

Cuenca del Río Limarí, Chile Semiárido: Aspectos de la Oferta y Demanda de Agua

FRANCISCO J. FERRANDO A.¹

RESUMEN

En la región semiárida de Chile, producto del aprovechamiento de las ventajas comparativas del comercio internacional, la relación oferta-demanda de agua está sufriendo un fuerte desequilibrio que atenta contra la sostenibilidad del modelo exportador. Por una parte, la demanda de agua se incrementa progresivamente; por otra y considerando las tendencias del cambio climático, la oferta del recurso hídrico parece reducirse. Ante este déficit, es menester un cabal conocimiento de las disponibilidades de este recurso y su variabilidad.

Consustancialmente, llama la atención que los tres sistemas hidrológicos principales sean capaces de mantener escurrimiento perenne, incluso durante períodos de sequía. Ello lleva a plantearse la existencia de recursos subterráneos, tanto en acuíferos como en formas de permafrost. Estas últimas sólo recientemente han estado siendo evaluadas como fuentes de aporte constante a los cursos fluviales y embalses de riego como a las vegas de altura.

ABSTRACT

In the semiarid region of Chile, how result of primary economical group products exportation increasing, the water offer-demand relation is in a light equilibrium situation, bringing instability to the exporter model. By one hand, the water demand is progressively increasing. On the other hand and according to climatic tendencies, a decreasing of the water resource offer is happen. Because this situation seems necessary a complete knowledge about the water resources availability and variability at this region.

Consustancially, a highlight situation occur with the register of perennial run off at the three principal river systems, even during droughts. This antecedent brings to think about the existence of underground water resources in aquifers as well as in permafrost forms, who are been evaluated has water source just in the last few years. Is not possible to refuse his permanent water contribution to superficial run off, to irrigation dams and to the Andean swamps.

Palabras clave: *Oferta-Demanda hídrica / Tendencias climáticas / Permafrost.*

Key words: *Water offer-demand / Climatic tendencies / Permafrost.*

¹ Geógrafo, Departamento de Geografía, Universidad de Chile.

Producto de las condiciones climáticas de la Región Semiárida de Chile (27°00' – 33°00'), desde los primeros años de la colonización española comenzaron a construirse sistemas de riego para manejar el escaso recurso hídrico disponible. Obras mayores se iniciaron luego de la dictación de la Ley 4.445 en 1928. Como resultado, en la cuenca del Río Limarí (11.750 Km²), se construyeron los embalses Recoleta, La Paloma y Cogotí, los cuales permitieron una adecuada regulación y manejo del recurso hasta que, como resultado del desarrollo de un modelo económico con vocación exportadora, comenzó a provocarse un desequilibrio entre la oferta y la demanda de agua.

Paralelamente, los estudios climáticos han revelado tendencias que vienen a favorecer el proceso de desertificación, lo que ha agudizado el problema en las últimas décadas. Las curvas de reducción de la precipitación, la ocurrencia de episodios de sequía y el incremento de las temperaturas no dejan lugar a dudas de ello. Incluso algunos estudios concluyen que ya se ha alcanzado la máxima capacidad del recurso hídrico, aun a pesar de la introducción de sistemas de riego que permiten una buena economía de éste.

Las múltiples evidencias abogan por un cambio climático regional que se corresponde claramente con la directriz del cambio climático global, lo que lleva a un decrecimiento en los volúmenes de agua disponibles. Por otro lado, se asiste a un crecimiento sostenido de las áreas sembradas que requieren riego, principalmente de uva de mesa para exportación. Estas condiciones plantean un escenario que entra en franca contradicción con la sostenibilidad del modelo económico.

A lo anterior se suma el mal uso de los recursos y la expoliación de la cobertura vegetal de la media montaña por el hombre y su ganado, principalmente caprino, lo cual aúna desertización (en tanto proceso natural) con desertificación, proceso derivado de inadecuadas prácticas antrópicas.

En este escenario de doble origen, se evidencian algunos signos que pueden interpretarse como positivos en términos de recursos hídricos. El registro de escurrimientos permanentes de los tres ríos principales (Elqui, Limarí y Choapa) no sólo durante los largos veranos (estación seca),

sino también durante los períodos de sequía, parece indicar la existencia de almacenamientos subterráneos de importancia en los acuíferos alto andinos, así como también en forma sólida, es decir, presencia de hielo en el subsuelo o, en otras palabras, existencia de permafrost.

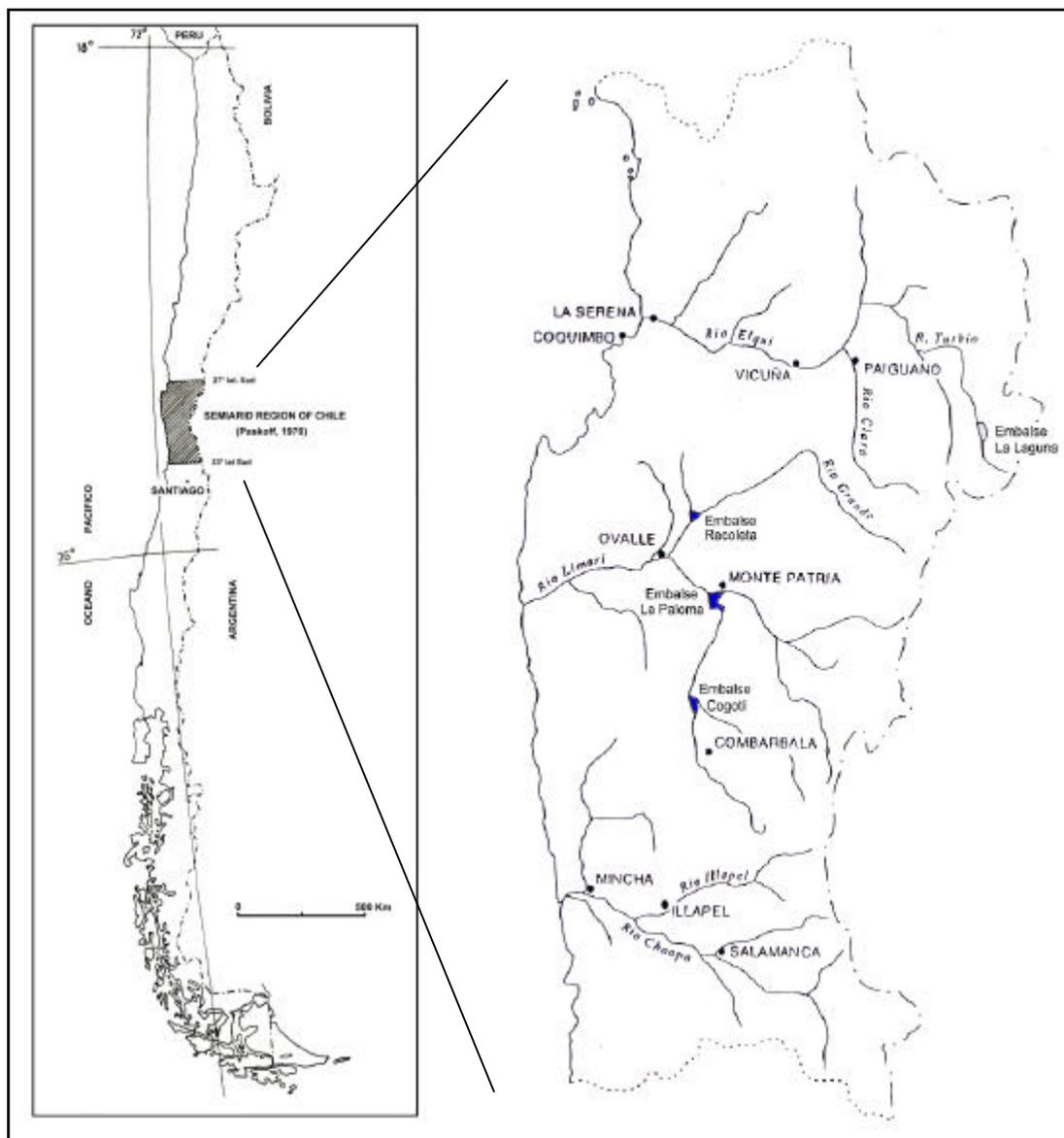
Los registros de temperaturas y las variaciones altimétricas de la línea de nieves estacionales, tanto en solana como en umbría, refuerzan la existencia de condiciones apropiadas para la presencia de formas de permafrost, como es el caso de los glaciares rocosos.

La existencia de glaciares rocosos, aunque bien conocida, sólo recientemente está siendo objeto de estudio en la Región. A la fecha y a nivel local, en la cuenca superior del Río Limarí se han reconocido y analizado morfológicamente diversos tipos de ellos, los cuales están en proceso de determinaciones respecto de los volúmenes almacenados, la variabilidad de los mismos, los mecanismos de alimentación y ablación, y la relación de los caudales producidos con las características de las precipitaciones y las temperaturas.

Área de Estudio

En Chile, la IV Región de Coquimbo, conocida también como "región de los valles transversales o región de los cordones transversales" (Novoa, 1989), forma parte fundamental de la región natural denominada por Paskoff (1970) como "Le Chili Semiaride" que, concordantemente con Almeyda (1955), se extiende entre los 27°00' y los 33°00' de latitud sur. (Figura n° 1).

