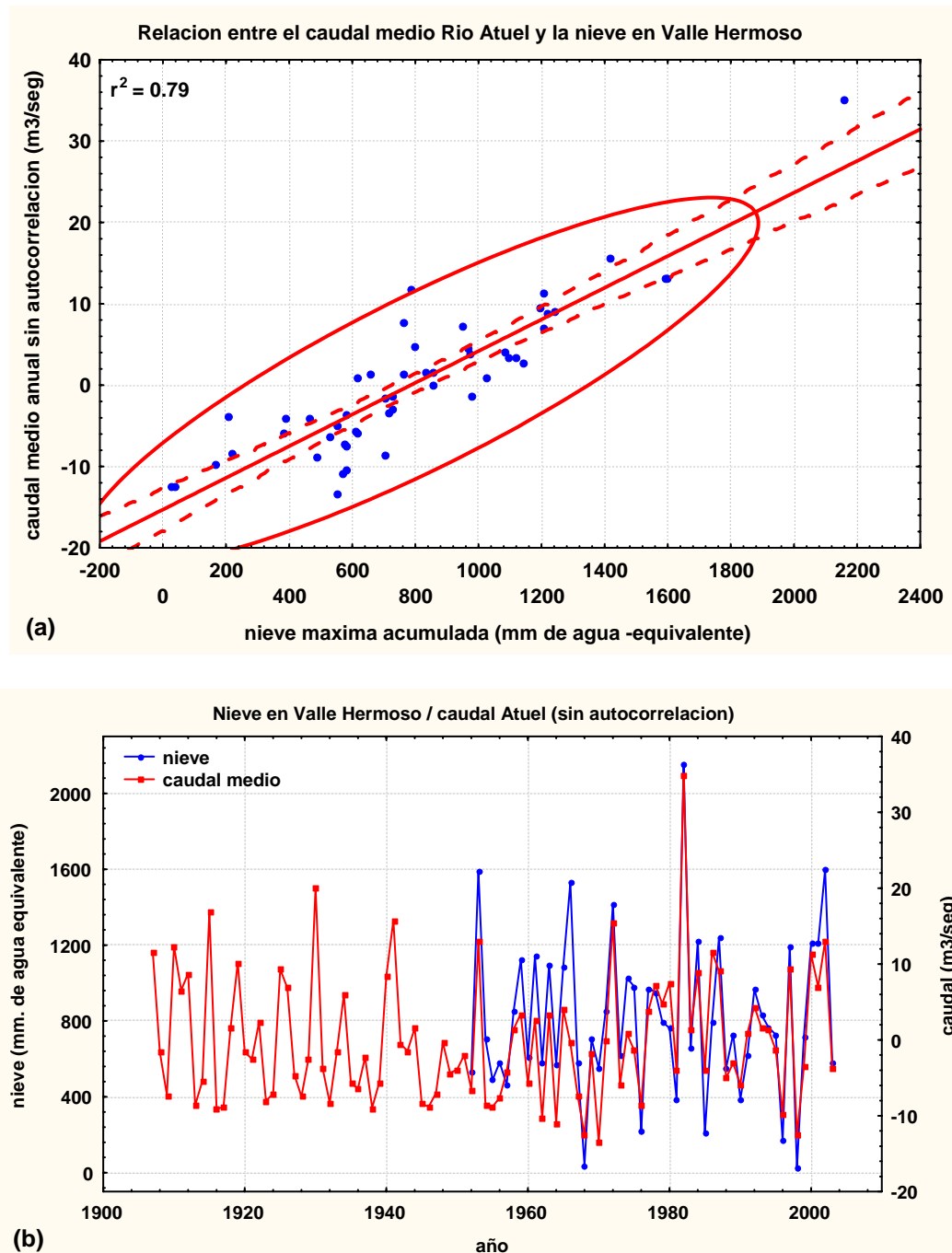
La serie de caudales medios anuales posee una autocorrelación importante. Esta medida se muestra en la tabla II

Cuenca	auto correlacion	Carrera de Nieve	r <sup>2</sup>	r	
San Juan	0.20	San Martin	0.65	0.82	**
Mendoza	0.46 *	Portillo	0.66	0.81	**
Tunuyan	0.19	Tosca	0.66	0.81	**
Diamante	0.33 *	Laguna Diamante	0.77	0.87	**
Atuel	0.36 *	Valle Hermoso	0.79	0.89	**

Tabla II: En la primera parte se expresa el coeficiente de autocorrelación de primer orden de las series de caudales anuales, en la segunda parte la correlación de las series de caudales sin autocorrelación con las carreras de nieve (máximo acumulado anual) correspondiente. Los \* indican grado de significancia al 95% (\*) o al 99% (\*\*)

La mejor correlación entre la caída de nieve y el caudal se obtuvo cuando se relacionó el máximo de nieve acumulada en la cuenca, estimada como equivalente agua (Masiokas et al., 2006) y el caudal medio mensual anual tomando como año hidrológico, que para los ríos estudiados va desde el mes de Julio a Junio del año próximo.

En los gráficos siguientes se pueden visualizar algunas de estas relaciones.



**Gráfico 1: (a)** se muestra la relación entre el caudal anual sin auto correlación y la máxima cantidad de nieve acumulada en el periodo. El coeficiente de determinación (correlación al cuadrado) es en este caso de 0.746. Las líneas roja curva indican la elipse de predicción al 95% de confianza. La línea recta roja indica la recta de regresión y sus respectivas bandas de confianza.

El **Gráfico 1: (b)** muestra la relación de las mismas variables del grafico (a) en su distribución temporal.

Para cada uno de los ríos estudiados se estableció la relación entre el caudal medio anual y la cantidad de nieve siguiendo el mismo procedimiento.

### 3.2- Los escenarios de variación de caudales dentro del Cambio Global

En el primer informe se discutió la relación entre los caudales, la precipitación y la temperatura, y las causas de sus variaciones. Aunque cada uno de los factores que afectan la compleja relación clima/caudal aporta contribuciones probablemente diferentes en los escenarios de cambio climático global (por ejemplo la influencia de los forzantes), la mayor contribución a la variabilidad de los caudales tanto en la actualidad como probablemente en el futuro es la variación en la cantidad de precipitación que cae sobre la cuenca. Las variaciones en el ciclo anual de la temperatura, que actúan regulando la fusión de la nieve, también introducen cambios en la distribución estacional de la escorrentía. Sin embargo, como veremos mas adelante, la cantidad total de precipitación en la Cordillera interactúa con el ciclo anual de la temperatura en la modulación del ciclo hidrológico.

Otras variables como la topografía y la geología de cada cuenca, influyen en el momento de la erogación de los caudales máximos y mínimos en el curso del año, y por lo tanto dan la impronta característica al hidrograma de cada cuenca.

Las interacciones entre la precipitación, la temperatura y la topografía de cada cuenca son de enorme importancia en la planificación del uso de los recursos hídricos en los futuros escenarios.

Como una primera aproximación al problema y dada la carencia de un modelo ajustado de la relación nieve/caudal para cada cuenca, hemos estimado el volumen de los caudales futuros en base a las previsiones de la cantidad de nieve que surge del análisis del modelo climático regional de alta resolución MM5/CIMA para los años 2021-2030 en la región comprendida entre los 30°30' y 36° 00'S. y los 69°30' – 70°40'W. Estos datos se indican en la tabla I.

Para la predicción de los caudales futuros se emplearon las ecuaciones de regresión lineal que explican la relación caudal/nieve para cada cuenca calculadas como se indicó anteriormente: Dado que la relación entre el caudal medio mensual y la máxima cantidad de nieve acumulada se estableció en base a los caudales sin autocorrelación, para el cálculo de los caudales futuros se modeló autoregresivamente cada estimación para incorporar nuevamente el efecto de autocorrelación.

