

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS OASIS DEL OESTE ARGENTINO

Palabras clave: Cambio Climático, impactos, Oasis del Centro Oeste, ciclo hidrológico, Argentina.
Key words: Climate Change, Impacts, Central-west oases, Hydrological cycle, Argentina.

En Argentina, una de las regiones más vulnerables al Cambio Climático son los oasis productivos del centro-oeste. La actividad agrícola, industrial, la producción de hidroelectricidad y los asentamientos humanos dependen casi exclusivamente del agua proveniente de la fusión de la nieve y de los cuerpos de hielo que se encuentran en la Cordillera de los Andes. La variabilidad de las nevadas (y de los caudales de ríos) es alta, con años de abundancia y de escasez, aunque para la región su tendencia es a disminuir. El aumento de la temperatura, observable en las series instrumentales, es coherente con el aumento pronosticado debido al incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera.

La disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura originan el retroceso de los glaciares observado desde el siglo XIX, indicando una pérdida importante en reserva de agua. La variación de los caudales originada puede alterar la distribución del agua para riego y el manejo de las presas para generar hidroelectricidad.

En la Cordillera de Mendoza y San Juan, la precipitación es fundamentalmente invernal. En cambio en los oasis, ubicados en el pedemonte, la lluvia ocurre durante el verano en forma de tormentas convectivas. Éstas han aumentado durante las últimas décadas en forma significativa y constituyen un aporte de agua que puede aliviar condiciones de sequía. La temperatura también muestra una tendencia positiva en esta región.

Los estudios realizados mediante el uso de modelos regionales de circulación general han permitido construir hipótesis sobre el impacto del cambio climático, estimar la vulnerabilidad de la región y diseñar posibles medidas de adaptación.

In Argentina, one of the most vulnerable regions to climate change is the central-west productive oases. All agricultural, industrial, hydropower production and human settlements depend almost exclusively on the melting water from the snow and ice bodies found in the Andes. The variability of the snowfall and stream-flow are very high, with years of abundance and years of scarcity, although in the region the number of abundant years is decreasing. The observed time series of temperature indicates a positive trend, consistent with the predicted increase due to the higher CO₂ concentration in the atmosphere. The negative trend in rainfall and positive in temperature explain the glacier retreat observed since the 19th century indicating the loss of a major water reserve. This altered hydrograph can have a high impact on the distribution of water for irrigation and for the management of dams to generate hydroelectricity.

In the Cordillera of Mendoza and San Juan, precipitation falls mainly in winter. In contrast, in the foothills oases, rainfall occurs during the summer in the form of convective storms. The summer precipitation has significantly increased in recent decades and represents a water contribution that to some extent could relieve drought conditions. The temperature also shows a positive trend in the region of cultivated oases.

The use of regional general circulation models has permitted to build hypotheses about the expected impact of climate change. These studies are important to estimate the vulnerability to the changes and to design possible adaptation measures.

■ INTRODUCCIÓN:

La creciente demanda de energía para el desarrollo de las actividades humanas produce el consumo de grandes cantidades de combustibles

fósiles (petróleo, carbón, gas). El proceso de combustión libera gases residuales, mayormente dióxido de carbono (CO₂) y está modificando la composición de la atmósfera aumentando la proporción relativa de

este compuesto. Mediciones de la cantidad de CO₂ en la atmósfera que se realizan en el Mauna Loa / Hawai muestran un sostenido incremento de la concentración de dicho gas en la atmósfera.

■ José A. Boninsegna

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales - CONICET.
Av. Riz Leal s/n Parque San Martín 5500
Mendoza.

pbonin@mendoza-conicet.gob.ar

El dióxido de carbono y otros gases llamados “de efecto invernadero” como el metano y los óxidos de nitrógeno actúan como un filtro opaco a la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre y consecuentemente la temperatura de la atmósfera aumenta. La serie histórica de temperatura media de la tierra se ha incrementado 0.76°C desde 1878 hasta el 2011. El incremento de la temperatura no es uniforme en toda la tierra, se concentra especialmente en las zonas más continentales del Hemisferio Norte, la consecuencia de este calentamiento desigual es la modificación parcial de la circulación atmosférica y por ende la distribución de los patrones de precipitación.

En la actualidad existe una fuerte evidencia que los cambios en la temperatura observados, así como varios fenómenos asociados (incremento en la frecuencia y severidad de fenómenos extremos, derretimiento de glaciares y del hielo de los polos) son atribuibles al “efecto invernadero” de los gases producidos por la actividad antrópica.

En nuestro país, una de las regiones más vulnerables a los cambios de temperatura y precipitación se encuentra en los oasis productivos del centro-oeste. Las provincias de Mendoza y San Juan con una extensión territorial de 148.827 y 92.789 km² respectivamente, pero de la cual solo el 3.8% es cultivada, concentran más del 90% de la industria vitivinícola nacional, tienen un importante desarrollo de industrias agroalimentarias y abundantes recursos naturales no renovables como petróleo y minería.

Toda la actividad agrícola, industrial, la producción de hidroelectricidad y los asentamientos humanos dependen fuertemente del agua proveniente de la fusión de la nieve y

de los cuerpos de hielo que se encuentran en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes. Allí la nieve se acumula como consecuencia de tormentas frontales que alcanzan la región principalmente en el invierno y cuando la temperatura comienza a elevarse en la primavera (Octubre – Noviembre) se inicia el proceso de fusión de la nieve incrementando el caudal de los ríos. Los ríos de la región cuyana son de régimen hidronival fuertemente relacionados a la cantidad de precipitación sólida que se acumula en la cuenca superior. El tamaño, exposición y altura de la cuenca influye en la cantidad y distribución de los caudales que alcanzan el valle (fig 1).

Desde el punto de vista físico, la oferta hídrica en la región cuyana tiene condicionantes geográficos y climáticos que definen la variabili-

dad del sistema. El estudio de estos condicionantes es imprescindible para evaluar la disponibilidad hídrica presente y futura, los grados de resiliencia, la vulnerabilidad del sistema y la posibilidad de implementar medidas de adaptación.

■ LOS CONDICIONANTES GEOGRÁFICOS.

La geografía de las cuencas es un fuerte condicionante de la oferta hídrica. La altura de la cuenca influye en mayor o menor capacidad de almacenamiento de nieve y la topografía, en especial la orientación relativa de los valles, en la mayor o menor velocidad de fusión de la nieve debida a la exposición solar, originando diferencias en los tiempos en que los ríos alcanzan su máximo caudal. En la porción de la Cordillera de los Andes correspondiente a

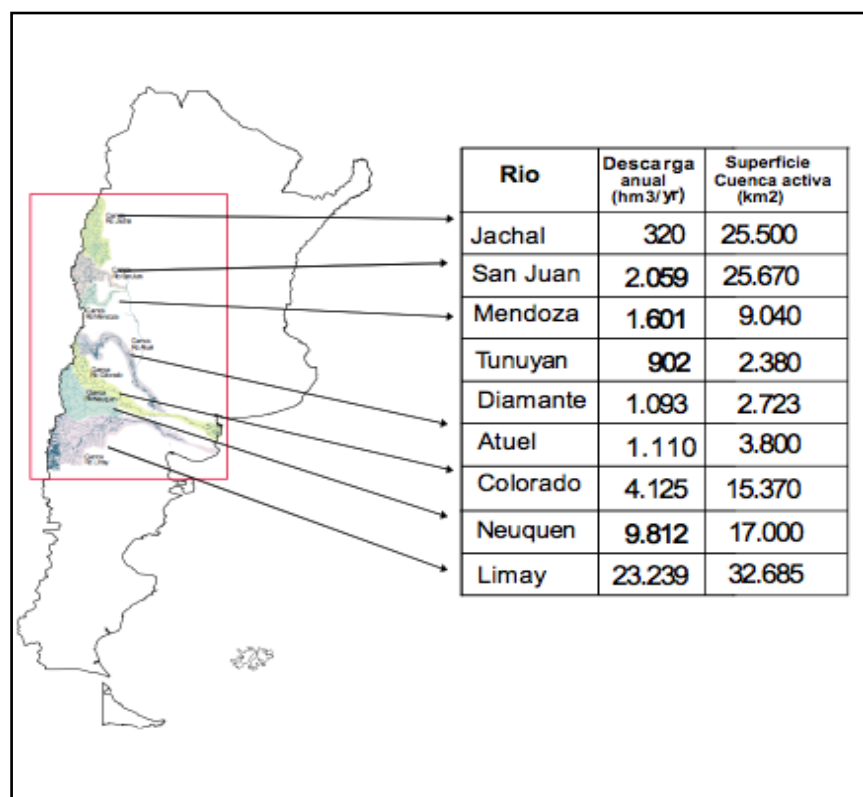


Figura 1: En este cuadro se representan las cuencas de los principales ríos de la región cuyana, junto con los derrames anuales medios. Aunque los ríos Neuquén y Limay no pertenecen a Cuyo, se han colocado en este cuadro con el propósito de comparar las erogaciones anuales. Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

las provincias de Cuyo es donde los cordones montañosos alcanzan su mayor altura con picos como Aconcagua (7035 mts), Tupungato (6570 mts), Mercurario (6770mts).

