

CAMBIO GLOBAL Y CUENCAS HIDROGRÁFICAS ESTRATÉGICAS PARA ARAUCO. MARCO CONCEPTUAL Y ANÁLISIS INICIAL EN CUENCA DEL MATAQUITO

Versión Final: 28 de Julio 2011

CAMBIO GLOBAL Y CUENCAS HIDROGRÁFICAS ESTRATÉGICAS PARA ARAUCO.

MARCO CONCEPTUAL Y ANÁLISIS INICIAL EN CUENCA DEL MATAQUITO

INDICE

I.	INTRODUCCION Y OBJETIVOS	1
II.	CONTEXTO: EL TERRITORIO, ARAUCO Y EL CAMBIO GLOBAL	4
II.1	Escenarios futuros	4
II.2	Cuencas estratégicas para Arauco.....	12
II.3	Plantaciones y sistemas naturales	16
III.	ESTUDIO DE CASO EN CUENCA DEL RIO MATAQUITO.....	22
III.1	Introducción a la cuenca del Río Mataquito	22
III.2	Escenarios futuros para cuenca del Río Mataquito.....	25
III.3	Análisis de tendencias hidroclimatológicos.....	39
III.4	Análisis otras variables de cambio global.....	66
IV.	CONCLUSIONES GENERALES: PROPUESTA DE PRÓXIMOS PASOS A SEGUIR PARA LA EMPRESA	78
V.	REFERENCIAS.....	82
VI.	ANEXOS	88
VI.1	Test de Mann-Kendall.....	88
VI.2	Relleno de series de caudales.....	89

CAMBIO GLOBAL Y CUENCAS HIDROGRÁFICAS ESTRATÉGICAS PARA ARAUCO.

MARCO CONCEPTUAL Y ANÁLISIS INICIAL EN CUENCA DEL MATAQUITO

I. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

Los recursos hídricos son sensibles a una serie de presiones asociadas al cambio global. La más clara de éstas es el cambio climático cuyas tendencias futuras pueden afectar la disponibilidad de agua a largo plazo y potencialmente afectar la frecuencia de eventos extremos, tanto de sequías como crecidas. Este tipo de efectos ya han sido explorados en estudios recientes en Chile (Ej. CEPAL, 2009; Vicuña et al, 2010; Vicuña et al, 2010b; Melo et al 2010; McPhee et al. 2010).

Es importante destacar que además del cambio climático existen otros procesos de largo plazo que también tienen la potencialidad de afectar tanto la cantidad y calidad de los recursos como también la ocurrencia de eventos extremos. Ejemplos de estos son el crecimiento agrícola y urbano, el cambio de uso de suelo y la pérdida de servicios ecosistémicos entre otros.

La empresa Arauco tiene actividades e intereses en una serie de cuencas hidrográficas del país que son vulnerables a estos impactos del cambio global. Por otra parte, la empresa tiene una permanencia y visión estratégica que se proyecta al largo plazo, por lo que se hace necesario evaluar estos impactos y generar un marco de acción que le permita anticiparse a éstos.

El equipo formado por el Centro de Cambio Global y el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile ha llevado a cabo un trabajo de investigación en estas materias, cuyo objetivo es desarrollar un marco conceptual para abordar estos temas y generar la información de base relevante en una de las cuencas estratégicas de la empresa, la cuenca del Río Mataquito.

El haber seleccionado a la cuenca del Río Mataquito como un primer caso de estudio para la empresa obedece al hecho de que en los últimos años se han registrado varias crecidas importantes en la cuenca que potencialmente podrían atribuirse a un cambio o tendencia en la

ocurrencia de eventos extremos. A modo de ejemplo, se mencionan los eventos del 12 de julio de 2006 y del 22 y 23 de mayo de 2008. Ambas crecidas provocaron desbordes e inundaciones en la ciudad de Licantén. En especial, la crecida de 2008 produjo daños cuantiosos tanto en localidades aledañas al cauce como en la Planta de Licancel, registrándose también algunas personas fallecidas. Un estudio preliminar de la Dirección General de Aguas (DGA) estima que el periodo de retorno de la crecida de mayo del 2008 superó al menos los 200 años¹.