FIGURA N° 1: ÁREA DE ESTUDIO

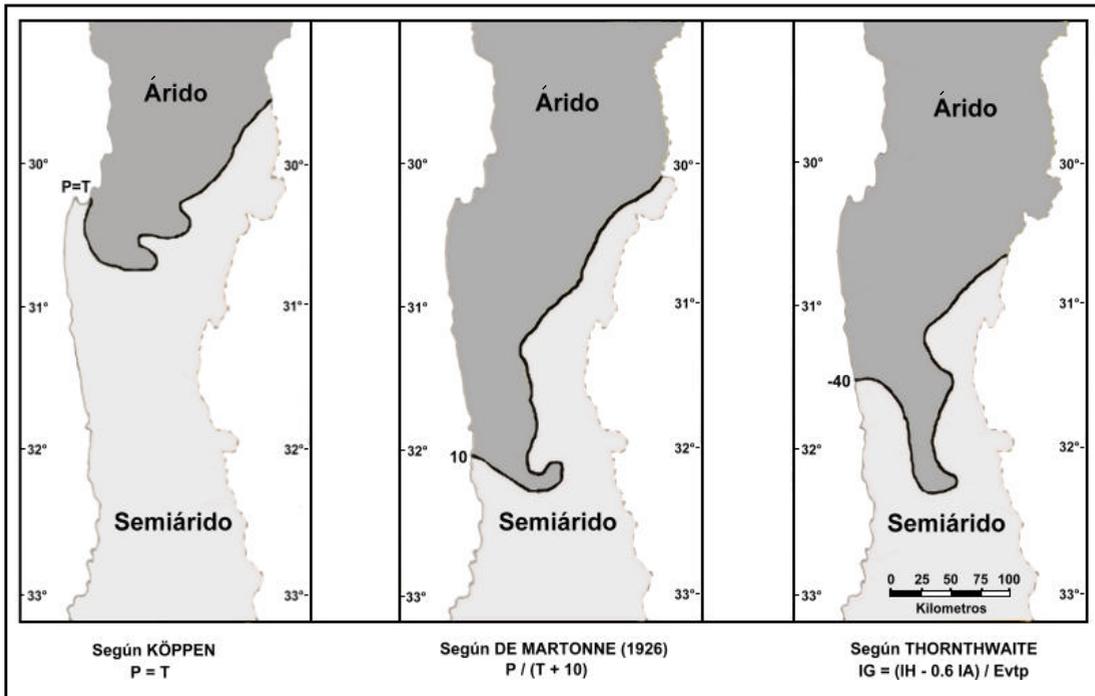


Matices de la Aridez

En la definición de la aridez, Paskoff (1970) hace referencia a la delimitación entre la aridez y la semiaridez que resulta de la aplicación, entre otros, de los criterios de Koeppen (1931), De Martonne (1926) y Thornthwaite (1948) y la difi-

cultad que ello representa, hecho que se ve reflejado en la expresión cartográfica de los mismos. (Figura n° 2). De cualquier modo, en términos generales es evidente el hecho de que la mitad norte de la región semiárida responde más bien a una condición árida.

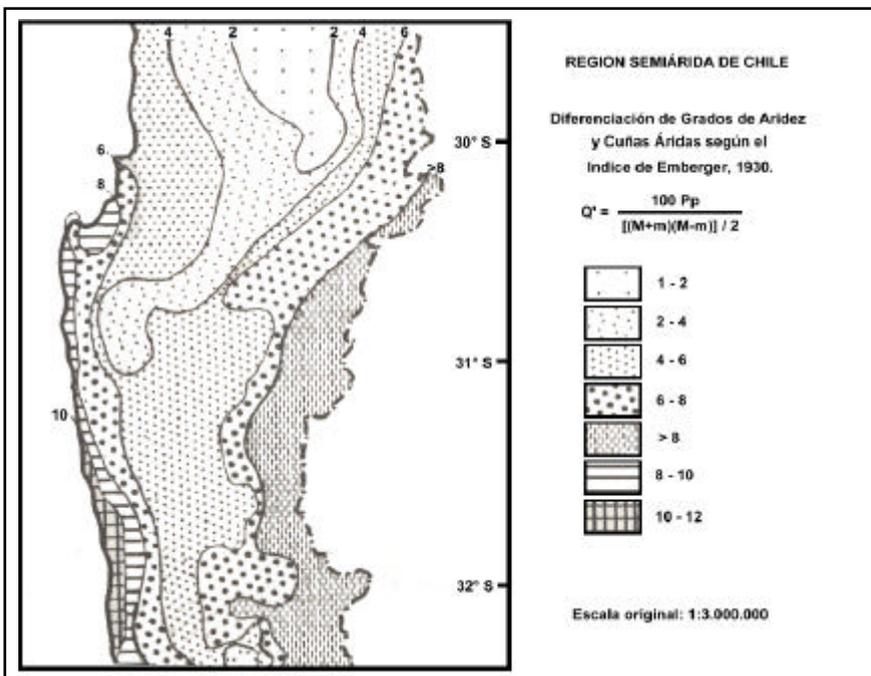
FIGURA N° 2: LÍMITE ENTRE ARIDEZ Y SEMI-ARIDEZ (SCHNEIDER, 1969).



Sin embargo, en los estudios de clima del Norte Chico realizados por Schneider (1969), se concluye que el Índice de Emberger (1930) es el que permite distinguir mejor los matices de la aridez en el Norte Chico (Zona Semiárida de Chile) al proporcionar una división en fajas cos-

tera, interior y cordillerana, apareciendo incluso hechos de detalle tales como bolsillos áridos (Figura n° 3). Un elemento adicional que apoya esta afirmación es la comparación con la carta de vegetación de Pisano (1950).

FIGURA N° 3: APLICACIÓN DEL ÍNDICE DE EMBERGER (1930). FUENTE: SCHNEIDER, 1969.



Los resultados de este índice dicen relación directa con la configuración morfoestructural de la región, en la que se diferencian claramente la Cordillera de Los Andes al E., un sector central de divisorias amplias y eje E-W denominado Media Montaña, una franja litoral marcada por la presencia de algunos bloques sollevados que, a modo de cordillera costera discontinua, se observan principalmente al sur de los 30° 20' S., y por un bien desarrollado sistema de terrazas fluviales y marinas. Estas últimas alcanzan su mayor expresión al norte de dicha latitud, en los alrededores de la desembocadura del Río Elqui. Estos rasgos llevaron a Börgel (1965) a denominarla como "región del complejo montañoso andino-costero".

Los valles transversales a que debe su nombre más común, corresponden a las cuencas fluviales exorreicas de los ríos Elqui (al norte), Limarí (al centro) y Choapa (al sur). A ellos se agrega meridionalmente la cuenca del Río Aconcagua, último de los valles de este tipo, pero que en términos administrativos pertenece a la V Región de Valparaíso.

Esta región natural, climáticamente caracterizada por condiciones de déficit hídrico, presenta marcados contrastes en su paisaje natural. Ello deriva de la existencia de formas de escurrimiento perenne en los valles mencionados, lo que genera una especie de ejes verdes al estilo de oasis longitudinales, y de la marcada ausencia de recursos hídricos en los amplios relieves que conforman las divisorias entre ellos (media montaña o cordones transversales). En estos sectores la población y la actividad productiva primaria han dependido tradicionalmente de las ocasionales y reducidas lluvias de invierno.

Influencia en la Organización del Espacio

Esta situación ha ejercido una trascendental influencia en la organización económica del espacio y de la propiedad de la tierra, marcando fuertes contrastes en la distribución de las oportunidades, posibilidades productivas y de generación de riqueza y, por lo tanto, en la diferenciación económico-social de la población. Como uno de los resultados de ello, se reconoce que la

población rural, organizada en comunidades indígenas, constituye el núcleo de la extrema pobreza a nivel nacional.

Visualizada esta situación por los propios habitantes, fruto principalmente de la diferencia de posibilidades de acceso al agua para riego, se planteó tempranamente en la hoya del Río Limarí (fines del Siglo XVI), la necesidad de dotar a la agricultura de un sistema de canales de riego que permitiera un acceso más equitativo a este recurso.

Diversos problemas se originaron con la operación de este sistema, a lo que se sumó el creciente desequilibrio entre la oferta y una demanda de agua. Ello llevó a que las autoridades de gobierno comenzaran en 1914 estudios tendientes a mejorar la infraestructura de riego en dicha cuenca. En 1928, la promulgación de la Ley 4.445 permitió dar inicio a un plan extraordinario de obras de regadío, producto del cual se dio inicio a la construcción de los embalses Recoleta (Río Hurtado) y Cogotí (Río Guatulame). La crisis de los años '30 dilató el término de las obras hasta 1934 el primero, y 1940 el segundo.

El proyecto contemplaba incorporar 27.000 hectáreas al riego, pero diversos problemas (incluida la aleatoriedad climática) llevaron a que en la práctica el embalse Recoleta permitiera regar sólo 8.500 hectáreas con un 85% de seguridad y no las 15.000 proyectadas. En el caso del embalse Cogotí, en el año 1967 el área bajo riego sólo alcanzaba a 4.600 hectáreas con un 85% de seguridad y no a las 12.000 originalmente programadas. En la actualidad diversas mejoras han permitido elevar esta cifra a 10.000 hectáreas.

Dada esta situación, y con el objeto de reforzar el sistema y subsanar el déficit señalado, se comenzó a planear la construcción de un tercer embalse en la confluencia de los ríos Grande y Rapel, aguas abajo de los dos anteriores: el embalse La Paloma. El primer estudio se efectuó en 1957 y contemplaba elevar la factibilidad de riego en un total de 57.450 hectáreas (38.872 hás. aguas abajo y 18.578 hás. aguas arriba de esta obra).

En el año 1963, un nuevo estudio modifica la distribución de estas superficies a regar reduciendo la correspondiente a aguas arriba en unas 1.400

hás. y aumentando la de aguas abajo en unas 2500 há., con el objeto de incorporar al riego 1.500 há. del sector del valle de Punitaqui.

De acuerdo con Rendel et al. (1967), el almacenamiento combinado de los tres embalses alcanzaría para regar sólo el equivalente a 47.052 há., con un promedio de seguridad de 94% en los años con precipitación cercana al módulo pluviométrico, y un mínimo del 75% en los años más secos.

Incremento de la Demanda Hídrica

En este contexto, en la década de los '60 se desarrolló una serie de cambios en la estructura de la propiedad y tenencia de los recursos agrícolas, y en la orientación y modernización productiva del sector. Este proceso contempló la implementación de un proceso de Reforma Agraria y la formulación de un Plan Nacional de Desarrollo Agrícola (1968). Este último tuvo un fuerte impacto en la demanda de suelos y aguas al colocar su énfasis en las ventajas comparativas con respecto a los mercados internacionales e impulsar la tecnificación y las plantaciones orientadas a la producción de fruta de exportación.

Ello condujo, en los años siguientes, al desarrollo de una concepción empresarial de la actividad: los agronegocios (Rovira, 1996), y a una aplicación creciente de esta visión, lo que afectó la estructura de la propiedad, las relaciones laborales, la organización socio-económica, el uso del suelo y, por cierto, la demanda por los recursos naturales básicos. Rovira y Romero (1986) reconocen como principal "acelerador" del proceso la existencia de áreas con notables ventajas en cuanto a temperatura e insolación.