Sin embargo, aquí la Cordillera se presenta no como un único cordón sino como cordones montañosos paralelos surcados por valles profundos.

Las cuencas de los Ríos Mendoza y San Juan son las de mayor altura, mientras que las ubicadas hacia el sur, tienen alturas progresivamente inferiores

Los ríos San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante y Atuel son los más importantes proveedores de agua para consumo humano, regadío y generación de hidroelectricidad en Cuyo. Varias estaciones de aforo ubicadas en cada cuenca permiten un análisis de las variaciones en los caudales y del hidrograma anual.

■ LOS CONDICIONANTES CLIMÁTICOS.

La cantidad de precipitaciones níveas y su acumulación, la temperatura y sus variaciones y la influencia de algunos forzantes del sistema climático regulan la cantidad y oportunidad de la oferta hídrica en la región cuyana.

Como se ha señalado en un párrafo anterior, el régimen hídrico de la región es esencialmente hidronival, dependiente de la cantidad de nieve que cae durante el invierno y se acumula en las altas cuencas. El otro condicionante es la temperatura que regula la velocidad de la fusión. El ciclo estacional de la temperatura se traduce en variaciones en la altura de la isoterma de 0°C. Por encima de esta línea imaginaria, la nieve no se derrite, pues no hay temperatura suficientemente elevada para fun-

dirla. El conocer la posición de esta isoterma permite estimar la superficie sobre la cual se realiza el proceso de acumulación y de ablación de la nieve. La fusión de la nieve acumulada produce las escorrentías con los mayores volúmenes durante los meses de primavera - verano.

■ DATOS CLIMÁTICOS:

Los datos climáticos no son particularmente abundantes en la región debido a que varias estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, por distintos motivos, han sido discontinuadas. Esta situación se observa especialmente en las estaciones que estaban ubicadas en la Cordillera de los Andes, en donde prácticamente no se encuentra al momento ninguna estación oficial en operaciones, con excepción de la Estación Meteorológica de Punta de Vacas en la cuenca del Río Mendoza. Este hecho obliga a utilizar fuentes de información provenientes de otras organizaciones y de países vecinos.

Por ejemplo, una buena estimación de la cantidad de precipitaciones en la Cordillera puede obtenerse analizando la serie de precipitaciones de Santiago de Chile, provistas por el Servicio Meteorológico de Chile. También se han utilizado con fines de comparación las series de radio-sondeos diarios de Quinteros (Chile) que proveen información sobre las variaciones de la altura de la isoterma de 0°C. Aunque en el presente no funcionan, las series de Temperatura y Precipitación media mensual de las Estaciones meteorológicas de Cristo Redentor y Puente del Inca del Servicio Meteorológico Nacional son de mucha utilidad para estimar gradientes y variabilidad de los fenómenos meteorológicos en la zona. En la región de los valles productivos, la cantidad de información es más abundante y se cuenta

con datos provenientes de distintos organismos, como el Servicio Meteorológico Nacional, el INTA y, en los últimos años, de la Dirección de Contingencias Climáticas de la Provincia de Mendoza.

■ LAS VARIACIONES DE LA TEMPERATURA

Las variaciones mes a mes de la temperatura son las responsables de las variaciones interanuales en la estacionalidad de los caudales que reproducen el ciclo anual. El conocimiento del ciclo anual de los caudales o hidrograma es muy importante ya que permite establecer y regular el manejo y el uso del agua tanto para consumo, irrigación o producción de hidro - electricidad.

Las variaciones de la temperatura en el invierno incrementan o reducen la superficie de las cuencas que reciben precipitación en forma de nieve, mientras que durante los meses de verano aumentan o disminuyen la superficie de las cuencas en las que se produce la ablación de la nieve acumulada durante el invierno.

Debido a la falta de datos en la región de la alta Cordillera, solo existen series de temperatura con datos incompletos y en series relativamente cortas.

No obstante, utilizando todos los datos disponibles es posible estimar las tendencias estacionales de la temperatura.

■ LA PRECIPITACIÓN Y SU VARIABILIDAD

Las nevadas que ocurren en el área presentan variaciones tanto en la cantidad de nieve como en el momento del año en que ocurren. El Departamento General de Irrigación de la provincia de Mendoza ha ins-

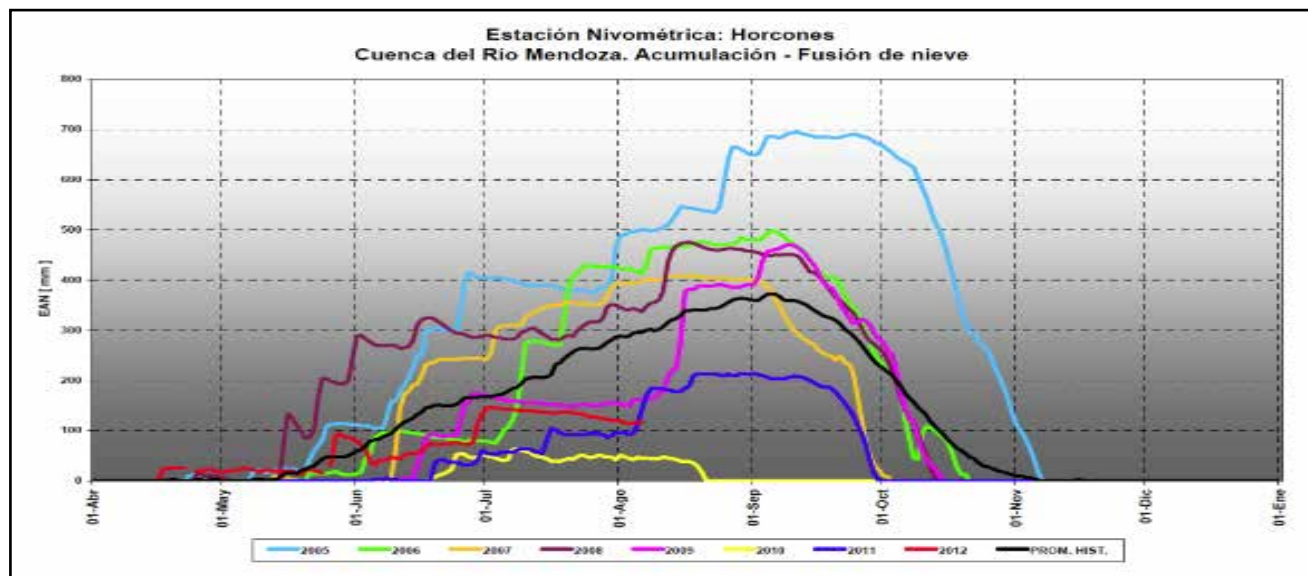


Figura 2: Acumulación anual de nieve medida en la estación Horcones. Se observa la existencia de un periodo de acumulación desde los primeros días de Mayo hasta finales de Septiembre en que comienza la fusión de la nieve. El proceso de fusión es bastante rápido a la altura de la estación medidora (3100 m s.n.m.) completándose a mediados de Noviembre. La nieve persiste a mayores alturas hasta el final del verano. También se observa la gran variabilidad anual de las nevadas. (Dirección de Gestión Hídrica 2012).

talado 6 estaciones meteorológicas con medición directa de la cantidad de nieve que están en funcionamiento desde el año 2000. Los datos se publican mensualmente en un boletín de la repartición, transformados a mm. equivalente agua. Si bien las series de estas estaciones son aún de pocos años de extensión temporal, permiten tener una estimación aproximada de la variabilidad temporal y espacial de las nevadas.