La frecuencia de estos eventos catastróficos pareciera haber aumentado, estando en general relacionados con i) gran intensidad y duración de lluvias sobre la cuenca, ii) temperaturas relativamente altas que desplazan la isoterma cero por sobre los 3.000 msnm.¹ La aparente mayor frecuencia con que se combinan estas condiciones podría estar relacionada con el fenómeno de cambio climático.

Por otra parte, las proyecciones de cambio climático para la región indican que las precipitaciones anuales disminuirían mientras que las temperaturas promedios anuales estarían aumentando. Esto podría tener consecuencias en la disponibilidad del recurso hídrico y en la calidad de éste. Para evaluar este tipo de impactos se requieren otras herramientas para estudiar al largo plazo la relación entre condiciones climáticas y caudal en los ríos, considerando la incertidumbre asociada a esta estimación y la vulnerabilidad de la región.

Estos dos temas (cambios en frecuencia de eventos extremos y cambios en el uso actual y futuro de recursos hídricos) serán evaluados para el caso de la cuenca del Río Mataquito en el marco de esta propuesta de trabajo.

Objetivo general del estudio

Los dos objetivos principales del estudio son: (1) el desarrollo general de un marco conceptual de análisis de vulnerabilidades de cambio global en cuencas estratégicas para Arauco, y (2) la generación de la información de base relevante en la cuenca del Río Mataquito como una

¹ Informe Técnico: Análisis Crecida Río Mataquito y Tributarios 22 y 23 de mayo de 2008. DGA región del Maule, Ministerio de Obras Públicas de Chile. 2008.

primera cuenca de estudio, que permita identificar los principales componentes de vulnerabilidad asociados a estos procesos. Este objetivo se basará de manera importante en análisis estadístico de condiciones hidroclimáticas y de recursos hídricos en la cuenca y un análisis simple de las condiciones climáticas e hidrológicas esperadas para el futuro.

Objetivos específicos:

Se plantean los siguientes objetivos específicos del estudio:

1. Desarrollar el marco conceptual de análisis de vulnerabilidad al cambio global para las cuencas hidrográficas estratégicas de Arauco
2. Para el caso de la cuenca del Río Mataquito:
 - a. Desarrollar un análisis estadístico hidroclimático en la cuenca del Mataquito a partir de antecedentes y registros históricos, de manera de generar un análisis de frecuencia de crecidas e inundaciones y análisis de tendencias u otras variaciones significativas.
 - b. Desarrollar escenarios futuros climáticos considerando análisis de incertidumbre y un simple balance hídricos.
 - c. Desarrollar un análisis de uso de recursos hídricos en la cuenca del Mataquito que incluya la evolución de demanda del sector agrícola, y el cambio en el uso de suelo y las consecuencias en la disponibilidad de agua.
 - d. Llevar a cabo un análisis de factores críticos que afectan la ocurrencia y magnitud de crecidas e inundaciones en el Río Mataquito.