Rio	nieve	Nieve	Nieve	caudal	caudal	caudal	caudal	%	%
San Juan	actual	Esc.1	Esc.2	actual	calc.	Esc.1	Esc.2	Esc.1	Esc.2
Media	227.25	175.25	122.25	53.00	55.14	46.34	37.38	12.57	29.47
Confid -95%	158.86	106.86	53.86	40.44	43.57	34.37	25.81	10.87	24.07
Confid +95%	295.64	243.64	190.64	65.56	66.70	57.91	48.94	14.27	34.87

Rio Mendoza	nieve actual	Nieve Esc.1	Nieve Esc.2	caudal actual	caudal calc.	caudal Esc.1	caudal Esc.2	% Esc.1	% Esc.2
Media	613.61	561.61	508.61	46.06	46.40	43.37	40.28	6.53	13.19
Confid -95%	478.96	426.96	373.96	40.55	38.55	35.51	32.42	7.70	15.50
Confid +95%	748.26	696.26	643.26	51.56	54.26	51.23	48.13	5.38	11.00

Rio Tunuyan	nieve actual	Nieve Esc.1	Nieve Esc.2	caudal actual	caudal calc.	caudal Esc.1	caudal Esc.2	% Esc.1	% Esc.2
Media	358.82	306.82	253.82	28.66	30.97	29.06	27.11	6.17	12.46
Confid -95%	286.37	234.37	181.37	26.25	28.31	26.4	24.45	6.70	13.54
Confid +95%	431.26	379.26	326.26	31.06	33.63	31.72	29.77	5.63	11.39

Rio Diamante	nieve actual	Nieve Esc.1	Nieve Esc.2	caudal actual	caudal calc.	caudal Esc.1	caudal Esc.2	% Esc.1	% Esc.2
Media	526.20	461.20	396.20	34.20	35.21	33.05	27.55	7.30	12.92
Confid -95%	429.40	364.40	299.40	29.25	31.62	29.49	22.60	10.23	16.31
Confid +95%	623.01	558.01	493.01	39.15	38.76	36.61	32.50	4.37	9.54

Rio Atuel	nieve actual	Nieve Esc.1	Nieve Esc.2	caudal actual	caudal calc.	caudal Esc.1	caudal Esc.2	% Esc.1	% Esc.2
Media	805.62	755.62	665.62	35.60	35.21	33.66	31.00	5.45	9.72
Confid -95%	688.72	638.72	548.72	32.88	31.62	30.10	27.37	8.26	12.85
Confid +95%	922.52	872.52	782.52	38.32	38.76	37.23	34.49	2.64	6.60

**Tabla III:** Estimación de la reducción de los caudales en cada cuenca para la década del 2021-2030. Las mediciones de nieve se expresan en mm de agua equivalente. Los caudales están expresados como caudales medios anuales en m3/seg. Debido a la escasez de datos de carreras de nieve no se tomo un periodo común para todas las cuencas, se utilizaron todos los datos disponibles; los valores medios de los caudales corresponden a los años con datos de carreras de nieve.

La disminución de la cantidad de nieve se proyectó en dos escenarios: el Escenario 1 (moderadamente optimista) con valores de aumento de temperatura, disminución de precipitación y ascenso de la isoterma de 0° iguales a la mitad de los considerados por el escenario 2 (moderadamente pesimista) y que se encuentran en la tabla I.

Los porcentajes indican la disminución relativa de los caudales con respecto a los valores actuales.

#### 4.- Relación temperatura / caudal y cambio climático

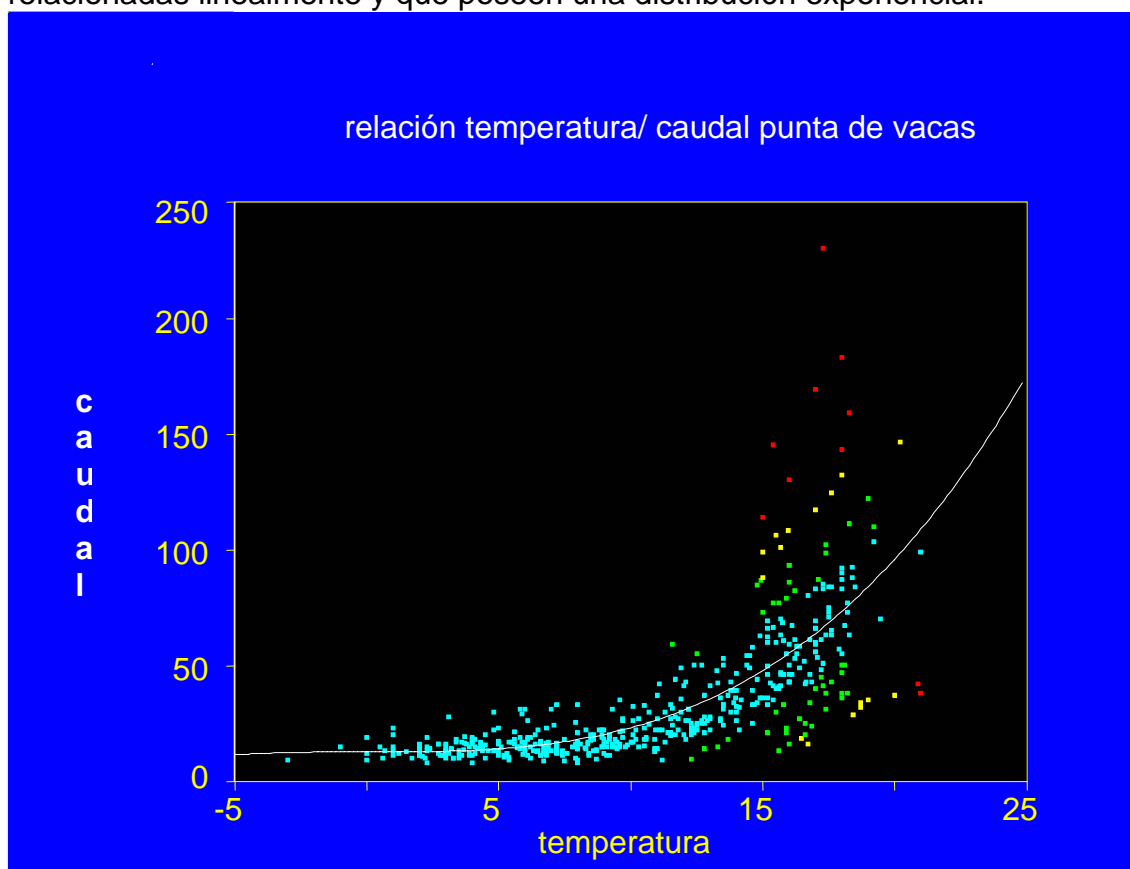
Quizás el aspecto mas conocido del cambio climático sea el pronosticado aumento de la temperatura. Numerosos estudios se han desarrollado en base a modelos y aunque con diferencias de escala y de precisión todos coinciden en vaticinar un aumento de la temperatura. El aumento será diferente de acuerdo con la latitud y en particular algunos estudios indican que las regiones de montaña experimentarán aumentos mayores (Bradley et al., 2004).

Uno de los mayores problemas para estudiar el impacto del incremento de la temperatura en los Andes Centrales es la falta de series largas de datos meteorológicos en la región, especialmente en las altas cuencas. El otro gran impedimento es la falta de modelos teóricos que correlacionen la temperatura con la precipitación de nieve y los caudales emergentes.

Uno de los pocos lugares en donde existen series de temperatura y de caudales, es la estación de Punta de Vacas a 2450 m de altura sobre la margen del Río Mendoza.

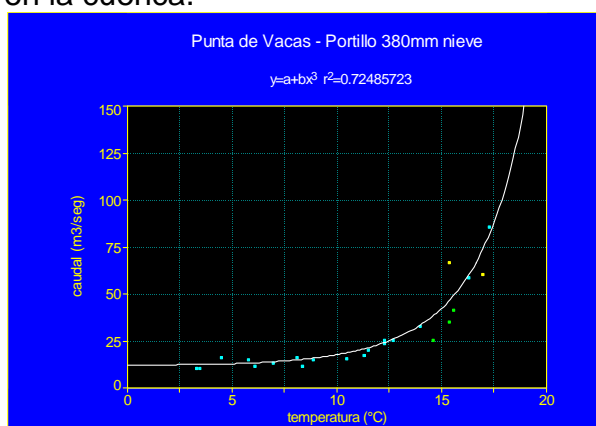


Si se estudia en esta estación la relación entre el caudal mensual y la temperatura media mensual se observa que las variables no se encuentran relacionadas linealmente y que poseen una distribución exponencial.