En la figura 2 puede observarse que la acumulación (en promedio de los últimos 5 años) comienza en los meses de abril-mayo y se extiende hasta mediados de setiembre, cuando los procesos de fusión prevalecen.

Sin embargo, se observa una gran variación anual tanto en la cantidad máxima de nieve acumulada (<100mm EAN hasta >700 mm EAN, donde EAN es la escala en mm que determina el Agua Equivalente Nieve) como en el momento de fusión (desde fines de agosto hasta principios de octubre). Debe señalarse que la precipitación en las altas cuencas es predominantemente invernal, desde abril a octubre. Durante los meses de verano, la cantidad de precipitación es sumamente escasa.

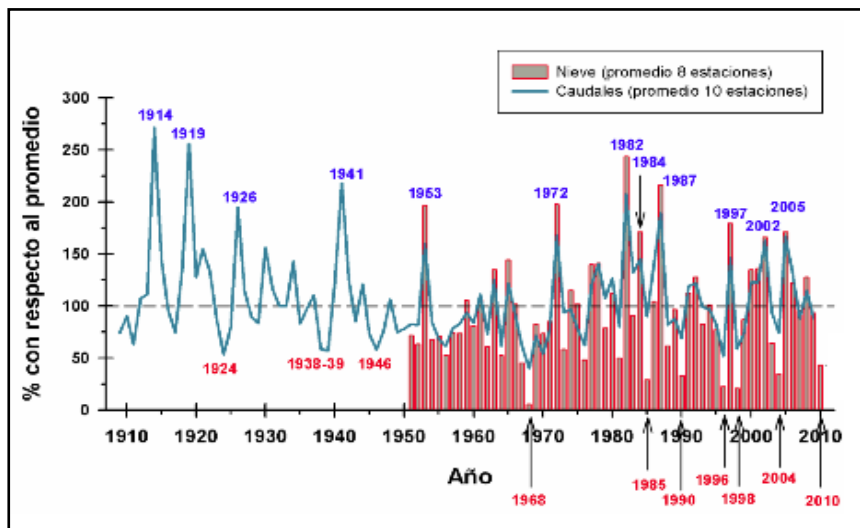


Figura 3: Promedio regional de carreras de nieve y caudal medio regional del periodo Noviembre-Febrero, expresados como % del equivalente agua del periodo base 1966-2000. El coeficiente de correlación entre las series es de $r = 0.945$ $p < 0.001$ (altamente significativa). AEN = agua equivalente nieve. Fuente: Masiokas et al (2010).

LA RELACIÓN PRECIPITACIÓN NIEVE – CAUDAL.

Existe una alta relación entre la cantidad de nieve caída en la estación invernal con los caudales emergentes del periodo estival (fig. 3). El coeficiente de correlación en-

tre estas series explica el 89% de la variancia.

La figura 3 también resulta ilustrativa de la gran variabilidad de la precipitación nival y de los caudales. Es interesante observar que la relación entre el caudal y las nevadas no es tan ajustada en los extremos, particularmente cuando el año es de escasa precipitación. En estos casos el caudal es algo mayor de lo esperado y no puede descartarse que este efecto sea el producto del aporte al caudal del derretimiento de los glaciares de la cuenca.

Las variaciones en las cantidades de nieve están relacionadas a fenómenos de circulación atmosférica y en particular al forzante conocido como El Niño - Oscilación del Sur (ENSO). En los años "Niño", con anomalías de temperatura positiva en el Pacífico Ecuatorial, la precipitación suele ser mayor que la media, mientras que durante los años "Niña" que presentan temperaturas por debajo de lo normal en el Pacífico Ecuatorial, la precipitación se ubica por debajo de los valores medios.

Sin embargo debe señalarse que existen otros mecanismos capaces de incrementar la precipitación de nieve, de manera que las nevadas abundantes no se producen exclusivamente durante el Niño.

■ LOS GLACIARES COMO RESERVA HÍDRICA

En los sectores más elevados y protegidos de la radiación solar, la nieve persiste de un año para el siguiente y forma con el tiempo cuerpos de hielo.

Dependiendo de las variaciones anuales de la precipitación nival, de la temperatura y de la topografía, los glaciares aumentan su masa con los

años de nevadas invernales abundantes, mientras que sus volúmenes se reducen en los años secos.

Estos cuerpos de hielo y sus fluctuaciones son un indicador a largo plazo de las variaciones climáticas ocurridas en la cuenca. Con su movimiento los glaciares dejan distintas evidencias de su paso que, pueden ser fechadas usando técnicas apropiadas, constituyen un registro de las condiciones ambientales del pasado.

En la región de Cuyo, así como en la mayoría de las montañas del mundo, se observa una sostenida

disminución de los glaciares cuyo retroceso se manifiesta por lo menos desde principios del Siglo XX. Un ejemplo muy ilustrativo es el retroceso experimentado por el Glaciar del Humo de la cuenca superior del Río Atuel (Foto 1).

Estudios realizados en la vertiente oeste (Chile) han permitido estimar que el retroceso de algunos glaciares en la cuenca del Río Cachapoal comenzó probablemente a mediados del siglo XIX y ha continuado hasta el presente aunque, probablemente, con algunos episodios de avances durante épocas de mayor precipitación (fig. 4).



Foto 1 a y b: Glaciar del Humo, Cuenca del Río Atuel. La foto superior (a) fue tomada en 1914 por W. Von Fischer, y la inferior (b) en 1982 por Daniel R. Cobos. (Cobos and Boninsegna, 1984).

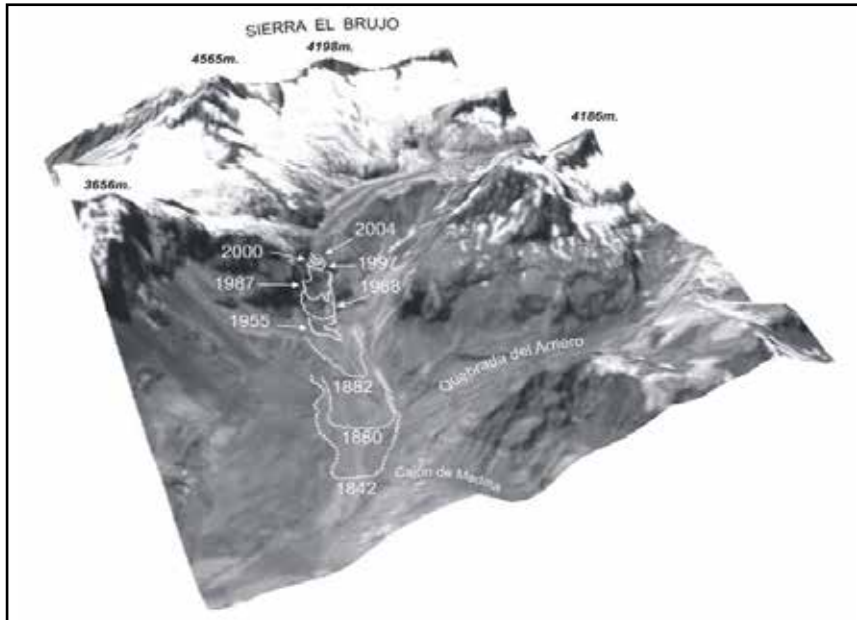


Figura 4: Fechas estimadas de las posiciones frontales del Glaciar Cipreses en la cuenca del río Cachapoal, Chile, reconstruidas mediante documentos históricos, iconografías, fotografías aéreas e imágenes satelitales (Lequesne et al 2009).

nuyendo en forma acelerada. (Lascano y Villalba, 2007)

Este fenómeno llevó al Parlamento argentino y al Poder Ejecutivo a discutir y promulgar la Ley Nacional de Protección de los Glaciares en el año 2010, cuyo espíritu es evitar acciones antrópicas que puedan alterar el balance de los glaciares y contribuir a su disminución.