Dado el sistema de embalses existentes en el valle y la factibilidad económica de aplicación de riego tecnificado altamente eficiente, y la prosperidad de los negocios, se inicia una expansión de los sectores bajo cultivo hacia terrenos fuera del fondo de los valles principales, invadiendo rinconadas, conos aluvionales, laderas, taludes coluviales, etc., lo cual genera un claro incremento de la demanda por agua para riego, hecho que obliga a llevar a cabo obras de infraestructu-

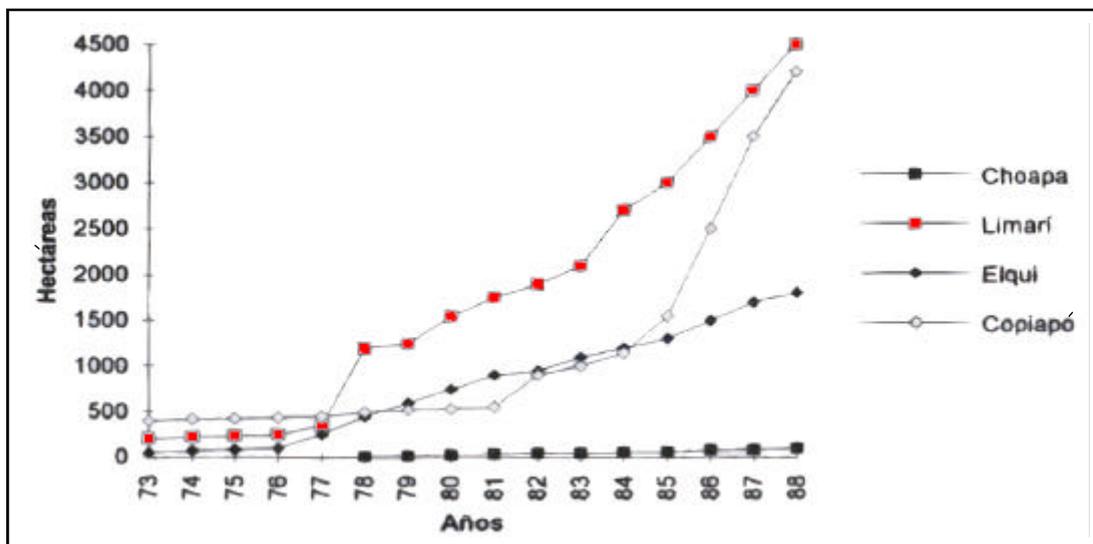
ra complementarias para almacenar y proveer de esta a los nuevos plantíos, principalmente de uva de mesa.

A este respecto, Gwynne (1996) plantea la tensión que se está desarrollando entre el crecimiento económico en la región montañosa del semiárido del Norte Chico de Chile, y el uso de un recurso renovable que podría estar alcanzando su "máxima capacidad de uso": el agua. Concretamente, en Gwynne & Meneses (1994) se señala, entre otros aspectos, que la variación anual de la lluvia es mayor del 48%; que las sequías ocurren, por lo menos, una por década y duran entre 3 y 6 años; y que la precipitación anual decreció cerca del 30% en el siglo XX.

Lo anterior se ve reflejado también en los patrones espaciales y temporales de la vegetación y en los cambios en el, de lo cual resulta un decrecimiento de la respuesta del medio ambiente natural producto de la disminución de la lluvia (Gwinne & Meneses, op. cit.).

Esta reducción de las precipitaciones contrasta fuertemente con el acelerado incremento de las hectáreas cultivadas con uva de mesa para exportación, especialmente en los valles de Limarí (4000 há entre 1977 y 1988) y Copiapó (3500 há entre 1981 y 1988), tal como puede apreciarse en el gráfico siguiente (Figura n° 4). El valle del Río Copiapó se ubica en la III Región de Atacama, la que se extiende al norte de la Región Semiárida de Chile presentando características de marcada aridez en la mayor parte de su superficie.

FIGURA N° 4: EVOLUCIÓN DE LAS EXPORTACIONES DE UVA DE MESA DE LOS VALLES DEL NORTE CHICO. FUENTE: APEY, 1990.



La Tendencia Climática

La situación descrita previamente se complica por el hecho que este recurso registra una baja en su abastecimiento en el largo plazo, según indican las evidencias climáticas. De hecho, las precipitaciones en los años '80 han sido entre

40% y 50% más bajas que en los años 20'. En la tabla siguiente (Cuadro n° 1) se aprecia claramente el descenso significativo de los promedios decadales para tres ciudades interiores. A ello se debe agregar el que la región registra altas temperaturas diarias en verano y altas tasas de insolación, particularmente en el interior.

CUADRO N° 1: PROMEDIO DE PRECIPITACIONES POR DÉCADA EN CIUDADES INTERIORES:

Estación por valle	1921-1930	1931-1940	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	Diferencia 1921-1980
Vicuña (Río Elqui)	144,1 mm	133,1 mm	140,8 mm	122,8 mm	97,9 mm	78,9 mm	-45,3 %
Ovalle (Río Limarí)	160,5 mm	121,3 mm	134,6 mm	121,4 mm	101,6 mm	102,9 mm	-35,9 %
Combarbalá (Río Limarí)	283,6 mm	242,6 mm	276,2 mm	243,9 mm	199,7 mm	202,5 mm	-28,6 %

Fuente: IGM, 1988.

Complementariamente, el análisis de los datos de la ciudad de Ovalle entre 1897 y 1990 permite establecer una tendencia general al descenso en los módulos pluviométricos: (Cuadro n° 2)

CUADRO N° 2: TENDENCIA DE LOS MÓDULOS PLUVIOMÉTRICOS

Período Interanual	Promedio (mm)
1897 – 1964	143,0
1901 – 1930	152,6
1931 – 1960	125,8
1950 – 1980	109,0

Fuente: Schneider, 1969; Gwynne & Meneses, 1994.

Por otra parte, según Peña & Rivera (1992), el Río Limarí cuyo módulo a esa fecha era de 15,1 m³/seg., abastecía una población de 126.000 habitantes y 41.000 hás. de riego, de lo que resulta que cada 8.344 personas y 2.715 hás. existe 1 m³/seg. disponible. Esto se traduce en una demanda bruta total de 15,96 m³/seg. en la últi-

ma década del siglo pasado, lo cual indica que la demanda ya superaba la oferta hídrica superficial. Por su parte, la demanda neta ya superaba en un 400% los caudales medios mínimos.

A ello se agrega el hecho que según Ihl (1996), la Región de Coquimbo, equivalente administrativo de la región semiárida, posee un clima cuya característica esencial es la variabilidad e incertidumbre de las precipitaciones y la ocurrencia relativamente frecuente de períodos prolongados de sequía.

Variabilidad e Intensidad de las Precipitaciones

La variabilidad de las precipitaciones para el período 1943-1988 que registran algunas estaciones de la cuenca media del Río Limarí se aprecia claramente en el siguiente cuadro (Cuadro n° 3).

CUADRO N° 3: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES

Estación	Período	N° de años	Promedio (mm)	Mediana (mm)	Desv. Std. (mm)	Coef. Var. (%)
E. Recoleta	1943-1988	46	108,9	94,8	75,7	69,5
E. Paloma	1943-1988	46	135,9	111,6	93,4	68,7
Punitaqui	1971-1988	28	159,4	116,7	120,5	75,5
Cogotí 18	1943-1988	46	200,0	174,0	113,5	56,8

Fuente: MOP-DGA en Downing et als, 1994.

De acuerdo a estos antecedentes queda en evidencia la fuerte variación que registran los montos pluviométricos anuales respecto de los valores medios o "normales", cifra que en promedio oscila alrededor del 70%, de lo que resulta una elevada incertidumbre en términos de seguridad del recurso para riego.

Por otra parte, relacionando los módulos pluviométricos indicados con la distribución de la lluvia en el tiempo, se evidencia la ocurrencia de un alto nivel de concentración de ésta, así como de eventos de alta intensidad. A veces, una sola lluvia puede exceder el total anual (Downing et al, 1994).

Ello explica la ocurrencia frecuente de procesos de la familia de las remociones en masa, específicamente debris flows, deslizamientos de laderas y socavamiento de terrazas, entre otros. En el siguiente cuadro (Cuadro n° 4) se puede apreciar los montos máximos absolutos alcanzados por lluvias en diferentes horizontes de tiempo para algunas estaciones del valle del Río Limarí.

CUADRO N° 4: VALLE RÍO LIMARÍ: PRECIPITACIONES MÁXIMAS ABSOLUTAS

Estación	Promedio (mm)	24 h (mm)	48 h (mm)	72 h (mm)
Punitaqui	159,4	124,0	181,0	199,0
E. Recoleta	108,9	110,0	211,0	236,0
E. Paloma	135,9	97,0	155,4	195,8
Cogotí 18	200,0	238,0	238,0	238,0

Fuente: Romero & Ihl, 1991.

Frecuencia de Sequías

En el caso de la ciudad de Ovalle, principal centro urbano de la cuenca del Río Limarí ubicado aguas abajo del Embalse La Paloma, los ante-

cedentes meteorológicos del período 1897-1990 han permitido diferenciar las siguientes sequías y años lluviosos: (Cuadro n° 5)

CUADRO N° 5

Sequías entre 1901 y 1960 (por lo menos 3 años bajo el promedio)		
Período	Duración Sequía (Años)	Promedio Pp
1909 – 1913	5	65 mm
1915 – 1917	3	67 mm
1935 – 1938	4	95 mm
1953 – 1956	4	82 mm
Años Lluviosos entre 1901 y 1960		
Período	Duración (Años)	Promedio Pp
1926 – 1932	7	195 mm
1940 – 1944	5	182 mm

Fuente: Schneider, 1969.

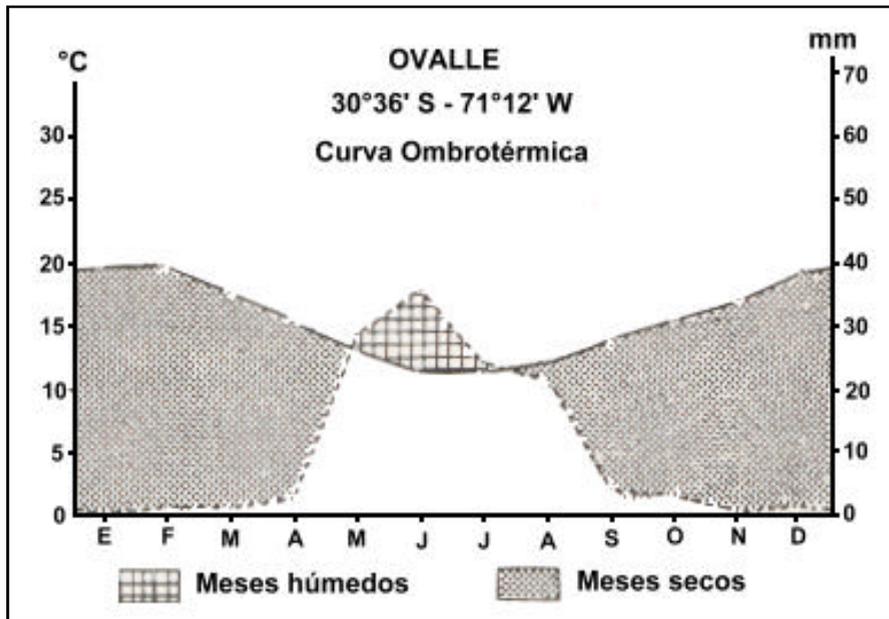
Según IGM (1988), la lluvia media en Ovalle para el período 1950-1980 fue de 109 mm. En dicho período, el 58% de los años registró montos inferiores a esta cifra.