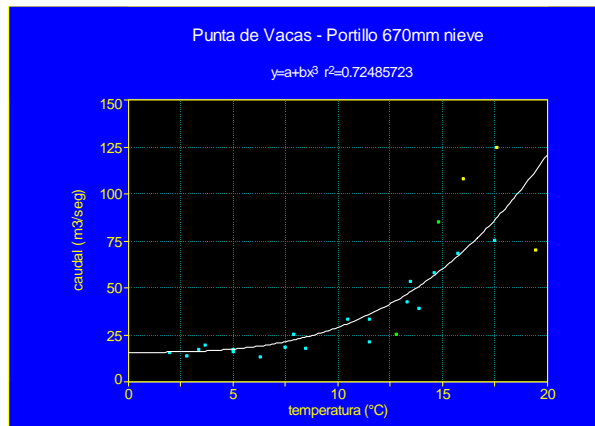


**Grafico 2:** Relación entre la temperatura media mensual y los caudales medios mensuales del Río Vacas (Cuenca del Río Mendoza) en Punta de Vacas 32°51'11".S.; 69°45'25"W.; 2.384 mts s.n.m. La ecuación de ajuste es del tipo  $y=a+bx^3$ , la correlación es de  $r=0.735$

En el grafico se observa que con temperaturas menores de 10°C en Punta de Vacas, el caudal se mantiene aproximadamente constante con valores entre 15 y 17 m<sup>3</sup>/seg. Cuando la temperatura alcanza valores mayores, el caudal se incrementa exponencialmente. La dispersión de los datos es particularmente notable a temperaturas mayores a 15°C y se debe a la mayor o menor cantidad de nieve presente en la cuenca.

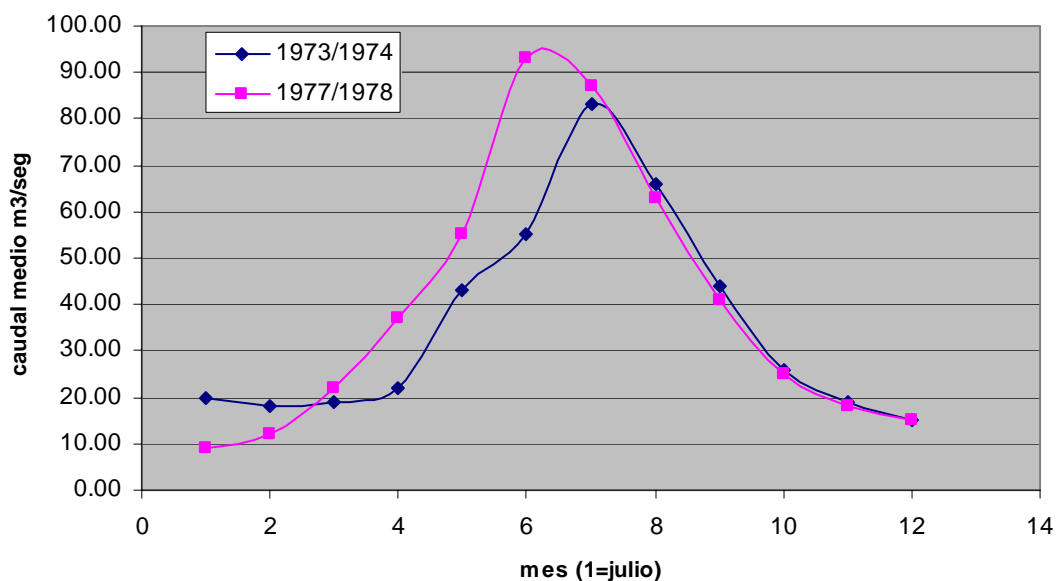


**Grafico 3:** Relación temperatura y caudal en Punta de vacas. Se muestra la relación para una carga de 380 mm de nieve medida en la alta cuenca. Con temperaturas mayores de 17.5°C se agota la disponibilidad de nieve.



**Gráfico 4:** Relación temperatura y caudal en Punta de Vacas. Se muestra la relación para una carga de 670mm de nieve medida en la alta cuenca. Con temperaturas de 17.5°C aun hay nieve en la cuenca.

Para ilustrar mejor el posible impacto de la temperatura sobre el hidrograma del Río de las Vacas, se representan en el Gráfico 5 los hidrogramas de dos años en los que se midieron cantidades de nieve de una magnitud similar en la cuenca superior pero en los que la temperatura media anual (año hidrológico julio-junio) medida en la estación meteorológica fue substancialmente diferente.



**Gráfico 5:** Hidrograma del Río Vacas para los años hidrológicos 1973/74 y 1977/78. La cantidad de nieve medida como agua equivalente fue de 1085 y 1135mm respectivamente en Portillo. La temperatura media anual en Punta de Vacas fue de 9.24°C para 1973/74 y de 11.48°C para 1977/78.

En el gráfico 5 se observa claramente que para una carga de nieve similar en la cuenca, cuando la temperatura es mayor, el pico de caudal se adelanta.

En base a estas consideraciones se ensayó proyectar el hidrograma medio del Río Vacas teniendo en cuenta un aumento de la temperatura de 1.5°C de acuerdo a los valores señalados en la Tabla I para el escenario A2.

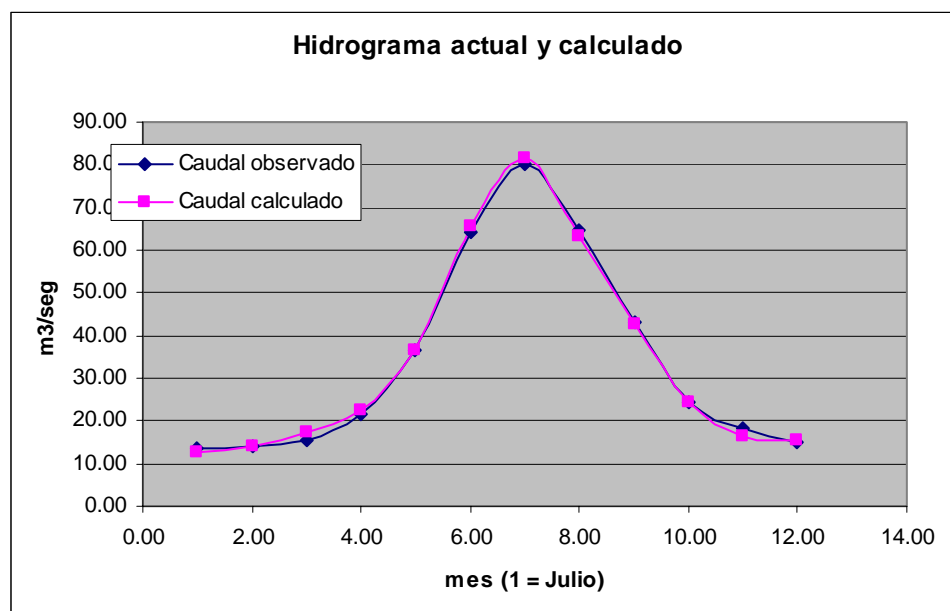
Para ello se calculó el hidrograma medio del Río Vacas utilizando en la determinación de los caudales medios mensuales los años para los cuales se

poseen datos de carreras de nieve en la estación Portillo, la temperatura media mensual para dichos años y la carga de nieve promedio. Utilizando las relaciones establecidas en los gráficos 2, 3 y 4 se estimo el hidrograma teórico para las temperaturas actuales y para las temperaturas pronosticadas para la década de 2021-2030. Los valores observados y calculados se pueden observar en la tabla IV.