Más allá de las complejidades de toda ley, es importante destacar que en su Artículo 1 la ley define a los glaciares como “bienes públicos” y por lo tanto pertenecen a toda la sociedad. Además la ley establece la necesidad de realizar un inventario de los cuerpos y del hielo de la Nación para conocer la situación de la reserva hídrica que los glaciares significan. Este inventario debe ser

El marcado retroceso que se observa es en realidad el producto de balances de masa negativos. La determinación del balance de masas es muy compleja, requiere de varios años de mediciones y de una logística para operar en condiciones bastante extremas. En la cuenca del Río Mendoza, se eligió un glaciar representativo de la región, el llamado “glaciar Piloto” en el Cajón del Rubio (cuenca del Río Mendoza) y se han realizado mediciones desde el año 1979. Los resultados muestran que el balance de masa acumulado es altamente negativo (fig. 5).

Las poblaciones y las actividades socio-económicas de los oasis de Mendoza y San Juan han subsistido y subsisten gracias a las precipitaciones nivales. Sin embargo, las masas de hielo constituyen una reserva de agua, cuya importancia crece en años de escasas precipitaciones nivales. Debido a las observaciones que indican un derretimiento de los glaciares en toda la Cordillera, las reservas de agua dulce están dismi-

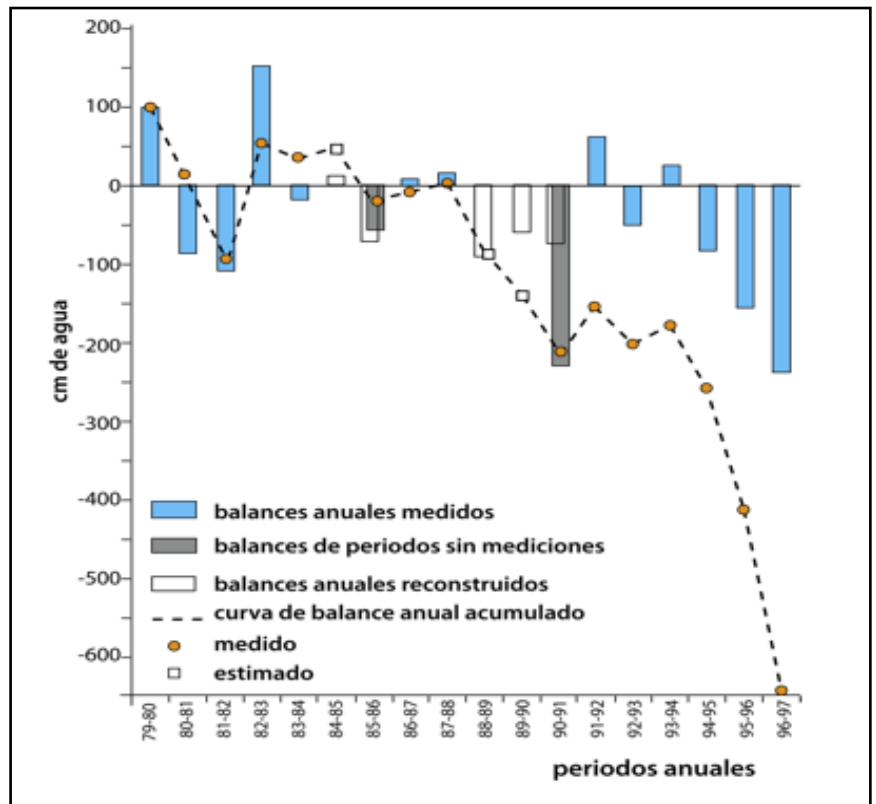


Figura 5: Balance de masa del Glaciar Piloto desde 1979 (Leiva, 1999). La búsqueda de datos de fuentes documentales combinadas con otras técnicas de análisis paleo-climático han permitido establecer que el comportamiento de la mayoría de los glaciares de la Cordillera Central, tanto en la vertiente Argentina como en la Chilena, es similar al observado en el glaciar Piloto.

repetido cada cinco años para determinar la evolución de los mismos.

El Instituto de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) del CONICET es la institución a quien la ley encarga la coordinación de la realización de este inventario. El trabajo se está ejecutando en todo el territorio de la Nación y en particular en la región de Cuyo se encuentra muy avanzado. En la provincia de San Juan está terminado y en etapa de revisión, en la provincia de Mendoza se encuentra terminado y revisado para la cuenca del Río Mendoza y terminado en etapa de revisión en el resto de las cuencas provinciales. Tan pronto se terminen las etapas de revisión, los resultados serán publicados.

En un inventario realizado anteriormente por miembros del IANIGLA, se tuvieron en cuenta tres tipos de glaciares, los descubiertos (con hielo desnudo), los glaciares de escombros (el hielo se encuentra cubierto por detrito) y las morenas con núcleo de hielo.

Los valores de dicho inventario datan de los años 1978 – 1981, y para la cuenca del Río San Juan se estimaron 556,02 km² cubiertos por glaciares; para el Río Mendoza 664,34 km², para el Río Tunuyán 145,08 km², para el Río Atuel

186,32 km², y para el Río Malargüe 12,34km². El total estimado para la región cuyana alcanzaba a los 1564,10 km² de los cuales corresponde un 48% a hielo descubierto y un 52% a hielo cubierto. (Bottero, 2002).

■ LA VARIABILIDAD DE LOS CAUDALES

Tal como se ha señalado, la variabilidad de los caudales emergentes en los ríos de la Región Cuyana depende fundamentalmente de la cantidad de precipitación nival caída durante el invierno. Otros factores como la temperatura, la topografía de la cuenca (altura y exposición relativa) y su extensión pueden hacer que el hidrograma de un río presente los máximos y los mínimos de caudales en fechas diferentes de otro río cercano (Lascano y Villalba, 2005).

Sin embargo, la tendencia al aumento de la temperatura está alterando el hidrograma de los ríos andinos ya que el proceso de fusión de la nieve comienza más temprano, incrementando el caudal en los meses de primavera, con el pico máximo que se traslada más temprano en el ciclo hidrológico y la disminución de los caudales de verano por agotamiento de la masa de nieve de ablación (fig. 6).

Esta alteración en la distribución anual de los caudales puede tener un alto impacto en la distribución del agua para riego y en el manejo de las presas para generar hidroelectricidad

■ EL CLIMA EN LOS VALLES PRODUCTIVOS:

Los valles de Mendoza y San Juan, al pie de la Cordillera, albergan la mayoría de las actividades productivas. En ellos prevalece un clima mediterráneo, con inviernos con heladas en ocasiones severas y veranos prolongados y calurosos, con precipitaciones frecuentemente intensas, de corta duración, producto de tormentas convectivas, con ocasional caída de granizo. Es un clima de gran variabilidad, con tendencia de la temperatura y de la precipitación de verano a incrementarse (fig. 7 y fig. 8). Esta precipitación estival ha aumentado durante las últimas décadas en forma significativa, si bien por una parte incrementa los riesgos de granizo y de enfermedades criptogámicas, por otro constituye un aporte de agua que puede aliviar condiciones de sequía. La existencia de una amplitud térmica notable es altamente favorable para asegurar la calidad de algunos cultivos como el de la vid.

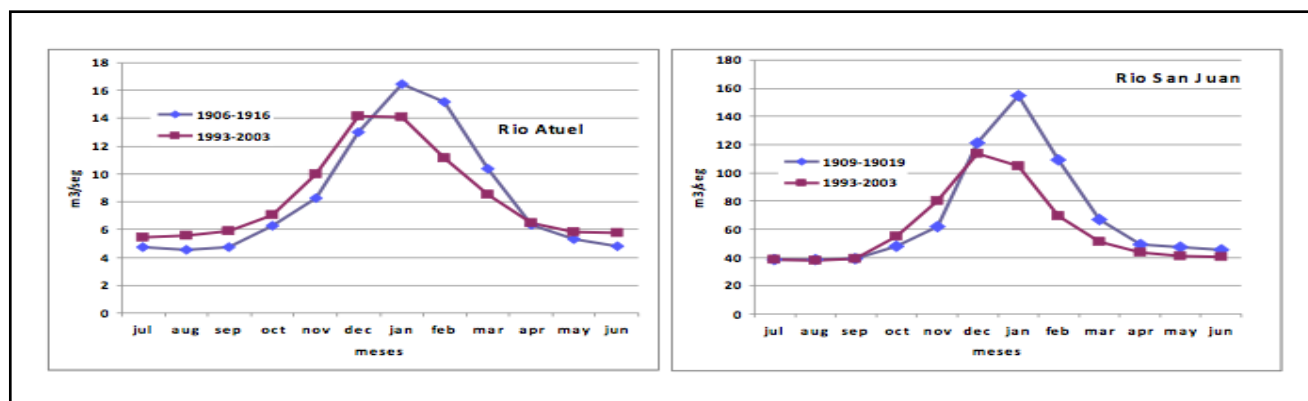


Figura 6: Módulos medios de los ríos Atuel y San Juan para dos décadas, una a principios del registro instrumental y la otra a comienzos de este siglo. Se observa claramente la modificación del hidrograma medio.