II. CONTEXTO: EL TERRITORIO, ARAUCO Y EL CAMBIO GLOBAL

II.1 Escenarios futuros

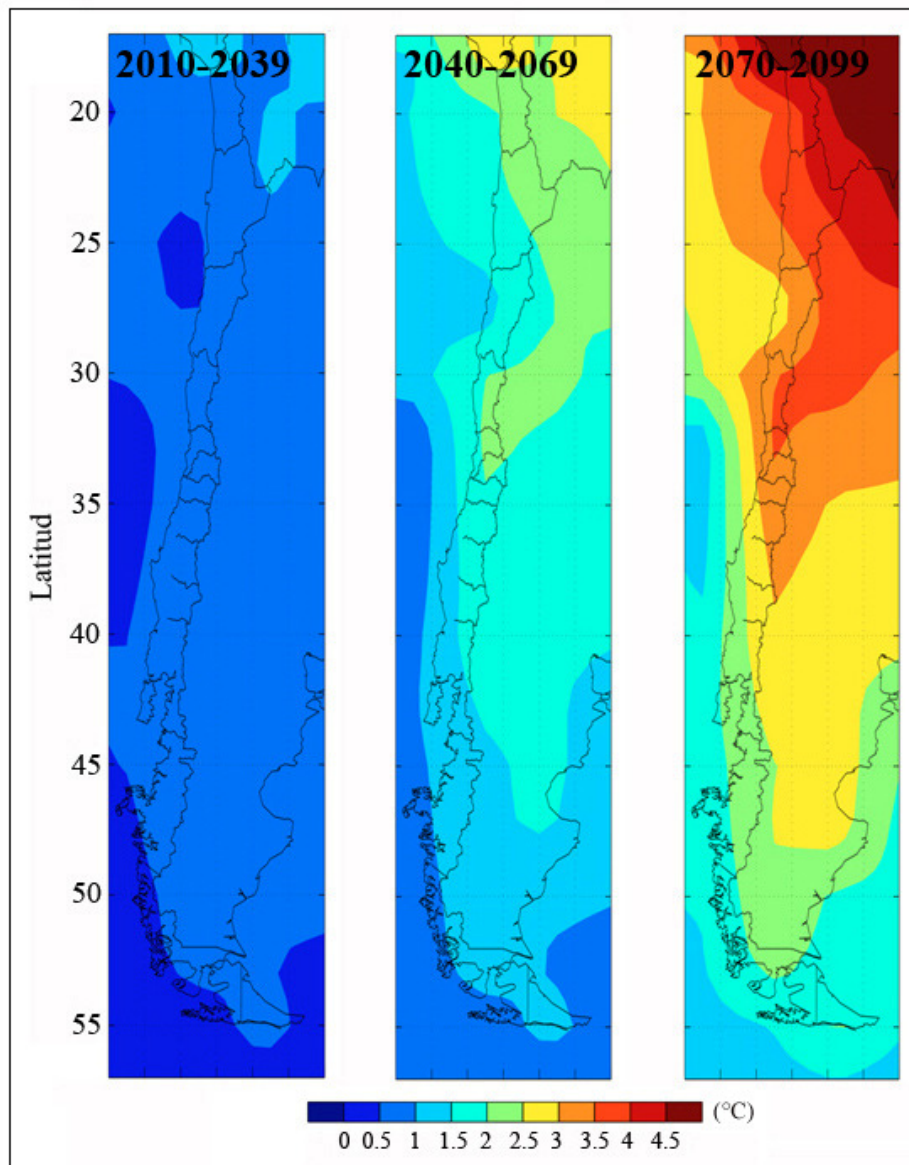
Escenarios de cambio climático e impactos esperados

Las proyecciones futuras de cambio climático se llevan a cabo utilizando modelos de clima global (GCM por sus siglas en inglés). Estos modelos simulan las condiciones climáticas del planeta, considerando diferentes niveles de emisión y concentración de gases de efecto invernadero (GEI). Existen en la actualidad alrededor de 20 modelos GCM (IPCC, 2007) que tienen la capacidad de realizar estas simulaciones de manera adecuada. A su vez, existen una serie de trayectorias potenciales de las emisiones de GEI de acuerdo a las diferentes proyecciones que pueda tener la economía, la población del planeta y el grado de control de emisiones.

En Chile se han realizado análisis de las proyecciones futuras climáticas e impactos asociados usando el modelo GCM inglés del Hadley Center bajo dos escenarios de emisión de GEI, el A2 (alto en emisiones de GEI) y el B2 (moderado en emisiones)² (DGF-CONAMA, 2007; CEPAL, 2009; Proyecto Segunda Comunicación Nacional). En las siguientes figuras se presentan los resultados de proyecciones climáticas futuras para tres períodos distintos: un período temprano

² Estos escenarios corresponden al año 2100 a un nivel de emisiones acumuladas de CO₂ en torno a 1800 y 1100 GtC respectivamente (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/sres/index.html>) y de un nivel de concentración de CO₂ en torno a 800 y 600 ppm (tomado de Figure 10.26 de IPCC, 2007, WG I)

que abarca los años 2010 a 2040, uno intermedio del 2040 al 2070 y uno tardío del 2070 al 2100.



En la Figura II-1 y **Error! Reference source not found.**, se presentan las proyecciones de temperatura y precipitación asociadas al escenario A2 respectivamente.