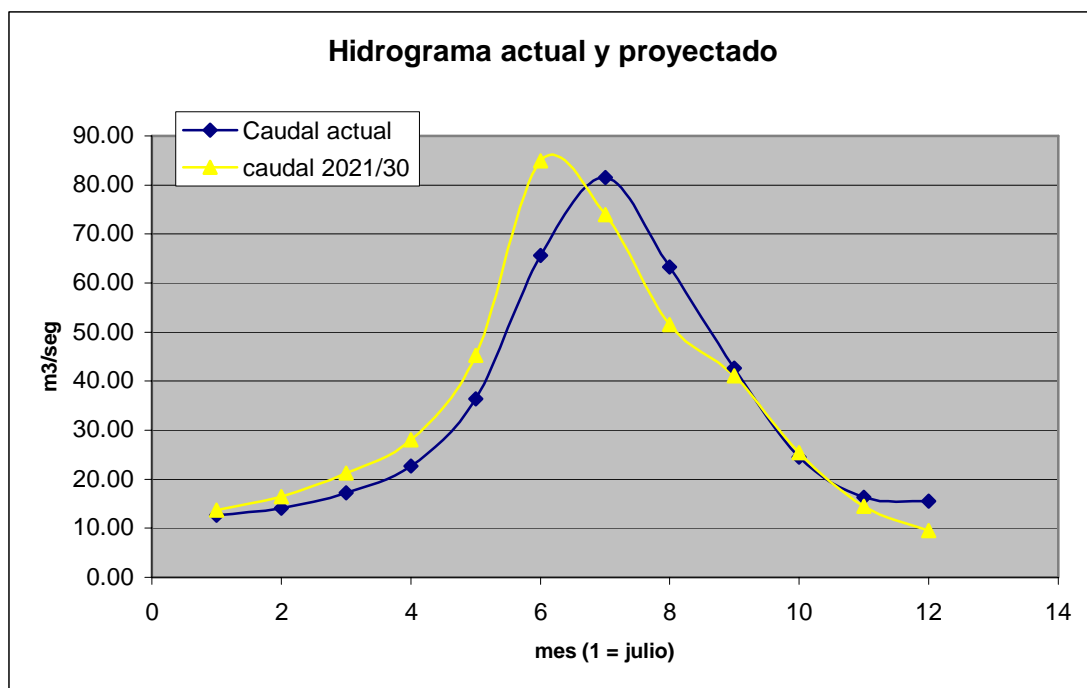
Mes	t° actual °C	Caudal obs. M3/seg	Caudal calc. M3/seg	t° 2020/30 °C	Caudal 2020/30 m3/seg	Caudal 2021/30 nieve 505mm
Julio	3.11	13.67	12.70	4.61	13.73	12.56
Agosto	5.15	14.02	14.05	6.65	16.42	16.72
Setiembre	7.02	15.54	17.20	8.52	21.29	21.29
Octubre	10.22	21.77	22.67	11.72	28.09	28.09
Noviembre	13.43	36.63	36.45	14.93	45.31	40.91
Diciembre	16.02	64.40	65.65	17.52	84.86	79.73
Enero	17.47	80.30	81.58	18.97	73.93	59.96
Febrero	16.85	64.74	63.25	18.35	51.49	46.55
Marzo	15.24	42.91	42.67	16.74	41.07	26.60
Abril	12.00	24.37	24.57	13.50	25.46	13.99
Mayo	8.13	18.14	16.30	9.63	14.48	13.57
Junio	4.10	15.12	15.56	5.60	9.46	13.56

**Tabla IV:** La temperatura estimada para la década 2021/2030 es la temperatura media actual mas 1.5°C de aumento en cada mes. La carga de nieve media para la estación Portillo es de 611mm de agua equivalente. En la última columna la cantidad de nieve se estimo de acuerdo con el modelo (105mm menos que el promedio actual) y con este valor se calcularon los caudales.

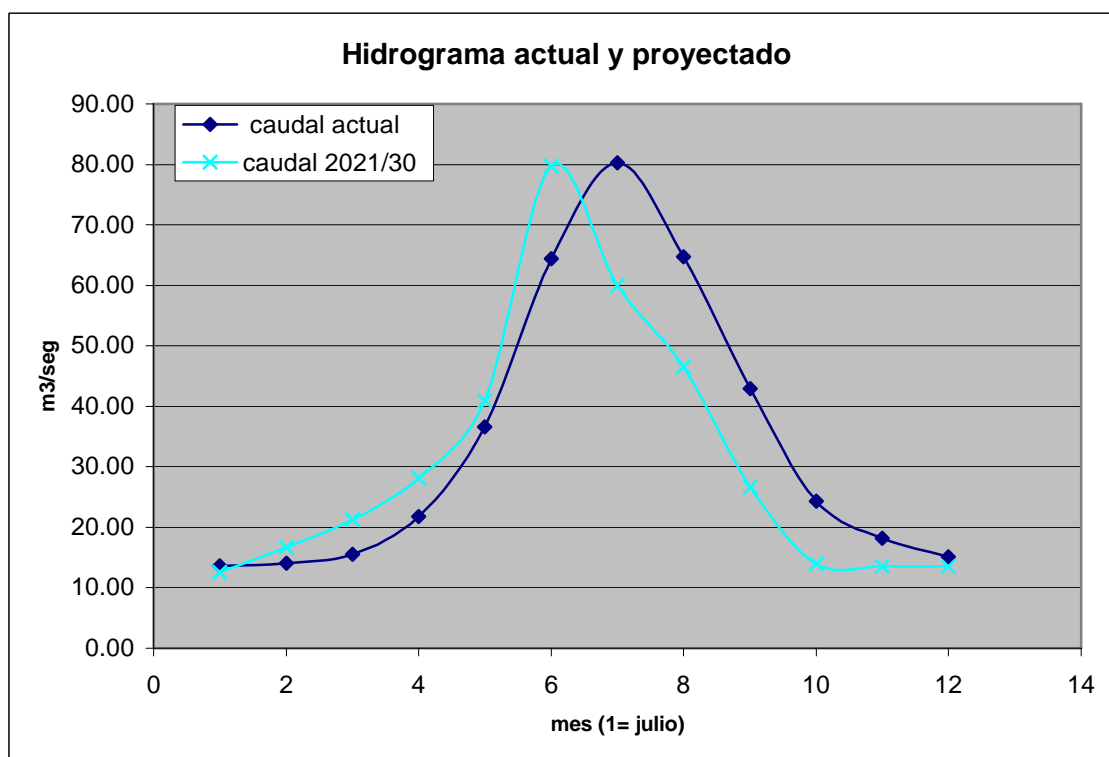
Estas relaciones se observan también en los siguientes gráficos:



**Gráfico 6:** Este gráfico permite analizar la bondad del ajuste de las ecuaciones empleadas en el cálculo del hidrograma.



**Grafico 7:** Se observa el hidrograma actual en la estación de Punta de Vacas y el proyectado para la década del 2021/30, con un aumento de la temperatura media de 1.5°C y una carga de nieve similar a la actual (611mm equivalente agua en promedio).

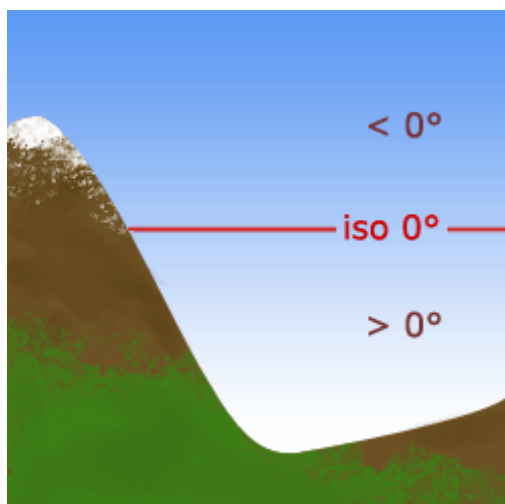


**Grafico 8:** Se observa el hidrograma actual en la estación Punta de Vacas y el proyectado para la década del 2021/30, con un aumento de la temperatura media de 1.5°C y una carga de nieve estimada según modelo de 505mm equivalente agua (100mm menos que el promedio actual).

## 5.- Las Variaciones en la altura de la Isoterma de 0°C

La isoterma de 0°C es una buena estimación de la línea por sobre la cual no se produce fusión de nieve, mientras que por debajo la nieve existente se derrite provocando la escorrentía.