En relación a la distribución intra-anual de la lluvia, la diferenciación entre meses húmedos y meses secos según la relación ombrotérmica $P=2T$ permite determinar que la ciudad de Ovalle (cuenca media Río Limarí) posee en promedio sólo 3 meses húmedos: Mayo, Junio y Julio. (Figura n° 5)

Fuentes & Hajek (1979) dejan ver que en la ocurrencia de estos episodios de déficit hídrico el hombre ha influido de modo importante al llevar a cabo un cambio dramático en el uso del suelo durante las pasadas dos décadas ('50 y '60), efecto relacionado principalmente con la degradación sistemática de los recursos resultante de prácticas de silvo-pastoreo. Respecto de estos episodios de sequía, Gwynne & Meneses (op. cit.) establecieron un importante déficit de agua en el verano de 1990-91, producto de lo cual el Embalse Cogotí se secó. A diferencia de éste, el Embalse La Paloma llegó a mantener un 30% de

su capacidad en el peak de la sequía, lo cual revela la importancia de los aportes del Río Grande, cuenca alto andina cuyo principal afluente es el Río Rapel.

FIGURA N° 5: CURVA OMBROTÉRMICA DE LA CIUDAD DE OVALLE. FUENTE: PASKOFF, 1970.



Escenario de Cambio Climático

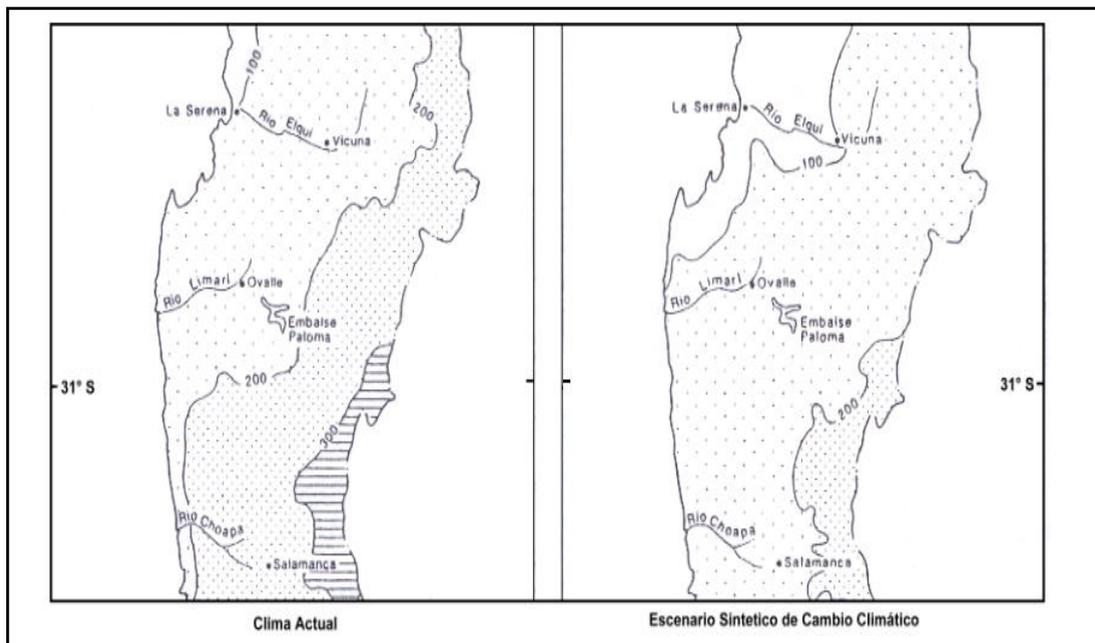
Santibáñez (1992) en base a la realización de experiencias con diversos modelos de circulación general, y al manejo de hipótesis de trabajo debidamente fundamentadas, ha establecido un escenario sintético de cambio climático que, en el caso del Norte Chico de Chile, indica un incremento en las temperaturas medias del orden de 3°C y un decrecimiento de las precipitaciones en torno del 25% (escenario resultante de la aplicación del Modelo de Circulación General del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory). Este escenario, para el cual no se establece horizontes de tiempo, plantea posibles situaciones de sequías y aumento de la desertización, tal como se desprende del desplazamiento de las isoyetas de 100, 200 y 300 mm hacia el sur. (Figura n° 6).

Se señala que el límite sur del Desierto de Atacama –las estepas áridas y las zonas semiáridas de Chile– ha experimentado una clara disminución de las precipitaciones anuales y una tenden-

cia al aumento de la aridez en los climas templados imperantes más al sur del territorio. (Downing, et al, op. cit.).

Complementariamente, Ahlcróna (1988, en Downing et al, op. cit.) ha indicado que en el futuro próximo, las regiones semiáridas del mundo estarán sujetas a un decrecimiento en la intensidad y número de días con lluvia al año, paralelamente a una mayor concentración de los eventos pluviométricos. Se indica, además, un posible retraso en la estación lluviosa y una mayor duración de las sequías.

FIGURA N° 6: NORTE CHICO: MÓDULOS PLUVIOMÉTRICOS ACTUALES Y MODELAMIENTO FUTURO. SANTIBÁÑEZ, 1992



Cuenca del Río Grande: Origen de los aportes hídricos

Dilucidando una de las fuentes de estos aportes, Downing et al. (op. cit.) establece que sobre los 3000 m.s.n.m. ocurren precipitaciones en forma de nieve unas 3 a 5 veces al año, siendo significativa su contribución en el total de los caudales anuales y su influencia en la distribución estacional de los caudales generados en es-

tas cuencas. De hecho, aquella parte de la cuenca ubicada sobre los 1000 m.s.n.m. produce un promedio de 6,0 lt/seg/km², lo que contrasta con los 0,91 lt/seg/km² de la cuenca inferior.

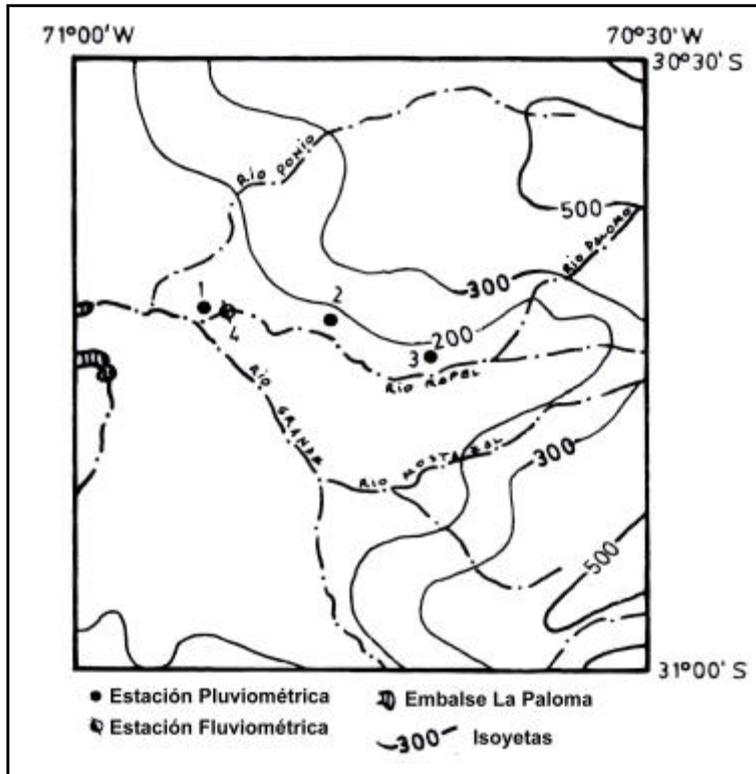
En aquella sección del Río Rapel ubicada entre el Embalse Paloma y la confluencia de la Quebrada Angosta (2.790 m.s.n.m.), se registran los siguientes montos de precipitaciones anuales medias de carácter líquido (Cuadro n° 6 y Figura n° 7):

CUADRO N° 6: DATOS DE ESTACIONES EN EL RÍO RAPEL, AFLUENTE DEL RÍO GRANDE, APORTANTE AL EMBALSE LA PALOMA.

Estación	N° en la figura N° 7	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altura m.s.n.m.	Pp. (mm/año)
Valdivia Hda.	3	30°45'	70°41'	1.300	157,7
Rapel	2	30°43'	70°47'	870	168,4
Recoleta C. Al.	4	30°42'	70°52'	550	133,2
Rapel en Junta	1	30°42'	70°53'	485	136,0

Fuente: Ferrando, 1996.

FIGURA N° 7: CUENCA RÍO RAPEL: LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES. FUENTE: MOP-DGA, 1987.B



A estos montos de precipitación líquida registrados en sectores bajo los 1500 m.s.n.m. se les debe sumar aquella significativa proporción que en los años promedio y en los más lluviosos queda capitalizada en forma sólida en la sección más alta de las subcuencas y microcuencas andinas y que contribuye a generar importantes incrementos en los caudales fuera de la estación invernal.

En estos años más lluviosos, los meses en que se registran los peaks más importantes del escurrimiento corresponden a octubre, noviembre y diciembre, es decir, en plena estación de primavera, tres o cuatro meses después del incremento de caudal asociado a las lluvias de invierno (Gwynne & Meneses, op. cit.). (Figuras 8 y 9).

Si bien estos antecedentes revelan la fluctuación presentada por los caudales durante los años con lluvias abundantes o con lluvias en torno de la mediana, y la importancia de las aguas de fusión nival en ellos, llama la atención la capaci-

dad que presentan los sistemas hídricos principales de la región semiárida para mantener escurrimiento constante, incluso durante los años más secos. (Figura n° 10).