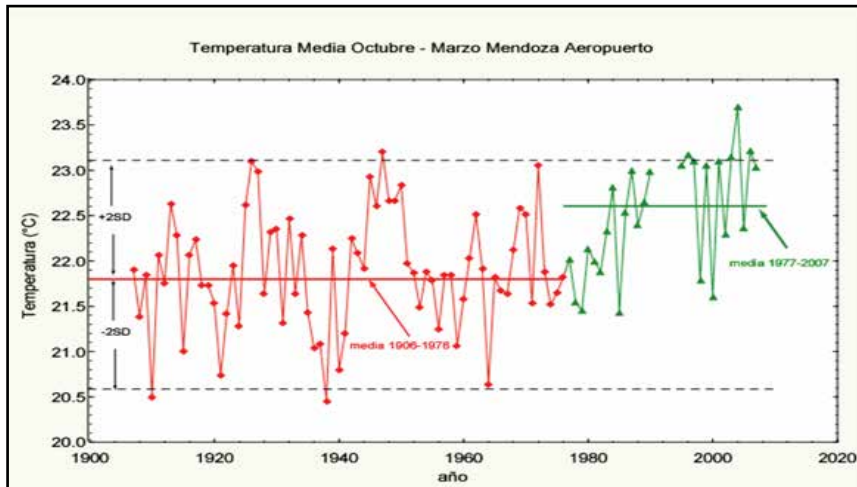


Figura 7: Temperatura media de primavera-verano en Mendoza. Se observa un incremento notable luego de 1976. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

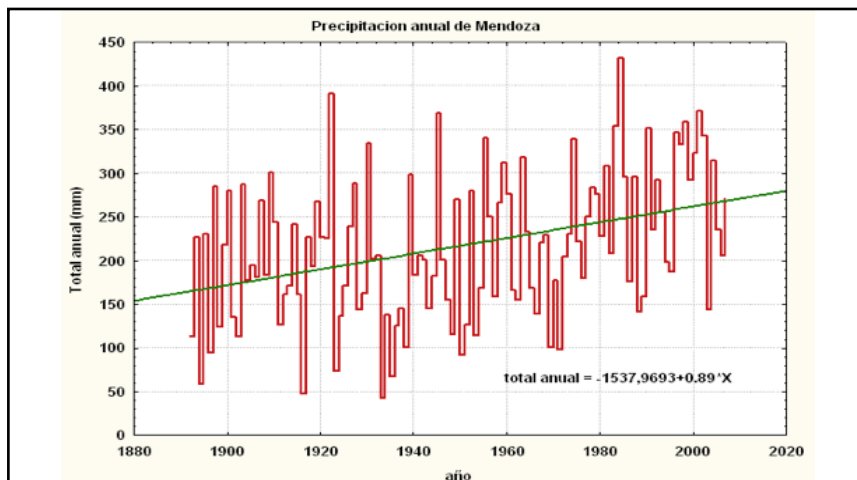


Figura 8: En Mendoza, la precipitación se produce en el verano y representa el 85% del total. Se observa su alta variabilidad y una tendencia significativa a aumentar. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

■ LOS PRONÓSTICOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA REGIÓN:

Para evaluar el comportamiento de estas tendencias en la variabilidad de las precipitaciones, de la temperatura, de los caudales erogados por los ríos y del hidrograma anual frente a escenarios de Cambio Climático resultan apropiados los modelos de circulación general y, en especial, las versiones regionales de más alta resolución.

Estos modelos permiten evaluar

escenarios futuros en donde se pueden construir hipótesis sobre la influencia de distintos factores sobre el clima. Por ejemplo, se pueden analizar los valores de las variables climatológicas en un futuro con concentraciones mayores de CO₂, con cambios en el uso del suelo, etc. También se puede estudiar el posible comportamiento de valores extremos y evaluar los impactos futuros sobre los cultivos de los oasis.

Existen en la actualidad numerosos modelos de circulación general, con mayor o menor grado de sofis-

ticación, sin embargo, enfrentan el problema de describir adecuadamente las regiones montañosas, en donde existen fuertes variaciones del relieve en pocos kilómetros.

Para aumentar la resolución espacial se están utilizando los llamados “modelos regionales” que se enfocan sobre una región determinada haciendo uso de salidas de modelos generales. La resolución de estos modelos alcanza a grillas de 0.25° x 0.25° grados de latitud – longitud (aproximadamente 25 x 25 kilómetros).

Para la zona de los oasis del centro-oeste argentino, se dispone de salidas del Modelo PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies), una de ellas elaborada por INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Pablo, Brazil) (Marengo et al, 2009), otra realizada por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (Conama, 2006) y una provista por el Centro de Investigaciones del Mar y de la Atmósfera (CIMA – CONICET – UBA) elaborada con el modelo MM5 (Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model) (Nuñez, 2006; Nuñez y Solman, 2006).

Las simulaciones de los modelos se comparan con el clima observado durante un periodo común o “línea base” y se corrigen las desviaciones sistemáticas de los valores entre el modelo y los datos observados. La proyección del clima hacia el futuro se realiza bajo distintos escenarios de cambio, tales como mayor o menor emisión de gases de efecto invernadero, implementación de medidas de mitigación, etc. Estos escenarios han sido propuestos por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) para analizar una amplia variedad de situaciones posibles derivadas del cambio climático en distintos horizontes temporales.

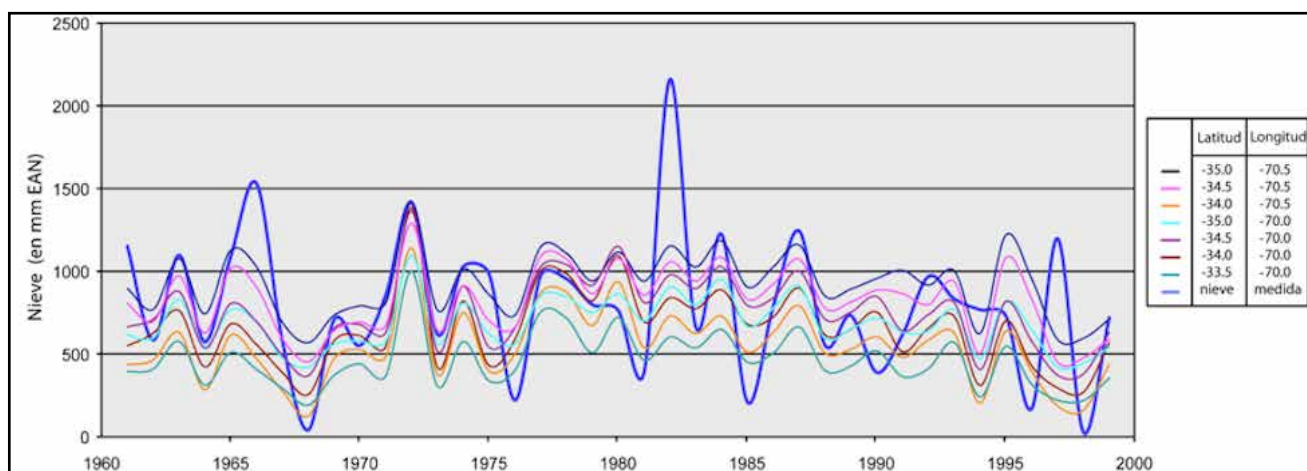


Figura 9: Relación entre la cantidad de nieve caída en la estación Valle Hermoso con las precipitaciones estimadas por el modelo PRECIS (INPE).