Esta línea tiene variaciones estacionales, desciende en el invierno y asciende en el verano. La amplitud de esta oscilación indica la superficie sobre la cual se produce la fusión de la nieve que origina los caudales emergentes.



**Grafico 9:** Representación de la isoterma de 0°C o isoterma 0 (Nuñez, 2006)

Es importante señalar que esta línea determina también el tipo de precipitación que ocurrirá en el punto. Por arriba, se registrarán precipitaciones sólidas (nieve) mientras que por debajo el agua precipitará en forma líquida (lluvia). La altitud máxima de la isoterma indica la región en donde no habrá fusión y por lo tanto la nieve perdurará de un año al siguiente permitiendo la existencia de glaciares. Sin lugar a dudas, otros factores topográficos como la exposición y pendiente, y climáticos como dirección e intensidad del viento, introducen modificaciones en este patrón teórico de distribución de las precipitaciones sólidas en función de la altura de la línea de 0°C. Por ahora nos resulta muy difícil modelar estas variables para cada cuenca, por lo que nuestras estimaciones están basadas en el supuesto de que la línea de 0°C controla los procesos de fusión a escala regional.

Algunos estudios (Nuñez, 2006) indican que la isoterma de 0°C se ha elevado en los últimos años, lo que resulta coherente con la disminución en la extensión y en la pérdida de masa de los glaciares por un aumento de la temperatura del aire. En el citado estudio, Nuñez calcula la elevación de la línea de 0° para la década del 2021-2030. En promedio para la región comprendida entre los 30 y 36°L.S., esta línea se elevará entre 130 y 150mts.

Para estimar la superficie de las cuencas por encima de la altura media de la isoterma de 0°C en verano y en invierno se utilizaron imágenes satelitales. La definición de los límites de las cuencas se realizó aplicando el modelo ARC HYDRO, implementado como una extensión de ARCGIS 9.0 (ESRI), sobre el

Modelo Digital de Elevación SRTM (Shuttle Radar Topography Misión) obtenido por el USGS (United State Geological Survey).

El modelo Arc Hydro es un modelo de conectividad hidrológica superficial especialmente diseñado para obtener zonas de acumulaciones de flujo sobre los cauces de arroyos y ríos definidos por un modelo digital de elevación.

La resolución del DEM es de 90 metros, sobre él se aplica, para una mejor visualización, la imagen Landsat 7 ETM correspondientes a cada zona de estudio.

Con el software ENVI 4.0 se delimitaron las superficies que corresponden a las curvas de nivel de la altura de la isoterma de 0° según la época del año.

Las superficies actuales de fusión – ablación, se calcularon utilizando la altura media de la isoterma para los meses de invierno (Mayo - Setiembre) y de verano (Octubre – Abril). Los datos se obtuvieron de las series de radiosondeos diarios en Quinteros, tomadas por Servicio Meteorológico de Chile desde 1975 hasta 2004. Los escenarios para la década del 2021-2030 y para los inviernos de la década del 2080, se obtuvieron elevando la línea de nieve de acuerdo a lo pronosticado por el modelo.

	Isoterma de 0°C			Superficie de Cuencas		
	altura isoterma 0 (mts s.n.m)			Total	Sup. sobre isoterma 0 (km2)	
	actual	2020-2030	2080-2100		actual	2020-2030 2080-2100
<b>Cuenca Río San Juan</b>				<b>25835</b>		
Verano	4110	4260			4,208.16	3083.32
Invierno	3250	3400	4100		12,773.19	11,349.41 4,289.95
<b>Cuenca Río Mendoza</b>				<b>8010</b>		
Verano	4110	4260			2,305.20	1,818.05
Invierno	3250	3400	4100		4,548.17	4,257.19 2,338.55
<b>Cuenca Río Tunuyan</b>				<b>5908</b>		
Verano	4110	4260			1,329.20	1003.6
Invierno	3250	3400	4100		3,503.30	3126.7 1,400.30
<b>Cuenca Río Diamante</b>				<b>2796</b>		
Verano	4110	4270			130.742	65.521
Invierno	3250	3200	4000		1,366.71	726.74 204.209
<b>Cuenca Río Atuel</b>				<b>2135</b>		
Verano	4110	4270			75.646	40.265
Invierno	3250	3200	4000		855.271	443.613 119.969

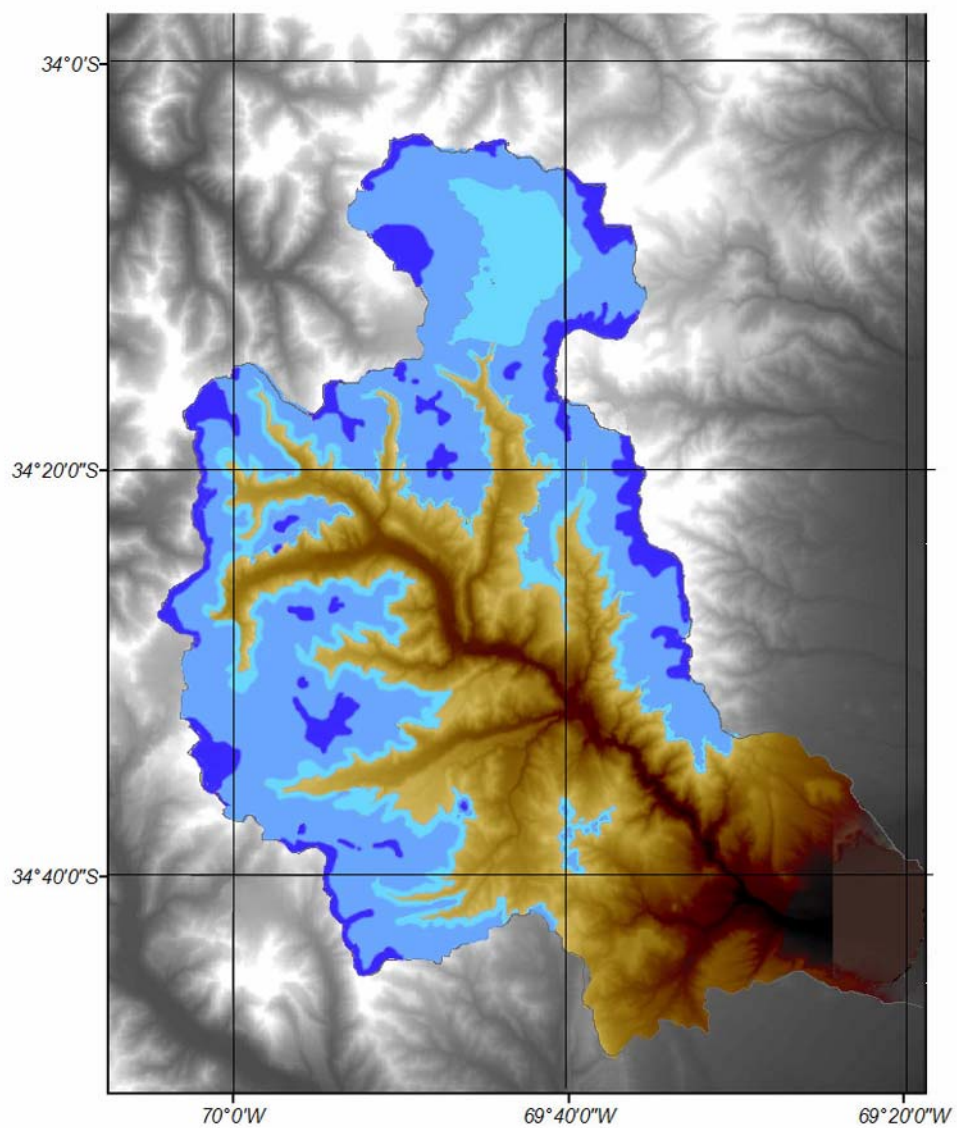
**Tabla V:** Altura de la isoterma de 0 y superficies total de las cuencas y sobre la respectiva posición de la isoterma. La superficie total de la cuenca del Río Tunuyan incluye el Cordón del Plata y esta calculada hasta el límite superior de los conos aluviales.