Salvo en la primavera del año hidrológico 56-57, los caudales mensuales oscilaron entre 0,5 y 3,0 m³/seg., siendo los más bajos los de verano. Estos si bien son algo inferiores a los de los años medianos, los que oscilaron entre 1,3 y 4,8 m³/seg., no dejan de ser trascendentes en este contexto climático e hidrológico.

FIGURA N° 8: HIDROGRAMA DE LOS 5 AÑOS MÁS LLUVIOSOS DEL PERÍODO 1947-1988. CUENCA SUPERIOR RÍO LIMARÍ FUENTE: GWYNNE & MENESES, OP. CIT..

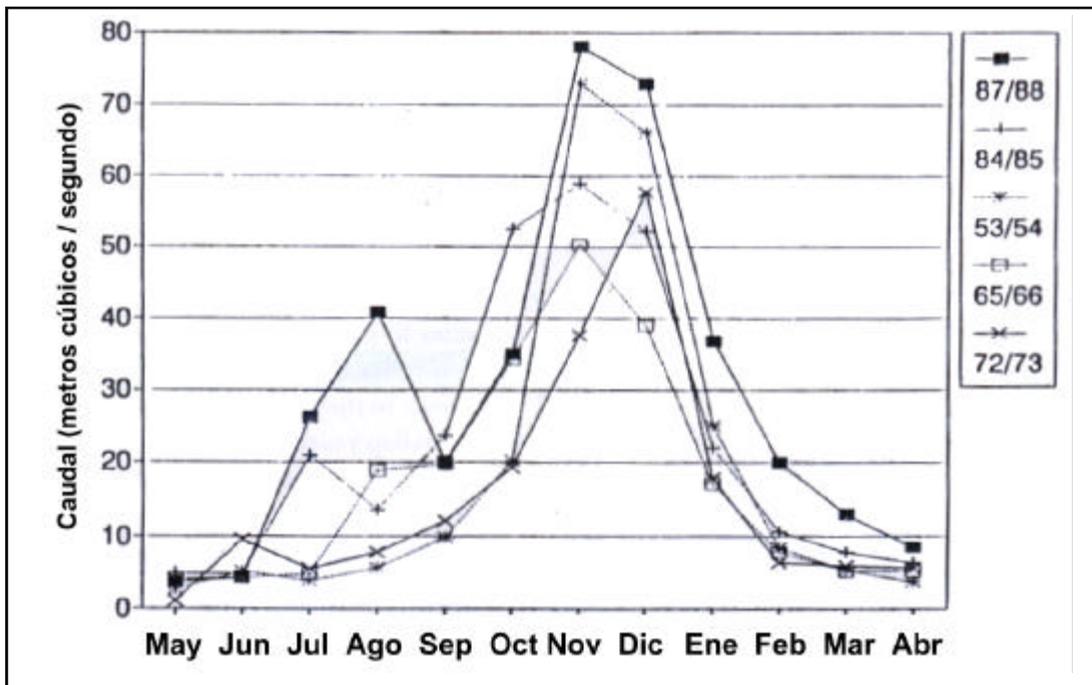


FIGURA N° 9: HIDROGRAMA DE LOS 5 AÑOS MEDIANOS DEL PERÍODO 1947-1988. CUENCA SUPERIOR RÍO LIMARÍ. FUENTE: GWYNNE & MENESES, OP. CIT.

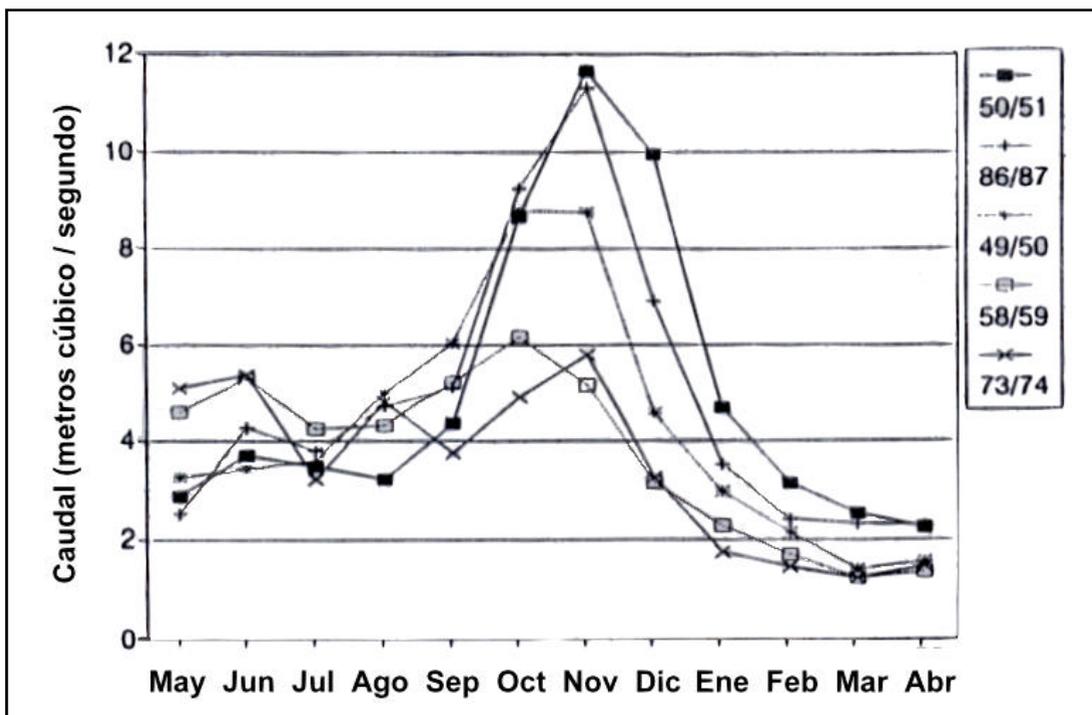
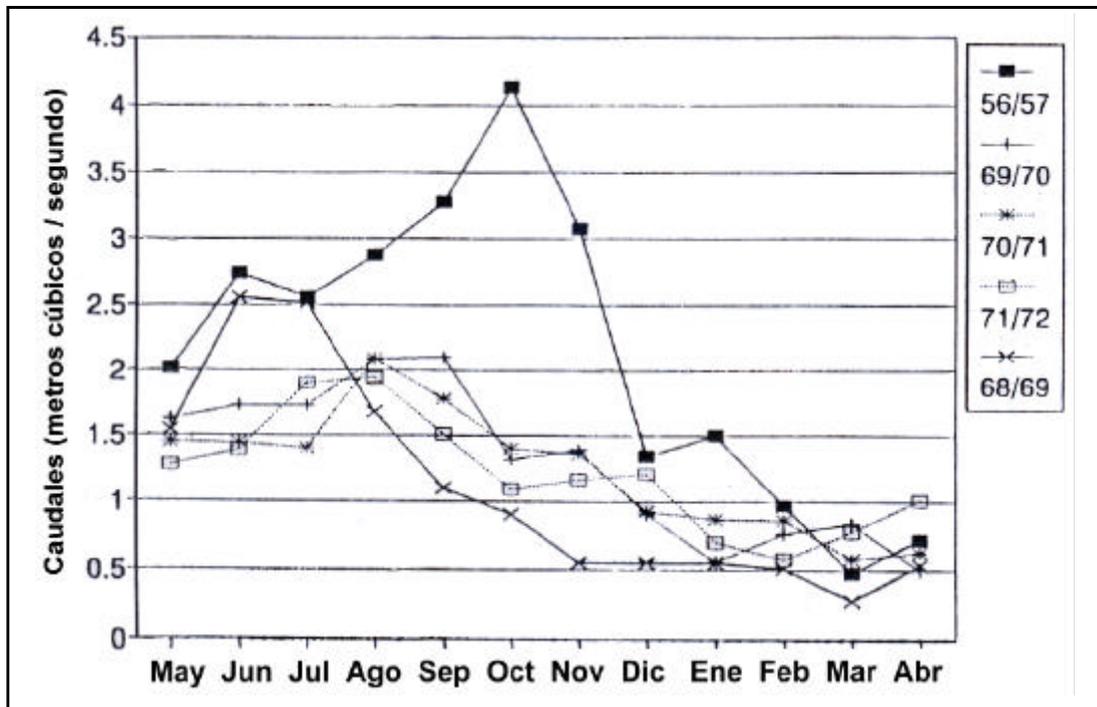


FIGURA N° 10: HIDROGRAMA DE LOS 5 AÑOS MÁS SECOS PERÍODO 1947-1988. CUENCA SUPERIOR RÍO LIMARÍ. FUENTE: GWYNNE & MENESES, OP. CIT.



Debe tenerse presente que son los meses de primavera y verano los de mayor demanda de agua por parte de la actividad agrícola orientada a la exportación. En el caso de años con escasa precipitación o sequías, lo cual significa que el período de altas aguas medias se presenta en invierno (junio, julio, agosto), la acumulación de nieve en la alta cordillera es poco significativa y, por lo tanto, existe poca disponibilidad del recurso para el desarrollo de esta actividad, justamente en los momentos de mayor demanda.

Considerando el escaso tapiz vegetacional en la media montaña y la inexistencia de éste en la alta montaña (> de 3.800 m.s.n.m.), así como las fuertes pendientes en este último ámbito, la capacidad de retención hídrica en los mantos regolíticos y cubiertas detríticas se ve favorecida por la ocurrencia de bajas temperaturas, lo que permite el recongelamiento en el sustrato, a nivel de hielo templado, del agua de percolación proveniente de la fusión de la nieve invernal. Según Ferrando et al. (2003), este mecanismo propicia la formación de glaciares rocosos y otras formas de permafrost, principalmente al pie de las laderas de umbría.

Su formación, como se ha expresado, está estrechamente ligada al registro de precipitaciones sólidas en la alta montaña. Respecto de estas últimas se registran los siguientes montos y variaciones estacionales, diferenciadas según la exposición solar de las laderas.

Rutas de Nieve

La DGA (Dirección General de Aguas - MOP de Chile) posee la Estación QUEBRADA LARGA (3500 m.s.n.m.), la cual está ubicada en la quebrada homónima, afluente de la cuenca superior del Río Rapel. Próxima a la Ruta de Nieve "Qda. Larga" está ubicada además una estación de sensores remotos tipo DCP, la que cuenta con información meteorológica y un sensor de nieve (snow pillow). Esta estación cuenta con una base de datos de 30 años (1970-2000). (Ferrando, F. et al., op. cit.)

El análisis de estos datos (Figura 11-a) permite establecer la existencia de diferencias de altura que presenta la línea de nieves estacionales (LNE) entre laderas de exposición opuesta, con promedios de 3.200 a 3.400 m.s.n.m. en la la-

dera de solana y entre 2.600 y 2.900 m.s.n.m. en la ladera de umbría.