Uno de los escenarios más empleados es el A2 que considera una proyección heterogénea del mundo, en donde continuará el aumento de la población mundial, el desarrollo económico estará fuertemente marcado por sesgos regionales y los cambios tecnológicos serán fragmentados, de evolución lenta. En este contexto se prevé una emisión de CO₂ 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 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).

El uso de los modelos mencionados, permiten realizar una estimación de los posibles impactos del cambio climático en la oferta hídrica, en los condicionantes derivados del aumento de la temperatura y de los cambios en el hidrograma. Estas estimaciones deberían permitir imaginar posibles modos de disminuir la vulnerabilidad de los oasis, imple-

mentando medidas de adaptación.

La factibilidad de emplear los modelos debe verificarse conociendo cuán bien el modelo representa al clima actual y a los caudales.

Para contestar a la pregunta ¿cuán bien representan los datos estimados por el modelo a la precipitación de nieve?, se estableció la relación entre los datos de la nieve medida con la precipitación anual estimada por el modelo (fig.9). En este caso se lo ejemplifica para la cuenca del Río Atuel utilizando los datos de caída de nieve de la estación Valle Hermoso y varios puntos de la grilla que

caen sobre dicha cuenca.

Se observa una buena relación aunque la variabilidad de los datos estimados es menor que la de la serie medida.

Otra pregunta importante de responder es: ¿cuán bien representa la precipitación estimada por el modelo a los caudales emergentes medidos en la estación de aforo de la cuenca? En este caso, el ejemplo se refiere a la cuenca del Río Diamante y se relaciona la precipitación calculada por el modelo con los caudales

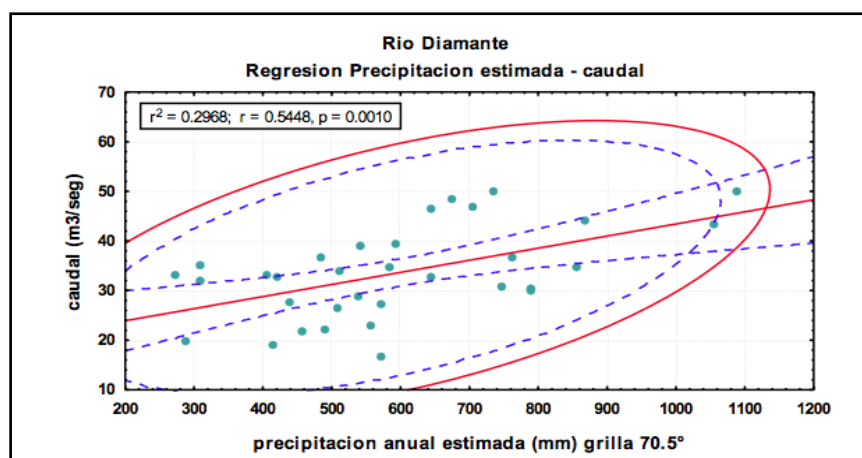


Figura 10: Relación entre la precipitación estimada por el modelo y el caudal medido del río Diamante. La correlación es altamente significativa e indica que el modelo permite representar en forma adecuada los caudales.

La correlación entre los datos del modelo y los caudales para el periodo base 1961-1990, resultó significativa para cada uno de los ríos, por lo que se establecieron entonces las respectivas ecuaciones de regresión que permitieron la estimación de los caudales futuros (fig. 10).

Los tres modelos analizados presentan un comportamiento muy similar y establecen una reducción de los volúmenes erogados

La disminución de los caudales en porcentaje varía de acuerdo a la cuenca que se considere, la del Río San Juan, ubicada más al norte, es la que tendría una mayor disminución: de aproximadamente el 21% con respecto al presente, la del Mendoza el 12%, el Tunuyán casi sin cambio, el Diamante 19% y el Atuel 15% para los modelos PRECIS y algo más extremo para el modelo MM5 (fig.11).

La figura 12 representa la variabilidad de las precipitaciones, tanto del presente como la estimada por los modelos. Se observa que recién hacia fines del presente siglo, la precipitación estaría por debajo de una desviación estándar y comenzaría a ser significativa. Es interesante notar que la disminución de la precipitación alcanzaría valores entre un 20 a un 25% menores a los actuales que son coherentes con los valores pronosticados de la disminución en los caudales (ver figura 11).

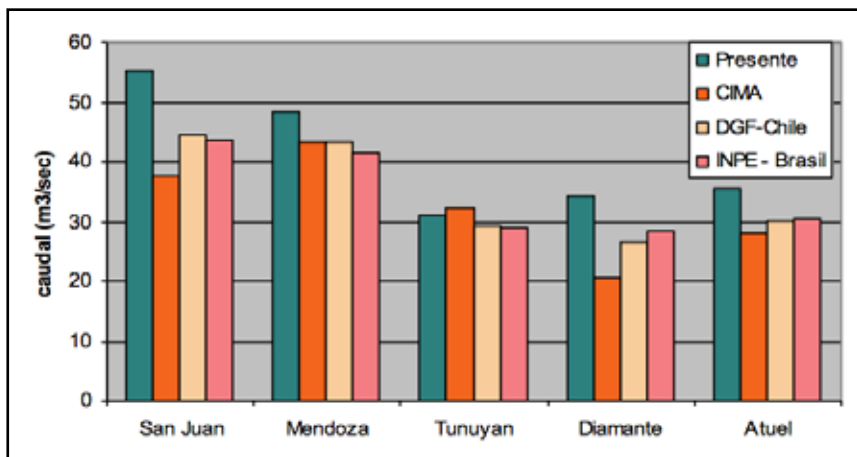


Figura 11: La estimación de los caudales futuros hecha por los tres modelos. El periodo de la línea base es 1961-1990, y la ventana temporal proyectada para los modelos PRECIS (DGF e INPE) es 2071-2100 y para el modelo MM5 (CIMA) es 2081-2090.

■ EL FUTURO DE LOS GLACIARES Y DE LA NIEVE

Se ha señalado que uno de los "síntomas" más visibles de que algo está cambiando en la Cordillera es la retracción de los glaciares. Esta retracción puede ser causada por aumento de la temperatura, por disminución de las nevadas o por el efecto conjunto de ambos fenómenos. En todo caso juega un papel muy importante la posición de la isoterma de 0°C.

La fusión de la nieve depende de que se alcancen temperaturas superiores a los 0°C, por lo que la altura de la isoterma de 0°C indica la región por encima de la cual no habrá fusión, mientras que por debajo de esta cota, tendrá energía suficiente para transformar la nieve en agua líquida. Además, separa la región en donde cae precipitación líquida de donde nieva y en donde los suelos permanecen congelados. 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.

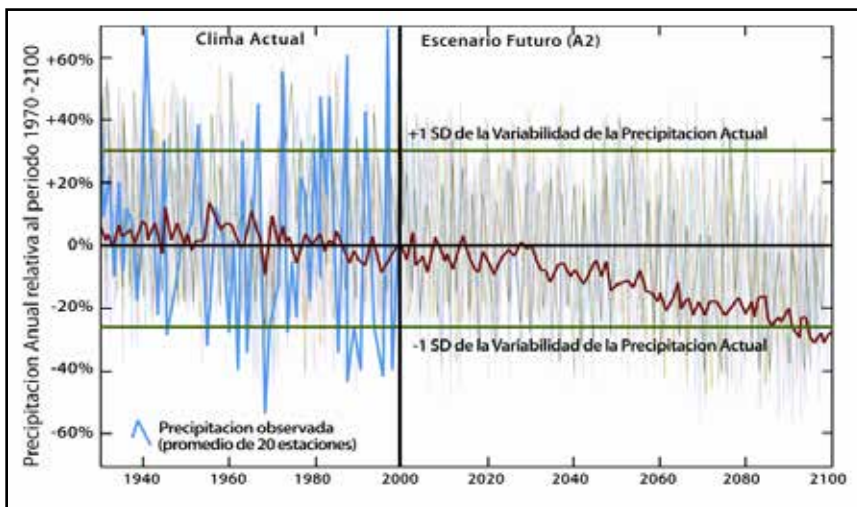


Figura 12: La variabilidad de las precipitaciones (clima actual en línea azul) es reproducida por los modelos (líneas finas). En este gráfico se presenta el resultado de 21 modelos y la línea roja es la media de la estimación dada por los modelos en cada punto (Falvey, 2007).