Como se observa en la Tabla V, las superficies sobre la línea de 0 disminuyen tanto en invierno como en el verano, la proporción de esta disminución es distinta para cada cuenca ya que hay diferencias topográficas entre ellas, tanto en su altura como en su superficie total.

	% de la sup total de la Cuenca			% disminucion/actual	
	actual	2020-2030	2080-2090	2020-2030	2080-2090
<b>Cuenca Rio San Juan</b>					
Verano	16.39	12.01		26.73	
Invierno	49.76	44.21	16.71	11.15	66.41
<b>Cuenca Rio Mendoza</b>					
Verano	28.18	22.23		21.13	
Invierno	55.60	52.04	28.59	6.40	48.58
<b>Cuenca Rio Tunuyan</b>					
Verano	22.50	16.99		24.50	
Invierno	59.30	52.92	23.70	10.75	60.03
<b>Cuenca Rio Diamante</b>					
Verano	4.75	2.38		49.89	
Invierno	49.64	26.40	7.42	46.83	85.06
<b>Cuenca Rio Atuel</b>					
Verano	3.17	1.69		46.77	
Invierno	35.86	18.60	5.03	48.13	85.97

**Tabla VI:** Porcentaje de la superficie total de la cuenca sobre la línea de 0°C y porcentaje de disminución relativa de las superficies por arriba de la línea de 0°C.

La Tabla VI muestra el porcentaje de superficie sobre la isoterma de 0°C en el invierno y en el verano con respecto al total de la cuenca. También expresa en porcentaje la disminución de superficie en relación a los valores actuales para la década del 2020-30 y para el invierno de la década 2080-2090. En las cuencas ubicadas hacia el sur, esta proporción es notablemente menor en el verano, dado que las cuencas tienen menor altura. Esta situación es analizada en particular para la cuenca del río Diamante:

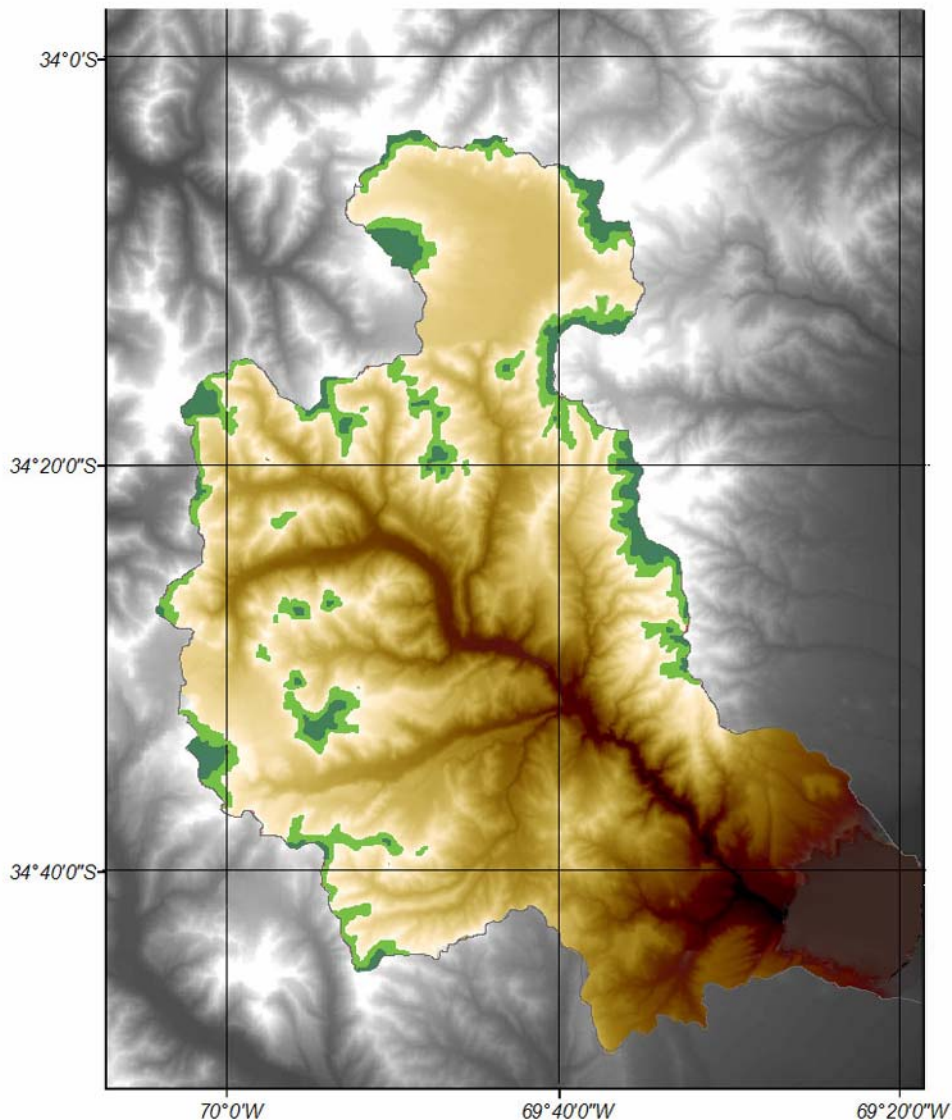


**Grafico 10:** Cuenca del Río Diamante. Posición de la isoterma 0°C en invierno. El color celeste claro representa la posición actual, en celeste para la década 2021-2030 y en azul para 2080-2100.





Vista aérea de la Laguna del Diamante y valle inferior del Río Diamante tomada el 18 de Noviembre de 2006. Se observa claramente que la nieve persiste en la parte alta de la cuenca, indicada por colores celestes y azules en el Grafico 10. Los valles con menores elevaciones, indicados con tonalidades de color marrón en el Grafico 10, están libres de nieve.



**Grafico 11:** Cuenca del Río Diamante. Posición de la isoterma 0°C en verano. El color verde claro representa el área actual, y el verde oscuro para la década 2021-2030. Para los veranos durante la década 2080-2100, la cuenca no ofrece superficie sobre la línea de 0°C.

Los gráficos 10 y 11 muestran la estimación de la posición de la isoterma 0°C en la cuenca del Río Diamante. Esta estimación se realizó para la época actual, para la década del 2020-2030 y para la década del 2080-2100, en época de invierno (Grafico 10) y de verano (Grafico 11). Debe tenerse en cuenta que la cuenca del Diamante es relativamente baja, con pocos cerros con alturas superiores a los 4800mts por lo que en la misma no existen muchos glaciares. La magnitud de la disminución de la superficie por encima de la isoterma 0°C resulta evidente cuando se estima el porcentaje que sobre el total de la cuenca representa dicha superficie. Así, en la actualidad, en el invierno, el 48.8% de la cuenca está en la región con temperaturas menores a 0°C; para la década del 2020-2030, esta proporción desciende al 26% y para la década del 2080-2100 alcanzaría a solo el 7.3%. Durante el verano, en la actualidad la superficie en donde se mantiene la nieve es del 4.7%, se estima para el 2020-30 en 2.3% y para el 2080-2100 no habría en la cuenca superficies capaces de mantener la

nieve de un año para el otro, ya que toda la cuenca tendría temperaturas medias en el verano superiores a 0°C.

## **6.- Discusión:**

En general, las posibles consecuencias del cambio climático han sido estimadas y analizadas a nivel global. Mas recientemente, se han utilizado modelos de circulación de variada complejidad y resolución en escenarios regionales basados en consideraciones físicas, económicas y sociales. La mayor o menor exactitud de las estimaciones dependerá entonces de la habilidad del modelo para simular los escenarios futuros y de la confiabilidad del o de los escenarios elegidos (mas o menos pesimistas).

Hasta el momento, el mejor modelo para la región de Cuyo, es el desarrollado en el Centro de Investigaciones del Mar y de la Atmósfera (CIMA- CONICET), que mediante distintas técnicas (down scaling y pattern scaling) obtiene proyecciones con mejor resolución espacial que los modelos globales.