En la ladera sur (exposición norte o solana) (Figura 11-b), las alturas máximas y mínimas de la LNE reflejan una gran diferenciación intra-anual e interanual, lo cual es posible atribuir a la amplitud térmica media que se registra entre el día y la noche (15°C), a diferencia de la ladera de umbría, donde ésta es significativamente menor, posibilitando incluso la permanencia de pequeños planchones de nieve en pleno verano.

El Aporte del Permafrost: los Glaciares Rocosos

Dadas estas condiciones climáticas y altitudinales, especialmente la ocurrencia de temperaturas lo suficientemente bajas como para que se produzca precipitación sólida, recientemente se han iniciado investigaciones sobre la existencia concreta de permafrost como causa explicativa complementaria de los caudales que éste y otros ríos de la región son capaces de mantener durante la estación seca. Como resultado, a la fecha ya se han reconocido diversas formas de glaciares rocosos de talud en el sector (Ferrando et al., op. cit.)

Considerado los datos de la altura de la LNE de la Quebrada Larga, se podría inferir que el sistema de glaciares rocosos de la sección superior de la cuenca del Río Rapel está dentro de los límites alcanzados por la variación de la altura

de la LNE y que, por lo tanto, son susceptibles a recibir aporte nivoso pese a la tendencia de ascenso de la misma durante los últimos años.

Cabe señalar que el aporte de nieve es fundamental para la generación, dinámica y evolución de los glaciares rocosos, así como del permafrost en general, al cual contribuyen a alimentar con las aguas de fusión que percolan a través de las masas detríticas para volverse a congelar a profundidades variables, aspecto este último que está directamente relacionado con la ocurrencia de temperaturas lo suficientemente bajas y prolongadas como para enfriar el sustrato al punto necesario. La existencia de este tipo particular de formas de permafrost y su fusión gradual y menos acelerada durante el verano, producto de una menor incidencia de la radiación solar calórica en profundidad, es considerada como fundamental a la hora de explicar la permanencia de escurrimiento superficial, y también intra-regolítico (throughflow current), durante la estación seca.

Balance Hídrico

Examinando los valores de las componentes del balance hídrico del Río Limarí, y comparando la sección superior con el total de la cuenca (Cuadro n° 7), se evidencia la importancia de los montos alcanzados por el escurrimiento y las precipitaciones en la primera de ellas, así como la relación porcentual entre ambas, a pesar de la mayor evapotranspiración.

CUADRO N° 7: RÍO LIMARÍ, COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

Cuenca	Sección	Área Km ²	Precipitación (Pp) (mm/año)	Caudal (Q) (mm/año)	Evt real (mm/año)	Q / Pp (%)
Limarí	Superior	6.019	368	79	289	21,4
	Total	11.760	274	45	229	16,4

Fuente: Downing et al., 1994.

FIGURA 11A – 11B: ESTACIÓN QUEBRADA LARGA (3.500 M.S.N.M.; 30°43' S, 70°22' W)
 GRÁFICO DE VARIACIONES ALTIMÉTRICAS DE LA LÍNEA DE NIEVES ENTRE 1970 Y 2000.
 FUENTE: MOP-DGA, 2002.

Figura 11-a

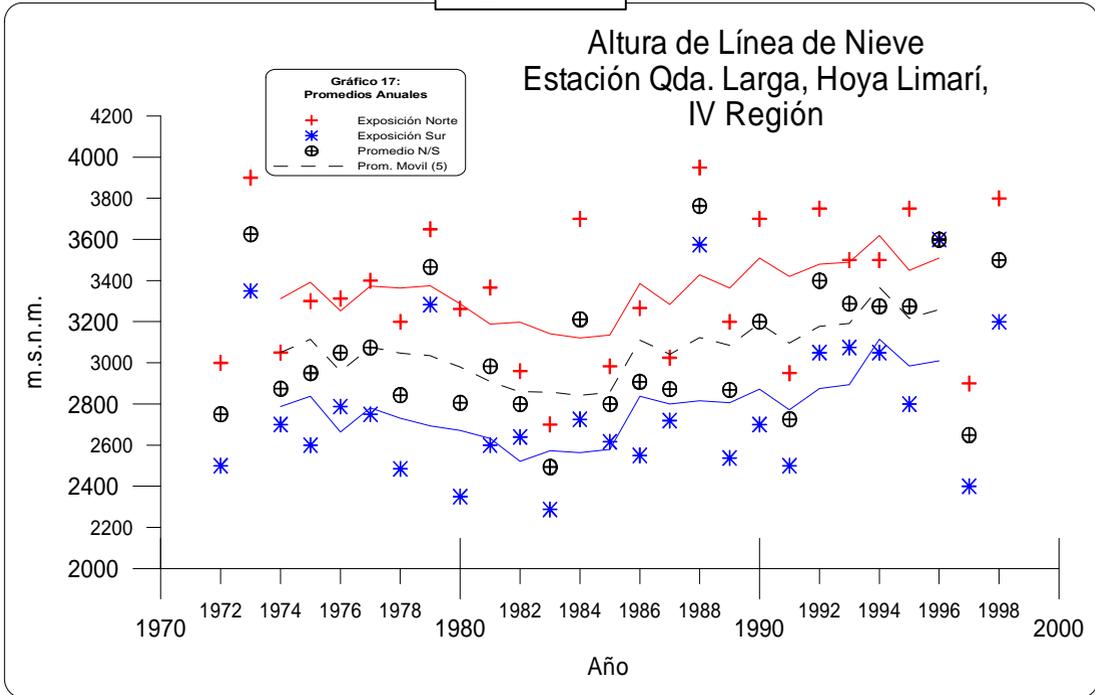
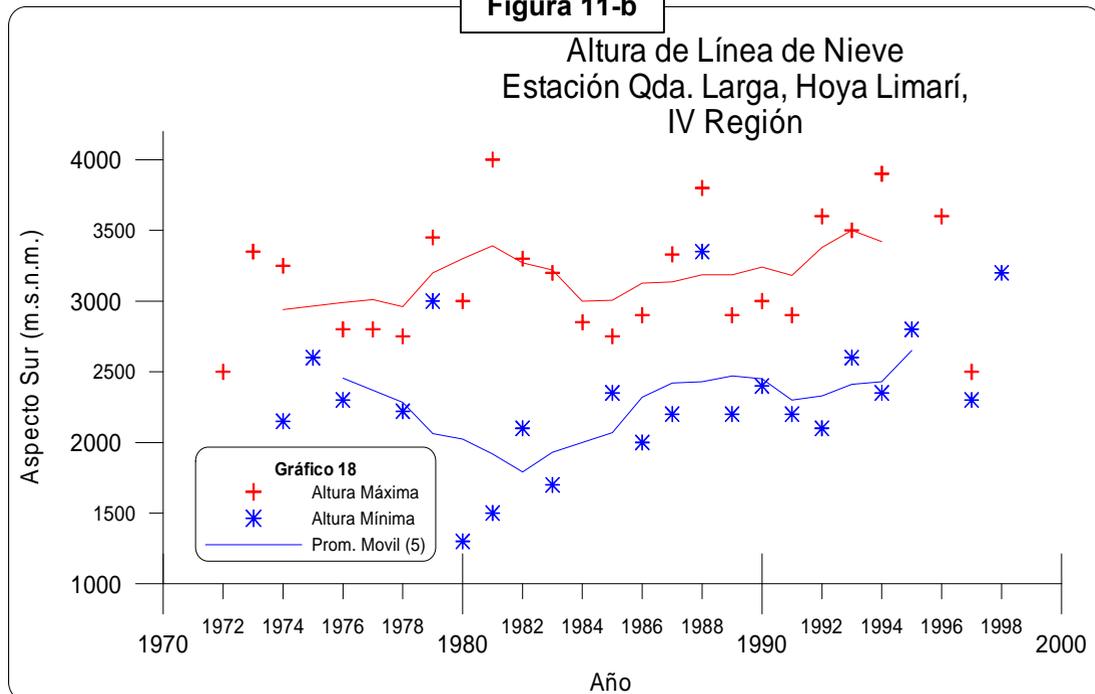


Figura 11-b

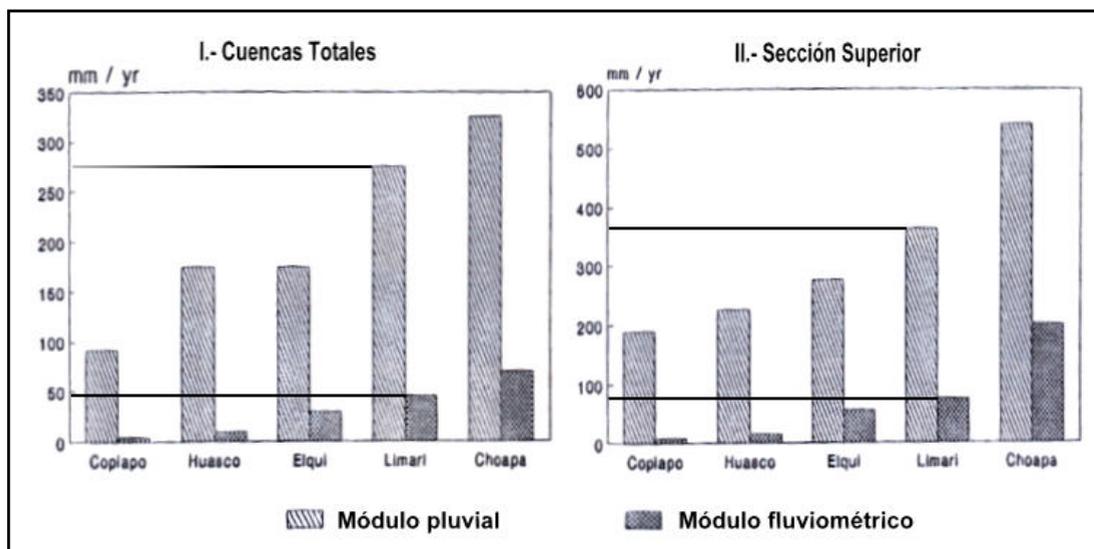


De la lectura de estas cifras resulta evidente la importancia del volumen que aporta la cuenca superior al sistema de embalses para riego, a lo cual es menester agregar el registro de escurrimiento permanente, a pesar de sus fluctuaciones intra e interanuales.