De acuerdo a los resultados presentados, se puede concluir que:

- Ambos escenarios muestran aumentos de temperatura para todo el país pero de manera más clara para la zona del altiplano. Para el período tardío, ambos escenarios pronostican aumentos de temperatura, no obstante, en el A2 se muestran los aumentos más altos, en torno a los 3-4°C, en comparación con el escenario B2, dónde los aumentos mayores son del orden de los 2-3°C. En general, se aprecia que los aumentos de temperatura son más

evidentes a medida que se alejan de la influencia del océano (ya sea en altura o alejado de la costa).

- Con respecto a las proyecciones de precipitación, se puede ver que para el período temprano se proyecta un descenso de precipitaciones en la zona altiplánica, en el norte chico y en algunas regiones aisladas en el centro sur del país. En el período intermedio, ambos escenarios proyectan aumentos de precipitación en la región de Magallanes y disminución de precipitaciones entre las regiones de Antofagasta y Los Lagos, sin embargo, los cambios son más acentuados en el escenario A2. Para el período tardío, ambos escenarios proyectan de manera similar, aumentos de precipitación en el extremo austral y el altiplano, y un mismo rango de zonas con descenso de precipitación (nuevamente, entre Antofagasta y Los Lagos). Aún así, el escenario A2 nuevamente muestra los descensos más pronunciados para esta última zona, con valores entre -30 y -40 %.