Aunque este modelo (MM5/CIMA) produce resultados a escalas temporales diarias, mensuales y anuales, a los fines de este informe y teniendo en cuenta la disponibilidad y resolución de las series de datos instrumentales disponibles, se ha trabajado a nivel de datos mensuales y/o estacionales. Las predicciones del modelo se redujeron a valores medios anuales, salvo en el caso de la altura de la isoterma 0°C, que se estimó para las estaciones de máxima y mínima elevación (verano e invierno).

Las predicciones están analizadas para el periodo 2020-2030, utilizando el escenario A2. Este escenario aunque pesimista en su concepción, parece lamentablemente ser bastante realista en el futuro cercano, ya que faltan solo trece años para llegar a la década del 2020-30 y hasta ahora no se observan ninguna medida efectiva de cambio cuantitativo en las emisiones de gases de tipo invernadero, ni otros cambios significativos en el comportamiento de la sociedad respecto a este tema.

Los ríos de la región de Cuyo son de régimen hidro-nival, fuertemente condicionados por la cantidad de precipitación sólida que se acumula en la cuenca superior. La escorrentía se produce por fusión de la nieve acumulada en la cuenca, proceso en el cual la cantidad de nieve determina el volumen del caudal emergente y la marcha anual de la temperatura determina el momento y velocidad con la que la nieve se funde.

El sistema nieve – fusión - escorrentia es complejo y en el mismo intervienen otras variables como altura de la cuenca, exposición de las pendientes y quebradas, composición del lecho rocoso entre otras. Esta complejidad implica la necesidad de contar con un modelo de funcionamiento ajustado a las particularidades de cada cuenca. Este factor, posiblemente represente una de las mayores limitaciones en las estimaciones presentadas en este informe.

En la actualidad no se cuenta con estos modelos y los datos instrumentales disponibles que han medido las variables principales del proceso se encuentran en series relativamente cortas y a veces fragmentadas.

Es por ello que los resultados de este informe deben ser considerados como una aproximación, con errores probables altos, que deben ser ajustados. Sin embargo, estos resultados expresan órdenes de magnitud que permiten una discusión y una alerta sobre la posible aparición de vulnerabilidades en plazos relativamente breves que deberían ser tenidas en cuenta para la toma de decisiones y de planeamiento futuro en la región.

### **6.1- La disminución de los caudales emergentes**

Los resultados sobre la disminución de la carga nival indicada por el modelo y la consecuente disminución de los caudales emergentes indican notables diferencias en cada cuenca (tabla III). La cuenca del río San Juan, que es la cuenca más extensa, es la que presenta una mayor disminución relativa en los caudales, alcanzando un 29% para el escenario A2 durante el período 2020-2030. En este caso particular, es muy importante señalar que las estimaciones se han realizado en base a los datos disponibles de carreras de nieve para la cuenca que son menores que para otros ríos, por lo cual los errores relativos de las estimaciones son mayores.

El río Mendoza, cuya cuenca es la que tiene la mayor altura media de todas, presenta una disminución en el orden del 13%, 6 m<sup>3</sup>/seg menos que el caudal medio actual. Las cuencas de los ríos Tunuyan y Diamante también indican valores similares de disminución de caudales en el orden del 13%.

El río Atuel, ubicado en el extremo sur de la región considerada, presenta la menor pérdida de caudal, alrededor del 10%.

Es necesario advertir que se trata de estimaciones sobre caudales medios, y que no se ha tomado en cuenta la posible incidencia de forzantes como el Niño cuya aparición tiende a aumentar la precipitación de nieve, ni de la Niña que tiende a disminuirla.

### **6.2- La alteración del hidrograma**

El hidrograma de los ríos cuyanos se modifica por cambios en la temperatura media y por cambios en la cantidad de nieve en la cuenca. Esta relación se ilustra en el gráfico 5 en donde se eligieron los años hidrológicos 73/74 y 77/78 en los que se observó una carga de nieve similar, del orden de los 1000mm de agua equivalente en la estación Portillo pero una temperatura media anual en la estación de Punta de Vacas de 9.24°C para el 73/74 y 11.5°C para el 77/78.

Claramente se observa que a mayor temperatura, el pico del caudal se adelanta y que los caudales de primavera se ven incrementados con respecto al año de menor temperatura media. Por el contrario, los caudales estivales son más bajos.

Esta misma situación se plantea para las estimaciones futuras, en donde el modelo predice un aumento medio de la temperatura de 1.50°C para las cuencas del San Juan, Mendoza y Tunuyan y 1.25°C para el Diamante y el Atuel. Debido a la falta de datos de temperatura, carga de nieve y de caudales en un mismo punto de cada cuenca, se ha preferido realizar un estudio de caso, empleando los datos de la estación meteorológica de Punta

de Vacas, a 2400mts s.n.m., los aforos del río Vacas a poca distancia de la estación meteorológica y las estimaciones de carreras de nieve de la estación Portillo (Chile), también relativamente cercana a Punta de Vacas.

Los gráficos 7 y 8 ilustran los hidrogramas actuales y los calculados de acuerdo con el aumento de la temperatura previsto por el modelo para una carga de nieve similar a la media actual de 611mm (Grafico 7) y una carga media de nieve de 505mm pronosticada en el modelo para el período 2020-2030 (Grafico 8). Se observa que en ambos casos ocurre un adelantamiento de un mes en los picos de escorrentía y una disminución en los caudales emergentes durante el verano.

Las consecuencias de este fenómeno tienen una gran importancia en la planificación del riego, del manejo de las presas y centrales hidroeléctricas y de la provisión de agua para el consumo humano.

Las consecuencias de este fenómeno tienen una gran importancia en la planificación del riego, del manejo de las presas y centrales hidroeléctricas y de la provisión de agua para el consumo humano.

En el Departamento General de Irrigación de la Provincia de Mendoza, ya se cuenta con seis años de datos diarios de temperaturas y caída de nieve en seis estaciones de alta montaña. La integración de estos datos con los existentes de años anteriores y de otras estaciones es un trabajo que por su magnitud excede los términos de este informe, pero que quizás permita pronosticar la variación de los hidrogramas para cada una de las cuencas estudiadas.

### **6.3 Las variaciones en la isoterma 0°C**

La isoterma de 0°C es una medida practica para establecer la división de regiones en donde ocurren fenómenos de gran interés para el ciclo hidrológico y un gran numero de procesos en la alta montaña.

Como la fusión de la nieve depende de que se alcancen temperaturas superiores a los 0°C, la altura de la isoterma de 0°C representa la cota por encima de la cual no habrá fusión mientras que todo lo que este por debajo de esta línea, tendrá energía suficiente para transformar la nieve en agua liquida. Además separa las regiones en donde la precipitación ocurre en forma liquida o sólida, y en donde los suelos permanecen congelados en forma estacional o en forma permanente.

En este informe, se ha trabajado con la altura media de la isoterma de 0°C para los meses de invierno (Mayo - Setiembre) y de verano (Octubre – Abril). Los datos actuales se obtuvieron de las series de radiosondeos diarios en Quinteros, tomadas por Servicio Meteorológico de Chile desde 1975 hasta 2004. Las estimaciones del modelo (Nuñez, 2006) indican las variaciones de la isoterma 0°C para el verano e invierno proyectadas en la década del 2020-30 y 2080-90.

Con estos datos y con la ayuda de imagines satelitarias, se pudo obtener la superficie de cada cuenca hasta la estación de aforo, y la superficie sobre la

línea de 0°C para la actualidad y para la década 2020-30, tanto en el invierno como en el verano.

En la tabla VI se observan los porcentajes de variación de la superficie sobre la línea de 0°C para cada cuenca con respecto a la superficie total de la misma, en verano, y en invierno para la actualidad y para la década 2020-2030. Existen algunas diferencias marcadas de acuerdo a la topografía de cada cuenca. Así, las cuencas ubicadas al norte de la región (San Juan, Mendoza y Tunuyan) que poseen mayor altura media presentan reducciones en los porcentajes de superficie sobre 0°C entre los inviernos actuales y los inviernos de la década 2020-30 en valores cercanos al 10%. Algo mayor es la pérdida en los veranos (25%).