La productividad de la lluvia en cuanto a generación de escurrimiento es un 5% mayor en la

sección superior de este sistema hidrográfico respecto de la cuenca total. Situación similar se registra en las cuencas de los ríos Copiapó, Huasco, Elqui y Choapa (Figura n° 12); sin embargo, al revisar las cifras caso a caso se verifica que la productividad de la lluvia en la cuenca superior de los tres primeros sistemas sólo es ligeramente superior a la de la cuenca total: 1,6% en el Río Copiapó, 1,1% en el Huasco, y 0,7% en el Elqui.

FIGURA N° 12: NORTE CHICO: MÓDULO PLUVIAL Y MÓDULO PLUVIOMÉTRICO POR CUENCAS.



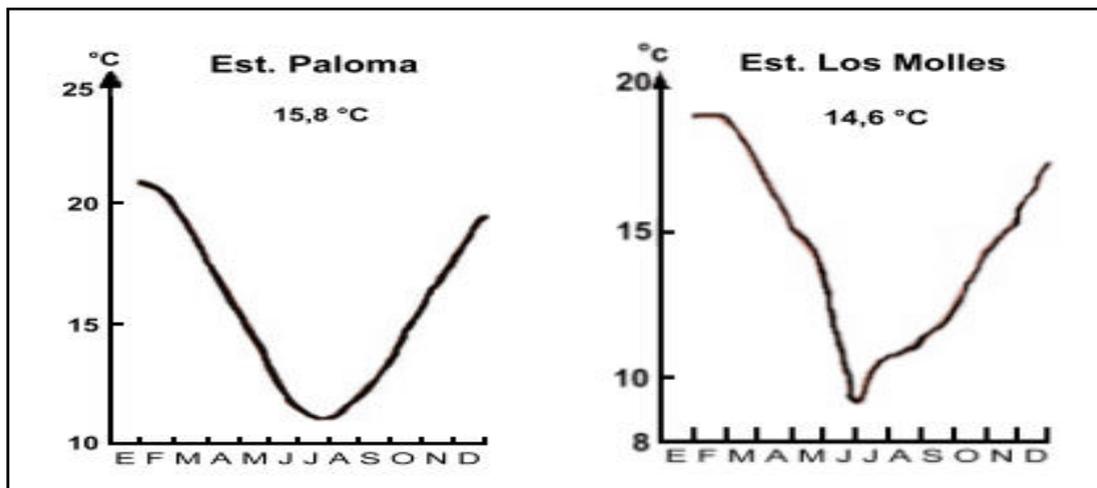
Fuente: Peña & Rivera, 1992.

Estas tres hoyas hidrográficas ocupan la parte norte de la región semiárida, e incluso según Schneider (op. cit.) están insertas en un sector netamente árido. Ello explica la notable diferencia con las hoyas hidrográficas de los ríos Limari y Choapa, más al sur, en las que la productividad de las precipitaciones de la cuenca superior respecto del área total presenta un sustantivo incremento, llegando a significar un 16,9% en el último de ellos.

Lo anterior radica en la disminución de las temperaturas medias y el incremento del número de mínimas por bajo el 0°C con el aumento de la latitud, hecho al que se suma un incremento en la frecuencia de situaciones de precipitación sólida bajo condiciones de frentes polares. Ello se ve reflejado tanto en las curvas de temperaturas como en la relación entre los escurrimientos y el espesor alcanzado por la nieve.

Respecto de las temperaturas medias tanto anuales como mensuales (Figura n° 13), en el caso específico de la Subcuenca del Río Grande, tributario del Embalse La Paloma, la Estación Paloma, ubicada a 430 m.s.n.m., presenta una temperatura media anual de 15,8°C, la que en la Estación Los Molles, ubicada a 1.300 m.s.n.m., es de 14,6°C. Ello establece una gradiente térmica negativa de 1,2° en 870 m., indicando la existencia de islas de calor que se prolongan en altura por el fondo de los valles.

FIGURA N° 13: TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES. FUENTE: MOP-DGA, 1987.



Igual situación parecen indicar las temperaturas medias mensuales, ya que en la Estación Los Molles éstas van entre 9°C la mínima y 19°C la máxima, y entre 11°C y 21°C en la Estación Paloma. Esto representa una disminución media mensual de sólo 2°C con el incremento de la altura.

Esta situación, al parecer característica de los valles de las zonas áridas y semiáridas de Chile, es aprovechada para la extensión de los cultivos de frutales, los que tienen requerimientos específicos de horas de calor / año para su maduración.

Diferente es la situación térmica cuando se asciende por las quebradas y laderas de los relieves de alta montaña. Claramente a partir de los 2500 m. de altitud hacia arriba se percibe una disminución notoria de la temperatura, tanto en forma directa como indirecta. Comienzan, entre otros, a cambiar la composición de la vegetación, a descender la densidad de cobertura del suelo, y a aparecer criofomas en los cursos de agua.

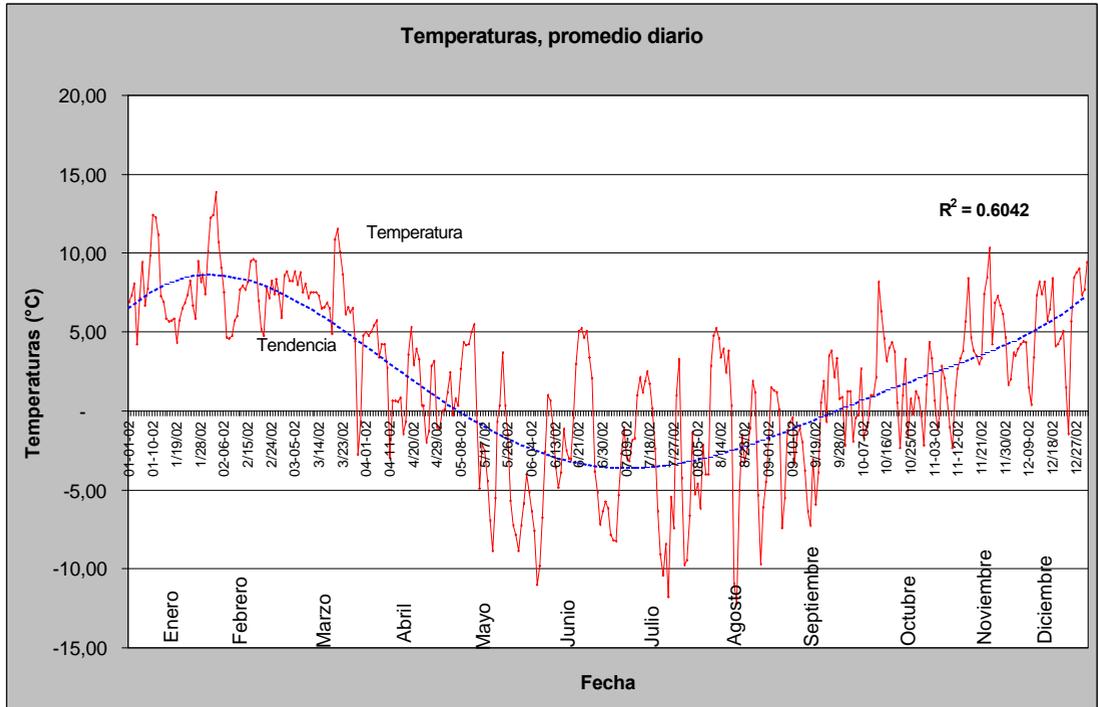
Registros recientes obtenidos mediante un sensor térmico ubicado a 3.800 m. de altura (Figura n° 14), en la Subcuenca del Río Los Molles, muestran claramente la ocurrencia de temperaturas bajo el punto de congelación entre los meses de Abril y Octubre, es decir, en siete meses durante el año 2002. (Ferrando, F., 2003).

Dada la tendencia a una mayor homogeneidad y regularidad térmica en los climas de altura, es dable suponer un comportamiento térmico similar para las últimas décadas dentro del contexto de tendencia al calentamiento global.

La existencia de temperaturas bajo cero grado Celsius durante una parte importante del año en la alta montaña de esta zona semiárida constituye un factor de gran relevancia en términos del registro de precipitaciones sólidas y de la duración de las acumulaciones de nieve, así como de la existencia y variación estacional de permafrost en el subsuelo.

Estas reservas son fuente fundamental en la mantención de los escurrimientos superficiales durante la estación seca, tal como se deduce de la estrecha relación entre la variación de los caudales anuales y las diferencias de espesor de la nieve en la Subcuenca del Río Grande para el período 1955 – 1988 (Figura n° 15).

FIGURA N° 14: TEMPERATURAS PROMEDIO DIARIO EN QUEBRADA ANGOSTA. FUENTE: FERRANDO, 2003.

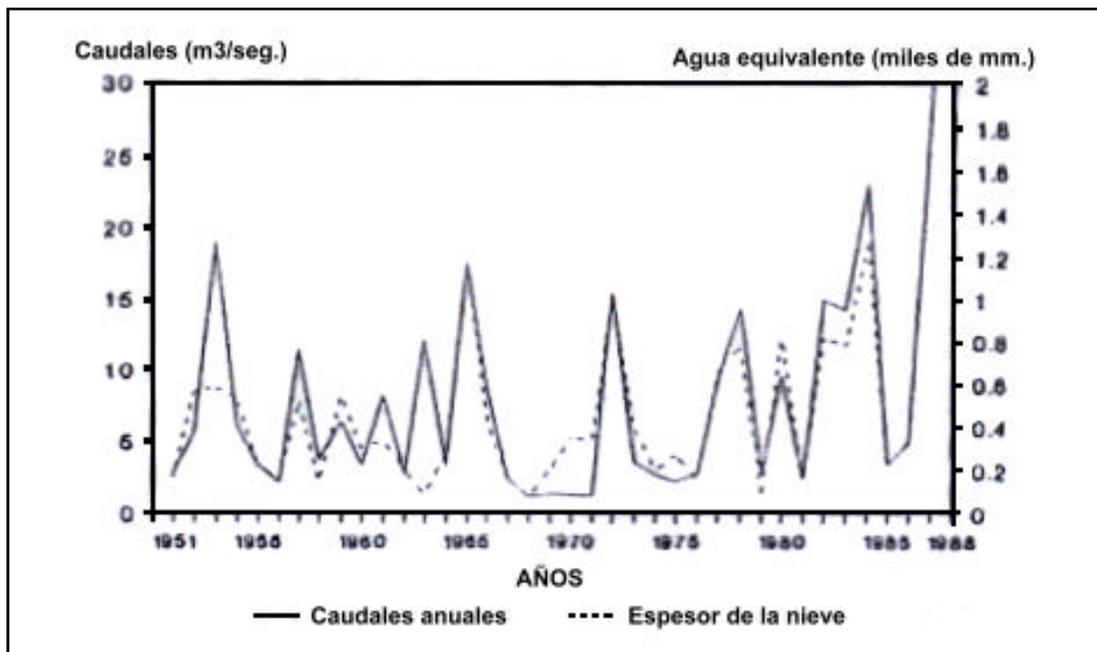


Dicha relación no resulta tan estrecha si se comparan los montos de los caudales anuales con los totales de las precipitaciones para igual período. Se observan comportamientos proporcionalmente discordantes tales como que frente a diferentes montos de lluvia se registran caudales similares y viceversa. Ello reflejaría la influencia de la temperatura en términos de capitalización-descapitalización del recurso en las cuencas nacientes, el rol de la evapotranspiración, factor dependiente tanto de la temperatura como de los vientos locales (anabáticos y catabáticos), y la existencia de retroalimentaciones a partir de fuentes subterráneas (fusión parcial del permafrost y surgencias desde napas).