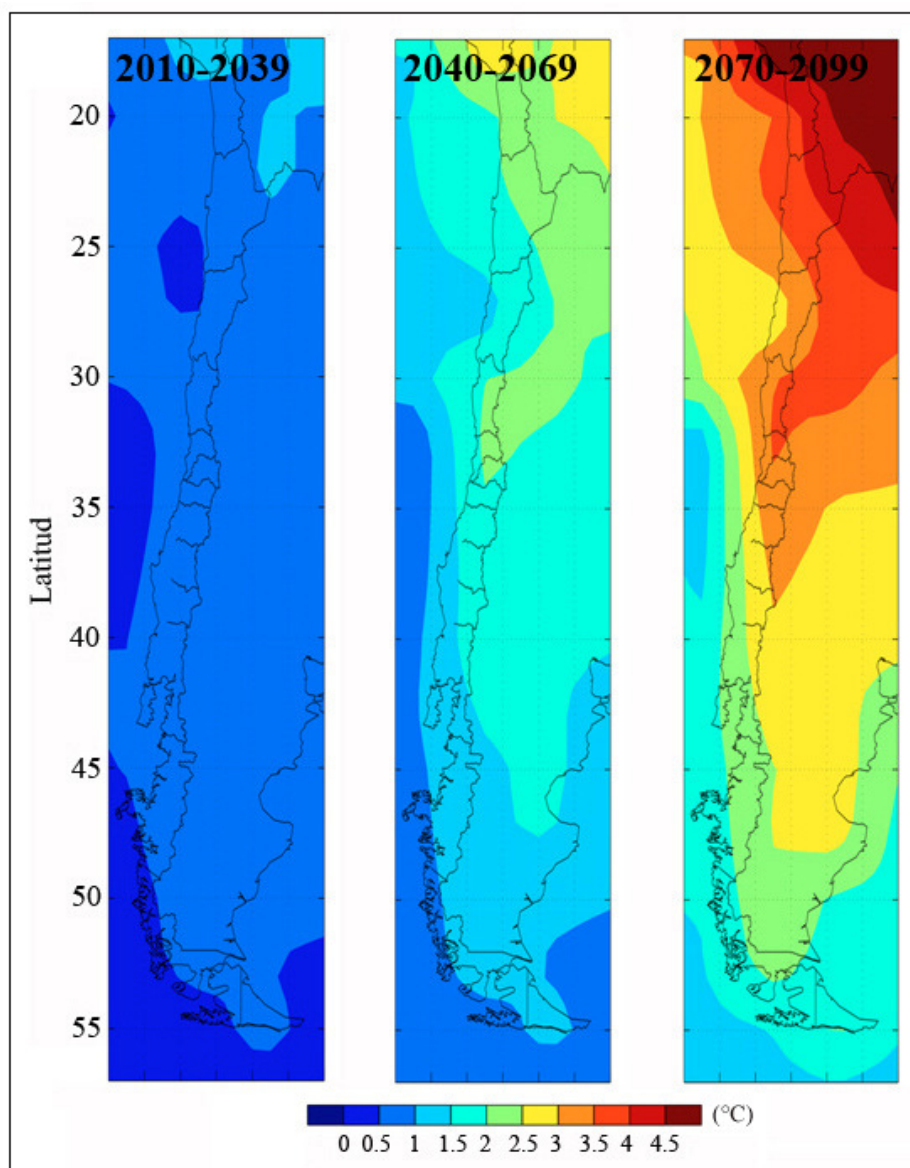


Figura II-1: Proyecciones de Temperatura para el escenario A2 (cambios en grados C sobre base histórica). Fuente: CEPAL (2009).

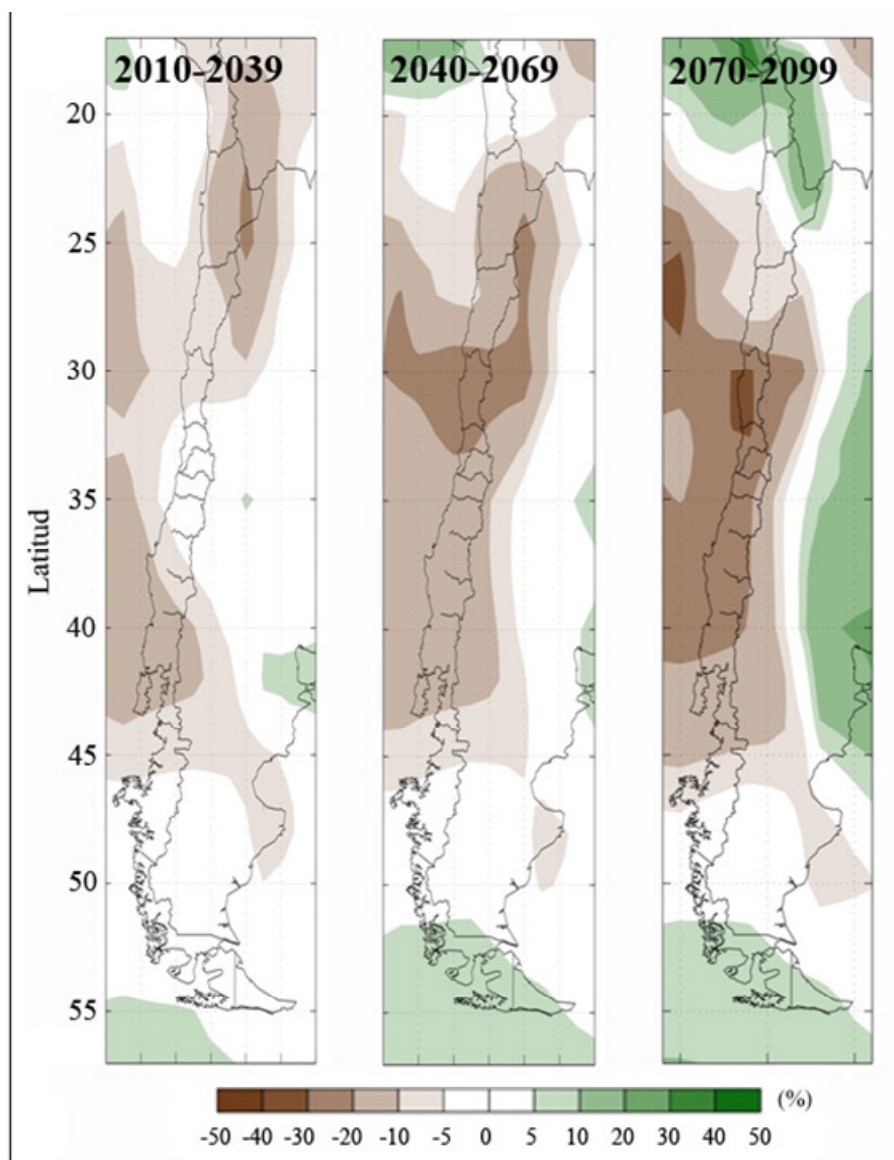


Figura II-2: Proyecciones de precipitación para el escenario A2 (cambios porcentuales sobre base histórica). Fuente: CEPAL (2009).