Sin embargo las cuencas del sur (Diamante y Atuel) con alturas medias mucho mas bajas presentan porcentajes de reducción del orden del 47%, tanto en los veranos como en los inviernos. Es entonces probable que en estas cuencas el hidrograma se modifique más que en las cuencas del norte, apartándose significativamente de los valores actuales.

La reducción de las superficies captadoras afectará necesariamente el balance de los glaciares, cuya disminución probablemente se acentúe fuertemente.

## **7.- Conclusiones**

- Los ríos de la región cuyana son de régimen hidro-nival, fuertemente condicionados por la cantidad de precipitación sólida que se acumula en la cuenca superior.
- El proceso de escorrentía se produce por fusión de la nieve acumulada en la cuenca, proceso en el cual la temperatura determina el momento y la velocidad con la que la nieve se funde.
- Los modelos de circulación general de la atmósfera muestran cambios importantes en la precipitación y la temperatura para los escenarios climáticos futuros en comparación con los valores actuales. Para la Cordillera de los Andes, en la región comprendida entre los paralelos de 32° a 36° S, los modelos desarrollados en el Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) pronostican para el período 2020-2030 y en base al escenario A2, un aumento medio de la temperatura de 1.5 a 1.25°C y una disminución media de la precipitación de 100mm. Este modelo también predice para el mismo período una elevación media de la isoterma 0°C entre 150 y 130 mts en comparación con la elevación actual.
- La proyección de estos cambios climáticos a los caudales medios anuales se traducen en una disminución en las descargas emergentes con mayor impacto en los ríos ubicados en el norte de la región considerada (13 a 29%) mientras que los ríos ubicados hacia el sur presentan un impacto menor (-10 a 12%) en relación a los caudales medios actuales.

-La proyección de estos valores al hidrograma medio indica un adelanto de los picos de máxima descarga de aproximadamente un mes, aumento de los caudales en primavera (Octubre y Noviembre) y disminución de los caudales del verano (Enero, Febrero y Marzo).

-La proyección de estos valores a la posición de la isoterma 0°C indica una disminución de la superficie que permite la acumulación de nieve en el invierno y una disminución de la superficie que permite la permanencia de nieve en verano de un año hacia el siguiente.

Las cuencas más afectadas serán las cuencas ubicadas hacia el sur de la región porque son las cuencas más bajas, en las cuales la disminución de la superficies mencionadas alcanzan a porcentajes entre 45 y 50% para la década del 2020-30 con respecto a las superficies actuales.

-Las consecuencias principales de estos cambios será una menor oferta hídrica en los oasis del Cuyo, particularmente en los ríos San Juan y Mendoza. Asimismo, se espera una alteración del hidrograma anual, con adelanto de los picos máximos de escorrentías y disminución de los caudales de verano. Estos efectos serán más pronunciados en las cuencas de los ríos Diamante y Atuel.

- Otras consecuencias serán la desaparición paulatina de los glaciares por elevación de la línea de 0°C y disminución de las precipitaciones, con la pérdida de la capacidad reguladora y de la reserva de agua que los mismos poseen.

La elevación de la línea de 0°C en el invierno implicará la disminución de superficies aptas para la práctica de deportes invernales.

La elevación de la línea 0°C media de verano expondrá superficies que en la actualidad están en forma permanente o casi permanentemente congeladas, con riesgo de pérdida de estabilidad y aumento de movimientos en masa.

- Si bien los resultados expresados en este informe son valores indicativos de tendencias y de órdenes de magnitud más que datos exactos, en su conjunto revelan una modificación importante del ciclo hidrológico para una región que es altamente dependiente del recurso hídrico y altamente vulnerable a cualquier alteración del mismo.

-Frente a este panorama es imperativo la realización de estudios detallados que permitan la modelización de cada cuenca y el incremento de estaciones de monitoreo que permitan contar con mayor número de datos para testar y validar los modelos.



## 8.- Bibliografía Consultada

- Barnett, T., R. Malone, W. Pennell, D. Stammer, B. Semtner and W. Washington. 2004. The Effects of Climate Change on Water Resources in the West: Introduction and Overview. *Climatic Change* 62: 1–11, 2004.
- Boninsegna, J. and Delgado S. 2002 Atuel River streamflow variations from 1575 to present reconstructed by tree rings, their relationships to the Southern Oscillation. In: Trombotto, D. and R. Villalba (eds.), 2002. *IANIGLA, 30 Years of Basic and Applied Research on Environmental Sciences*. Zeta Editores, Mendoza, Argentina, pp. 31-34.
- Boninsegna, J. y R. Villalba 2006. Los condicionantes geográficos y climáticos. Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan. *Primer informe a la Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación*. 19pp.
- Bradley, B., F. Keimig, and H. Diaz. 2004. Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geophys. Res. Lett.* 31, L16210, 2004.
- Cobos, D. R and J. Boninsegna, 1983. Fluctuations of some glaciers in the upper Atuel river basin, Mendoza, Argentina. *Quaternary of South América and Antartic Penninsula* 1:61-82. 1983.
- Compagnucci, R.H., and W.M. Vargas, 1998: Inter-annual variability of the Cuyo rivers' streamflow in the Argentinean Andes Mountains and ENSO events. *Int. J. Climatol.*, 18, 1593-1609.
- Dirección de Gestión Hídrica, 2006. Boletín Hidrometeorológico. *Departamento de Evaluación de Recursos Hídricos*. Departamento General de Irrigación, Pcia de Mendoza.
- IPCC 2001. Climate Change 2001. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Watson R. T. and the Core Writing Team (eds). Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K. 398pp..
- Lascano, M y R. Villalba 2007. Algunas precisiones sobre el rol de los glaciares en el escurrimiento andino. Manuscrito preparado para el XI Congreso del Agua, Tucumán Mayo 2007. Inédito.
- Leiva, J.C., 1999: Recent fluctuations of the Argentinian glaciers. *Global Planet. Change*, 22, 169-177.
- Masiokas, M. H., R. Villalba, B. H. Luckman, C. Le Quesne, and J. C. Aravena. 2006. Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *J. Climate*. (in press).
- Núñez, M. 2006. Desarrollo de escenarios climáticos en alta resolución para Patagonia y zona cordillerana. Período 2020/2030. Proyecto Desarrollo de Escenarios Climáticos y Estudios de Vulnerabilidad. Informe Nro 3. *Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable*. 22pp.



Núñez, M. y S. Solman 2006. Desarrollo de escenarios climáticos en alta resolución para Patagonia y zona cordillerana. Período 2020/2030. Proyecto Desarrollo de Escenarios Climáticos y Estudios de Vulnerabilidad. Informe Nro 2. *Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable*. 31pp.

Prieto, M.R., H.G. Herrera, T. Castrillejo, and P.I. Dussel, 2000: Recent climatic variations and water availability in the central Andes of Argentina and Chile (1885-1996). The use of historical records to reconstruct climate (In Spanish). *Meteorologica*, 25(1-2), 27-43.

Stewart, I., D. Cayan, M. Dettinger. 2005. Changes toward Earlier Streamflow Timing across Western North America. *J. of Climate*. 18:1136-1155.

Stone, R and J. Bohannon 2006. U.N. Conference Puts Spotlight on Reducing Impact of Climate Change. *Science* 314:1224

Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2004. Estadística Hidrológica de la República Argentina, *Secretaría de Obras Públicas*. Edición digital ISBN:987-98869-3-3 .

Villalba, R., Lara, A., Boninsegna, J.A., Masiokas, M., Delgado, S., Aravena, J.C., Roig, F.A., Schmelter, A., Wolodarsky, A., Ripalta, A. 2003. Large-scale temperature changes across the southern Andes: 20th-century variations in the context of the past 400 years. *Climatic Change*, 59: 177-232.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a la Ing. Silvia Delgado de Brun por su ayuda en la determinación de las superficies de las cuencas utilizando imágenes satelitales y modelos de elevación, y al Lic. Daniel R. Cobos por la determinación de la superficie de la cuenca del río Tunuyan.