La máxima altura alcanzada por la línea de 0° permite estimar la zona en donde la nieve es perma-

nente y en donde su acumulación y transformación en hielo permite la existencia de glaciares.

El uso de los modelos regionales permite estimar los movimientos de la línea de 0°C y, combinados con la representación de la superficie de la montaña mediante modelos digitales de elevación, evaluar la superficie de almacenamiento para distintos meses del año y para ventanas temporales futuras.

La proporción de la disminución de las superficies de almacenaje es distinta para cada cuenca ya que hay diferencias topográficas entre ellas, tanto en su latitud como en su altura y en su superficie total.

Así, las cuencas ubicadas al norte de la región (Jáchal, San Juan, Mendoza y Tunuyán) que poseen mayor altura media presentan variaciones en los porcentajes de superficie so-

bre 0°C para la década 2020-30 cercanos a menos un 17%.

En las cuencas ubicadas hacia el sur, esta proporción es notablemente mayor en el verano, dado que las cuencas tienen menor altura. Así, por ejemplo, la cuenca del Diamante es relativamente baja, con pocos cerros con alturas superiores a los 4800mts por lo que no existen muchos glaciares.

En la actualidad, durante el invierno el 72% de la cuenca está en la zona con temperaturas menores a 0°C; para la década del 2021-2030, esta proporción descendería al 64% y para la década del 2091-2100 alcanzaría a solo el 46%. Durante el verano, en la actualidad la superficie en donde se mantiene la nieve es del 6%, se estima para el 2021-30 en 2.5% y para el 2080-2100 en apenas un 0.1%, prácticamente no habrá superficie capaz de mantener

nieve de un año para otro.

La reducción de las superficies captadoras afectará necesariamente el balance de los glaciares, acentuando la disminución y de continuar esta tendencia desaparecerán.

■ EL IMPACTO EN EL OASIS

Los modelos regionales permiten realizar estimaciones sobre la probable evolución de los parámetros climáticos en los valles productivos y, teniendo en cuenta los requerimientos de los cultivos en cuanto a temperatura y precipitación, estimar posibles impactos en el rendimiento y calidad de los cultivos.

Como un ejemplo, la figura 14 muestra la evolución de la precipitación en la provincia de Mendoza según el modelo PRECIS (INPE) para el escenario A2

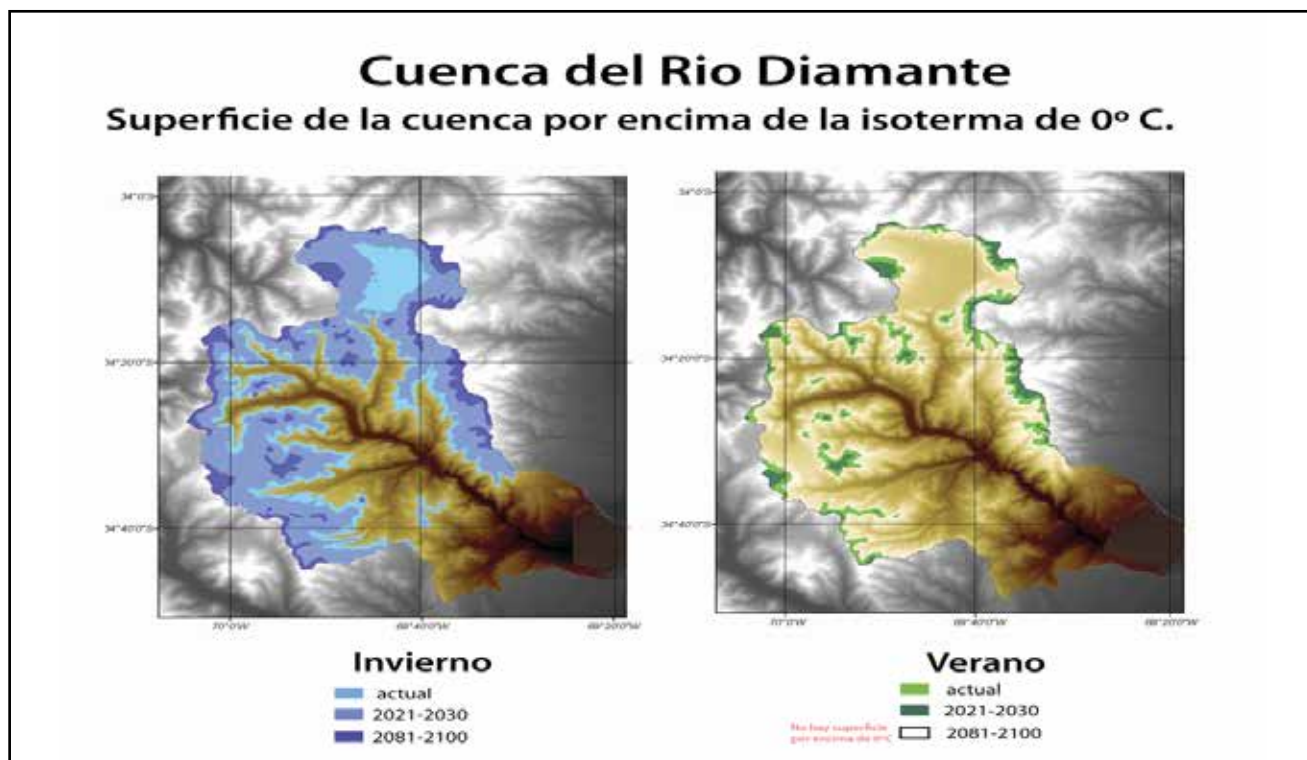


Figura 13: Sobre una imagen satelital se ha superpuesto la posición de la línea de 0°C que define la superficie de almacenamiento de nieve. Esta línea, proyectada al futuro mediante los modelos de circulación, indica que en los veranos del periodo 2081-2100, superará la altura de los picos de la cuenca por lo que no habrá almacenaje de nieve de un año para el otro. (Boninsegna y Villalba, 2006b)

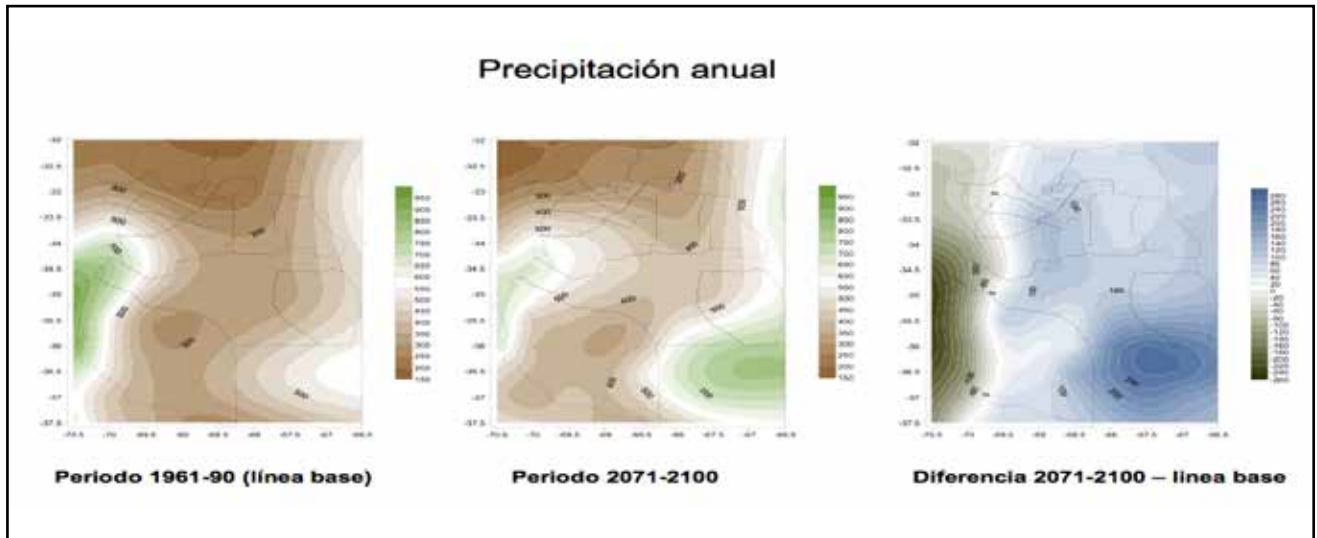


Figura 14: Estimación de la precipitación en la provincia de Mendoza según el Modelo PRECIS (INPE). Se muestra la línea base considerando el periodo entre 1961 y 1990 (treinta años) y el periodo 2071-2100. La figura a la extrema derecha indica la diferencia entre los valores del periodo futuro y la línea base. Se observa claramente que mientras se predice una disminución de la precipitación en la montaña, en el llano los valores se incrementan significativamente.

■ DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La región de los oasis del centro-oeste de Argentina con una concentración de las actividades productivas y de la población en poco más del 3.5% de su territorio, está fuertemente condicionada por la oferta hídrica que obra como factor limitante de su expansión. Teniendo en cuenta las observaciones de las tendencias del clima actual y las predicciones del cambio climático, el aumento de la temperatura y la disminución de la oferta hídrica, acentuarán más dicha dependencia.

Para disminuir la vulnerabilidad frente a estos cambios, se requiere la implementación de medidas de adaptación y para ello es necesario un conocimiento preciso del funcionamiento del ciclo hidrológico y de sus condicionantes.

Se puede afirmar que:

- 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.

- La variabilidad de las nevadas es muy alta, con años de abundancia y años de escasez, aunque para la región su tendencia es a disminuir. Los periodos de mayor precipitación coinciden con situaciones particulares de la circulación atmosférica, como el fenómeno de El Niño.

- Los glaciares de la región muestran una retracción generalizada de sus frentes y mediciones de mayor precisión indican la pérdida de una importante masa de hielo. Estos cambios son coherentes con el aumento de la temperatura observado y pronosticado por los modelos de cambio climático.

- El aumento de la temperatura está

alterando el hidrograma de los ríos porque la nieve comienza a fundir más temprano de modo que los caudales máximos anuales se adelantan más de un mes y disminuyen durante los meses de verano debido a que se agota la carga de nieve. Este proceso tiene implicancia en el manejo del agua para irrigación y para las presas de hidroelectricidad.

- En los valles, a diferencia de la montaña, se observa mayor cantidad de precipitación en el verano, con ocasional caída de granizo. También se observa incremento de la temperatura. La mayor precipitación en el verano, aunque en alguna medida aumenta la incidencia de enfermedades criptogámicas, puede paliar condiciones de sequía y debería ser tomada en cuenta al considerar medidas de adaptación.

- Los modelos de simulación empleados muestran cambios importantes en la precipitación y la temperatura para los escenarios climáticos futuros, estos cambios

se acentúan notablemente hacia el final del presente siglo.

-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 San Juan y Mendoza y menor en relación a los caudales medios actuales en los ríos Tunuyán, Diamante y Atuel.

- La estimación por los modelos de la posición de la isoterma 0°C indica una disminución de la superficie de acumulación de nieve en el invierno y de la superficie que permite la permanencia de nieve en el verano. Las cuencas más afectadas serán las cuencas ubicadas hacia el sur de la región por ser las cuencas más bajas, en las cuales la disminución de las superficies mencionadas alcanza a porcentajes entre 75 y 80% para fines de este siglo con respecto a las superficies actuales.

- Una consecuencia será 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 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.

Estas consideraciones permiten imaginar cuales serían las medidas de adaptación que podrían ser im-

plementadas y sus características.

En general, estas medidas para ser efectivas deben ser acompañadas con una concientización y educación de la población acerca del valor del recurso hídrico, de manera que su conservación y buen uso se transforme en una cuestión de moral pública. A partir de allí, existen medidas recomendables que van desde el ahorro de agua en las actividades domésticas, en el aumento de la eficiencia del riego en fincas hasta en el uso de especies ornamentales de menor requerimiento hídrico para jardines. A su vez, la gobernanza debe asumir sus responsabilidades al hacer más eficiente el manejo del agua, tanto en la red de distribución con fines de regadío, (impermeabilización o entubamiento de cauces) como en la red de distribución del agua potable.

Es deseable además desarrollar tecnologías que permitan aumentar la prevención a contingencias, como ciclos de sequía, cuya ocurrencia es de alta probabilidad..

Por ejemplo, los modelos indican que la variabilidad de las nevadas y de los caudales continuará siendo muy elevada. Esto significa que habrá años de mayor cantidad de nieve y otros de escasez, y que estos últimos serán cada vez mas frecuentes. Como la temperatura fundirá más rápidamente la nieve, el contar con sistemas de almacenamiento (diques) y/o tecnología que permita la recarga de acuíferos en los años de abundancia sería muy positivo. Asimismo teniendo en cuenta que la precipitación en el llano se incrementa y que solo el 3.5% de superficie esta bajo irrigación, se podrían idear sistemas que permitan captar y redistribuir esta agua.

Todas las medidas de adaptación deberían ser realistas y de fácil apli-

cación por la sociedad y la gobernanza con el propósito de minimizar los riesgos del cambio climático y de potenciar las ventajas relativas de la región.

Es responsabilidad del sistema científico – tecnológico del país, ayudar a instalar el tema del cambio climático en la agenda pública, facilitando su discusión y ayudando a los tomadores de decisión a comprender y enfrentar la magnitud del problema.

■ REFERENCIAS

- Boninsegna, J. y R. Villalba (2006a). 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 Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación*. 19pp.
- Boninsegna, J. y R. Villalba (2006b). Los Escenarios de Cambio Climático y el impacto en los Caudales. Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan. *Segundo informe a la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación*. 19pp.
- Bottero, R. (2002) Inventario de Glaciares de Mendoza y San Juan. In: Trombotto, D. and R. Villalba (eds.), (2002). IANIGLA, 30 Years of Basic and Applied Research on Environmental Sciences. Zeta Editores, Mendoza, Argentina, pp. 165 -169.
- Cobos, D. R and J. Boninsegna, (1983). Fluctuations of some glaciers in the upper Atuel river basin, Mendoza, Argentina. *Quaternary of South América and Antarctic Peninsula* 1:61-82.

- CONAMA (2006) Estudio de la variabilidad climática de Chile para el siglo XXI. Informe Final. *Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile*. 71p
- Dirección de Gestión Hídrica, (2012). Boletín Hidrometeorológico Junio 2012. *Departamento de Evaluación de Recursos Hídricos*. Departamento General de Irrigación, Pcia de Mendoza.
- Falvey, M. (2007). Modelación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos de Chile. *Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile*. 4º Taller de Circulación Oceánica y Atmosférica de la región del Pacífico Sureste. 18 de Octubre 2007, Santiago, Chile.
- 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. E., Villalba, R., (2005). Impacto del calentamiento regional sobre el régimen de los ríos de alimentación nival en la Argentina. XX Congreso Nacional del Agua (CONAGUA2005), Mendoza, Argentina. 16 pág. (CD).
- Lascano, M.E., Villalba, R. (2007). Algunas precisiones sobre el rol de los glaciares en el escurrimiento andino. XXI Congreso Nacional del Agua (CONAGUA2007), Tucumán, Argentina. 17 pág. (CD).
- Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J., Rivera, A., Barichivich, J. (2009) Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 281: 234-244
- Leiva, J.C., (1999): Recent fluctuations of the Argentinian glaciers. *Global Planet.Change*, 22, 169-177.
- Marengo, J., Jones, R., Alves L. M., Valverde, M. C. (2009). Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system *Int. J. Climatol.* 29: 2241–2255
- Masiokas, M.H., Villalba, R., Luckman, B., Mauget, S. (2010). Intra- to Multidecadal Variations of Snowpack and Streamflow Records in the Andes of Chile and Argentina between 30° and 37°S. *Journal of Hydrometeorology*, 11: 822-831.
- Nuñez, 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. *Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable*. 22pp.
- Nuñez, M., Solman, S. (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.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos, (2004). Estadística Hidrológica de la Republica Argentina, *Secretaría de Obras Públicas*. Edición digital ISBN:987-98869-3-3 .