Considerando las proyecciones climatológicas futuras presentadas, se esperan impactos importantes en una serie de sectores en el país. La Figura II-3 tomada del trabajo de CEPAL (2009) presenta de manera esquemática estos impactos, los que se pueden resumir en los siguientes puntos principales:

- Se proyectan impactos negativos para el desarrollo de la agricultura y producción forestal en la zona centro-norte del país pero beneficios en la zona sur. Se proyecta un efecto en la productividad de cultivos en las zonas agrícolas, variando de manera significativa según cada Zona. Aumentos de temperatura y disminución de precipitaciones en algunos sectores (Sur, Centro-Sur) serían provechoso gracias a la incorporación o desarrollo de nuevas especies propias de otras zonas. En estas regiones, los efectos de las heladas y del invierno serán menores lo que dará espacio a aumentar la productividad. Sin embargo otras zonas agrícolas de Chile, como el centro norte y el norte costero verán mermada considerablemente su productividad debido a la disminución de precipitaciones.
- Se proyectan disminuciones en la disponibilidad de agua para la generación hidroeléctrica y en la disponibilidad de recursos hídricos en la zona centro-sur del país (en la próxima sección se entregará con más detalle los impactos esperados en las condiciones hidrológicas en diferentes cuencas del país).
- Se proyectan impactos en la biodiversidad. Estudios realizados por el Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB) y el Centro de Cambio Global UC muestran que los impactos del cambio climático generan un desplazamiento del hábitat idóneo, y por ende de las especies, hacia el sur y hacia sitios de mayor elevación. Junto con esto, se estima que se producirían importantes efectos negativos sobre la adaptación de las especies ante el cambio climático debido a la intervención y fragmentación del paisaje debido a la utilización humana del suelo. Esto es particularmente importante en la zona centro sur y sur del país.
- No existe información todavía con respecto a los potenciales impactos en sectores como salud, pesca, infraestructura.