De igual modo, tampoco existe alta correspondencia entre los milímetros de lluvia caídos y los espesores de la cubierta nival medidos, lo cual revela la persistencia de ciertos volúmenes de ella de un año para otro, o su retención por congelamiento en el subsuelo. Ello refleja condiciones de temperatura tales que posibilitan la for-

mación de neviza, hecho favorecido por la variada orientación de los relieves que genera condiciones de exposición diferente (solana-semisolana-umbria-semiumbría) y, por lo tanto, notorias diferencias térmicas entre unas laderas y otras.

FIGURA N° 15: RELACIÓN CAUDALES – ESPESOR DE LA NIEVE. SUBCUENCA RÍO GRANDE.



Fuente: Peña & Rivera, 1992.

Conclusiones

Relacionando la disponibilidad de recursos, principalmente el hidrológico, con la sostenibilidad del desarrollo, es fundamental el contar con una base de recursos sustentable, es decir, sobre la que se apoye y afiance dicho proceso. También es menester un manejo de éstos bajo igual óptica, vale decir, conservando calidad y cantidad en el tiempo.

Pues bien, de los antecedentes analizados, principalmente de las tendencias climáticas que indican las cifras, queda en evidencia un desequilibrio e insustentabilidad en el mediano plazo de los planes de desarrollo, en los que, ineludiblemente, el agua constituye el recurso fundamental.

Dado el incremento en la demanda de agua por el aumento de las superficies bajo riego, aun considerando el empleo de sistemas más eficientes y de menor consumo, es claro que se requiere de un adecuado conocimiento de las existencias y disponibilidades como del manejo o administración óptima del mismo. Sin ello, se hace imposible el logro de un desarrollo sostenido en términos positivos.

Ante este contexto, el conocimiento de las fuentes tradicionales y no tradicionales que aportan desde las secciones superiores o andinas de las cuencas aparece como insoslayable, pero no suficiente. Se requiere conocer las formas de almacenamiento y los volúmenes almacenados, la dinámica y los procesos de recarga, el balance entre los caudales que ingresan al sistema y los que efluyen de él en dirección de los ríos y embalses.

Siendo el ámbito de la alta montaña el sistema de acopio y establecimiento de reservas hídricas en el tiempo, a escalas tanto intra como plurianual, es necesario, entre otros aspectos, el conocer y evaluar sus acuíferos, el estimar los volúmenes de almacenamiento tanto líquidos superficiales como líquidos y sólidos subsuperficiales, es decir, cuerpos lagunares y cubiertas nivales por una parte, y napas y permafrost por otra.

De poco serviría el sistema de embalses inicialmente señalado si, aun en períodos de sequía prolongada y ante una demanda creciente, estos

no recibieran alimentación de los ríos andinos durante el verano. Dado que los caudales que estos aportan se componen en buena parte de las aguas que entregan estas masas de hielo intersticial durante los momentos cruciales para la actividad agrícola aguas abajo, no cabe duda de la importancia de llevar a cabo investigaciones sobre esta fuente hídrica, generalmente no considerada en los balances, su localización, dinámica, mecanismos de alimentación, volumen y variación del mismo en el tiempo.

La demanda hídrica debería regularse en función de las ofertas potenciales, posibles en diferentes horizontes de tiempo, es decir, establecidas sobre bases reales, resultado de investigaciones científicas aplicadas, lo cual debiera traducirse en un adecuado dimensionamiento de las metas de los planes de desarrollo socio-económico y en el establecimiento de regulaciones al uso que aseguren una permanencia y adecuada disponibilidad del recurso, acorde a las necesidades, es decir, bajo una óptica sustentable.

En este sentido, las recientes investigaciones sobre existencia y tipo de manifestaciones del permafrost en el sector altoandino de regiones con déficit hídrico están siendo visualizadas como un aporte fundamental al establecimiento de potencialidades concretas de desarrollo regional y acotamiento del mismo.

Bibliografía

ALMEYDA A., E. *Geografía de Chile*. Santiago: Imp. Talleres Casa Nacional del Niño, Edición XVI, 1955, 255 pp.

APEY, A. *Agricultural Restructuring and Coordinated Policies for Rural Development in Chile*. Tesis Doctoral. University of Birmingham, 1995, 290 pp.

BÖRGEL, R. *Mapa Geomorfológico de Chile: descripción geomorfológica del territorio*. Santiago: Instituto de Geografía, Facultad de Filosofía y Educación, Universidad de Chile. Central de Publicaciones, Escuela de Periodismo. 108 pp.

DE MARTONNE, E.. Aréisme et l'indice d'aridité. *C. R. Acad. Sciences*, 1926, n° 182; pp. 1395-1398.

DOWNING, T. E., et al. *Climate change and sustainable development in the Norte Chico, Chile: Climate, water resources and agriculture*. Environmental Change Unit, University of Oxford: Research report, 1994, N° 6, 69 pp.

EMBERGER, L. Sur une formule climatique applicable en géographie botanique. *C. R. Acad. Sciences*, 1930, N° 191, pp. 389-391.

FERRANDO, F. Glaciares relictuales en el marco andino del semiárido de Chile, IV Región: Análisis de caso. IN *1 Taller Internacional de Geoecología de Montañas y desarrollo Sustentable de Los Andes del Sur*. Santiago, 1996, pp. 287-298.

FERRANDO, F. Dynamic characteristics of Rock Glaciers from the Semiarid Andes of northern Chile. *Symposium on Mass Balance of Andean Glaciers and 1st Mass Balance Workshop of Andean Glaciers*. CECS, Valdivia, 2003, 8 pp.

FERRANDO, F., et al. Permafrost en los Andes del Sur: Glaciares rocosos en la región semiárida de Chile y su importancia como recurso hídrico. IN *9° Encuentro de Geógrafos de America Latina*. Mexico, 2003, 27 pp. (Publicación Digital).

FUENTES, E. y HAJEK, E. Patterns of landscape modification in relation to agriculture in central Chile. *Environmental Conservation*, 1979, N° 6, 4 pp.

GWYNNE, R. Orientación hacia el exterior y ambientes marginales: Crecimiento y cambios en el Norte Chico de Chile. IN *1 Taller Internacional de Geoecología de Montaña y Desarrollo Sustentable de los Andes del Sur*. Santiago, 1996, pp. 341-356.

GWYNNE, R. & MENESES, C. *Climate change and sustainable development in the Norte Chico, Chile: Land, water and the commercialization of agriculture*. Environmental Change Unit, University of Oxford, England. Research report, 1994, N° 5, 20 pp.

- IHL T. Percepción de los cambios climáticos en la Región de Coquimbo. IN *1 Taller Internacional de Geoecología de Montaña y Desarrollo Sustentable de los Andes del Sur*. Santiago, 1996, pp. 363-370.
- IGM. *Geografía IV Región de Coquimbo*. Colección Geográfica de Chile; 1988, 425 pp.
- KOEPPEL, W. *Climatología*. 2ª edición. Mexico: Fondo de Cultura Económica, 1931. 478 pp.
- MOP-DGA. *Balance Hídrico de Chile*. Santiago: Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas, 1987. 23 pp.
- MOP-DGA. *Rutas de Nieve Estación Quebrada Larga*. Santiago: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, 2002. 15 pp.
- NOVOA, J. E. Geografía y Medio Ambiente. IN *Colosos del Norte verde*. La Serena: Editorial Universitaria de La Serena y Pontificia Universidad Católica del Norte, 1989. pp. 15-20.
- PASKOFF, R. *Le Chili Semiáride*. Tesis de Doctorado. Bordeaux, Francia: Editorial Biscaye Freres, 1970. 422 pp.
- PEÑA, H. y RIVERA, A. *Efectos potenciales de un cambio de clima en la agricultura y desarrollo regional en el Norte Chico: Análisis de la variabilidad hidrológica*. Santiago: Informe Técnico DGA-MOP, 1992. 35 pp.
- PISANO, E. La vegetación de las distintas zonas geográficas chilenas. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 1954, N° 11, pp. 95-108.
- RENDEL et al. *Proyecto de Regadío y Desarrollo*. Vol. I. Convenio DNR-MOP de Chile - Rendel, Palmer & Tritton Society. England, 1967, 240 pp.
- ROMERO, H. y IHL, M. Cambios climáticos de corto plazo en el Norte Chico, variabilidad de las precipitaciones y sus efectos sobre los topoclimas y los recursos regionales. IN *I Congreso de Ciencias de La Tierra*. Santiago, 1991. pp. 177-205.
- ROVIRA, A. Características espaciales del proceso de modernización agrícola en el semiárido chileno. IN *I Taller Internacional de Geoecología de Montaña y Desarrollo Sustentable de los Andes del Sur*. Santiago, 1996, pp. 79-86.
- ROVIRA, A. y ROMERO, H. Modernización de los sistemas agrícolas en el ambiente árido de Chile: Proposiciones de investigación. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 1986, N° 29, pp. 95-102.
- SANTIBÁÑEZ, G. F. *Impact on agriculture due to climatic change and variability in South America: A case study of the arid zone of Chile*. Santiago: AGRIMED, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, 1992. 25 pp. (Mimeo).
- SCHNEIDER, H. *El clima del Norte Chico*. Santiago: Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Educación, Universidad de Chile. Imp. Santiago, Central de Publicaciones, Escuela de Periodismo, 1969, 132 pp.
- THORNTHWAITE, C. W. *An approach toward a rational classification of climate*. *Geographical Review*, 1948, N° 38, pp. 55-94.