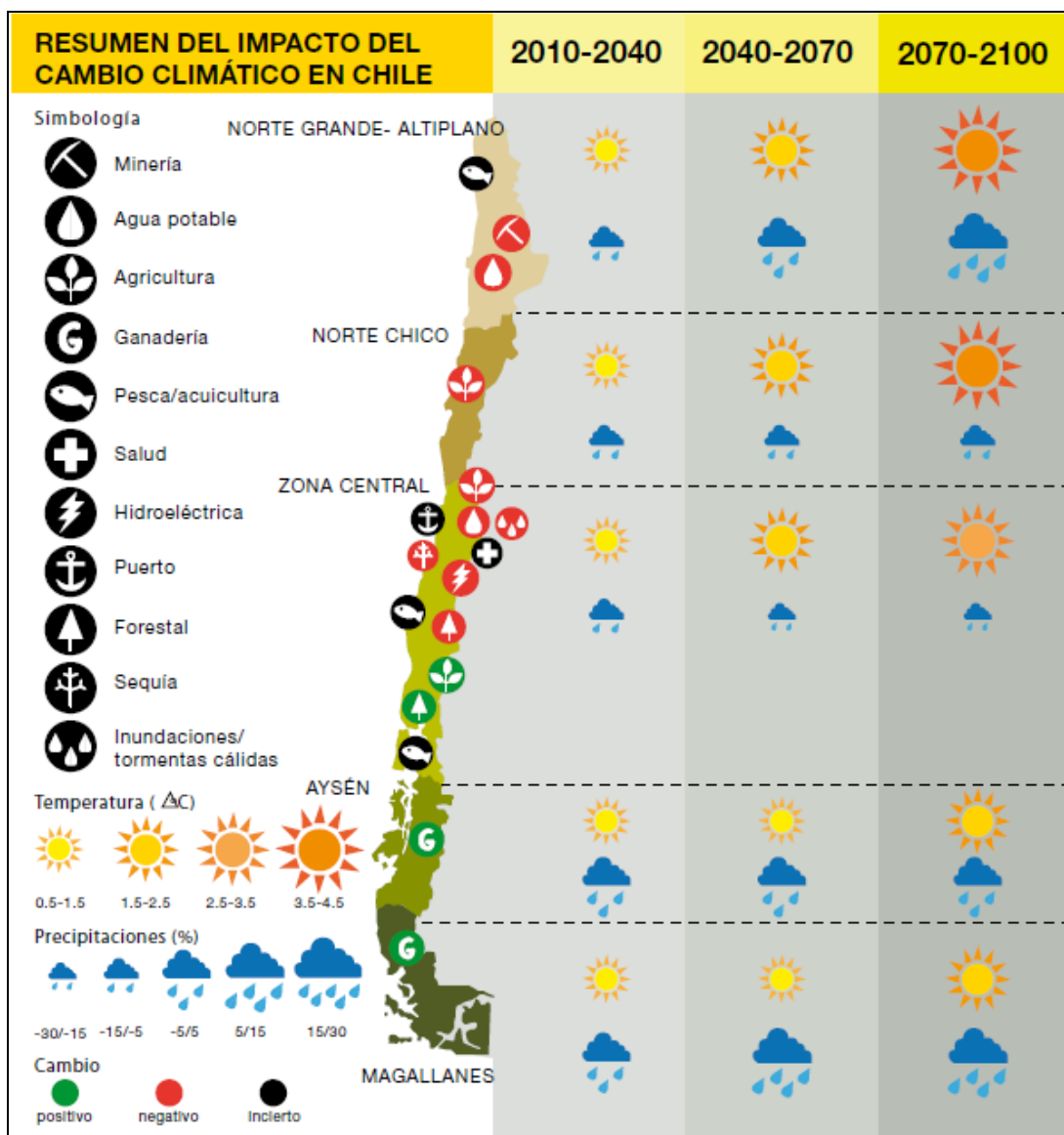


Figura II-3: Impactos esperados del cambio climático en Chile.

Fuente: CEPAL (2009)

Agentes de cambio global

El cambio global hace referencia al conjunto de cambios ambientales, afectados por las actividades humanas, con énfasis en aquellos cambios que determinan el funcionamiento del sistema tierra y que tienen el potencial de retroalimentarse e influirse mutuamente. El crecimiento poblacional y el desarrollo económico son los agentes más poderosos de cambio, ya que determinan la demanda por servicios ambientales desde el territorio. Estos agentes son

responsables, en primer lugar, de procesos que alteran los ciclos biogeoquímicos (Carbono, Fósforo, Nitrógeno, etc.) y que posteriormente influyen en el cambio climático.

Por otra parte, estos elementos también generan una aceleración de los cambios de uso del suelo y de cobertura con el fin de satisfacer las demandas del desarrollo. El Cambio de Uso del Suelo (CUS) se refiere a las actividades humanas de deforestación/reforestación, expansión/abandono de tierras agrícolas y urbanización. Este proceso ha resultado ser de gran importancia y ha sido responsable de perturbaciones significativas como son los cambios en los niveles de sedimentos y erosión en las cuencas y la pérdida de biodiversidad en el planeta.

Adicionalmente, el CUS influencia las tasas de flujo de evapotranspiración desde la superficie a la atmosfera y altera la capacidad de retención de humedad del suelo, el caudal y demás respuestas hidrológicas, con variaciones regionales (Jones y Post, 2004); así mismo, estas alteran la frecuencia e intensidad de eventos hidrológicos extremos, como inundaciones o aludes, entre otros (VanShaar et al., 2002; Brath et al., 2006). Los impactos del CUS sobre la hidrología pueden resumirse en dos tipos

1) Procesos de deforestación/reforestación

Las alteraciones sobre el ciclo hidrológico, resultantes de procesos de deforestación/reforestación pueden verse expresadas en: a) Incremento de frecuencia en inundaciones y sedimentación en zonas de deforestación; dado que se reduce la interceptación y se simplifica la red de drenaje, lo que aumenta la velocidad de flujo de agua, causando un aumento en la potencia erosiva y mayor arrastre de sedimentos; b) cambios en la evapotranspiración y aumento de escorrentía con mayor transporte de sedimentos y pérdidas de suelo; c) reducción de caudales en regiones que han sufrido expansión de plantaciones forestales exóticas de rápido crecimiento; esto asociado a mayores tasas de evapotranspiración en relación a las especies forestales lo cual reduce el agua de infiltración y recarga para escurrimiento en la cuenca.

2) Patrones de urbanización

La urbanización afecta el ciclo hidrológico mediante la alteración de la precipitación, evaporación y evapotranspiración; además es normal observar mayor extracción de agua para el uso urbano, por lo que se reduce la infiltración e intensifica la escorrentía. Al incrementar la cantidad de superficie impermeable es la manera más directa que la urbanización reduce la habilidad de una cuenca a interceptar, retener e infiltrar la lluvia.

En su conjunto el Cambio Climático y los Cambios de Uso del Suelo son los principales componentes del cambio global que impactan entre otros, la biodiversidad y alteran el régimen hidrológico de cuencas (Ej. escorrentía superficial, frecuencia de inundaciones y sequías, etc.).

En las últimas décadas hemos observado un crecimiento poblacional muy importante en Chile pasando de cerca de 11 millones a 17 millones de habitantes entre 1980 y 2010. Si bien, la tasa de aumento se ha reducido y se espera que se estabilice en los próximos años, este incremento notable de la población trae consigo demandas de servicios ecosistémicos muy importantes. Asociado a esto, Chile ha mostrado un crecimiento económico en el mismo periodo de 2.767 dólares per cápita (PPP) a casi 13.700 en el 2007. Este aumento de casi cinco veces, ya sea por el lado de la producción o del consumo, está asociado a una mayor demanda de energía, alimentos, productos y servicios que tienen por resultado una mayor presión sobre los recursos naturales y genera cambios ambientales de gran significancia.

II.2 Cuencas estratégicas para Arauco

Escenarios con reducción en precipitación y aumento en temperatura como se proyectan para Chile en el futuro pueden tener profundos impactos en las condiciones hidrológicas de las diferentes cuencas hidrográficas. Los principales impactos se resumen en los siguientes puntos generales (CEPAL, 2009):

- En las cuencas ubicadas entre el paralelo 30 y 42°S (zona que abarca entre la Región de Coquimbo y de Los Lagos, aproximadamente) se esperaría una disminución de los caudales disponibles (efecto de la precipitación) y un cambio en la temporalidad de los caudales (efecto tanto de la precipitación como de la temperatura). También se esperaría una disminución importante del hielo acumulado en los glaciares que se encuentran hoy presentes en estas cuencas.
- Para el extremo austral del país (entre los paralelos 50-55°S) se esperaría un aumento en los caudales disponibles y un cambio en la extensión de las masas de hielo cuyo sentido va a depender de los cambios relativos de radiación, temperatura, precipitación y de otras variables que influyen en su desarrollo.
- La situación en el extremo Norte del país (cuencas endorreicas y altiplánicas) es más ambigua. De acuerdo al escenario utilizado en CEPAL (2009) se pronostica una disminución de la precipitación a principios de siglo y un aumento de la misma a finales. Esto implica una clara baja en la disponibilidad de recursos en el período cercano pero no es completamente clara la situación en el período futuro producto del efecto que podrían tener cambios en la evaporación de agua asociadas a los aumentos de temperatura.
- También se esperaría un aumento en la demanda de agua en la cobertura vegetal natural y en cultivos bajo riego, producto del aumento en las demandas evaporativas asociado a un aumento en temperatura y radiación.

El efecto en las cuencas de la zona Centro Sur del país (entre 30 y 42°S) se presenta de manera grafica en la Figura II-4. En esta figura se puede ver para distintos ejemplos en el país (desde la cuenca del Río Limarí en la Región de Coquimbo hasta la cuenca del Río Cautín en la Región de la Araucanía) como se reduciría en el futuro la disponibilidad de agua. Es interesante destacar que esta pérdida de agua es más evidente en los meses de primavera y verano para aquellas cuencas de régimen nival. Este último es un efecto esperado del aumento de temperaturas y la menor acumulación de nieve en la cordillera.

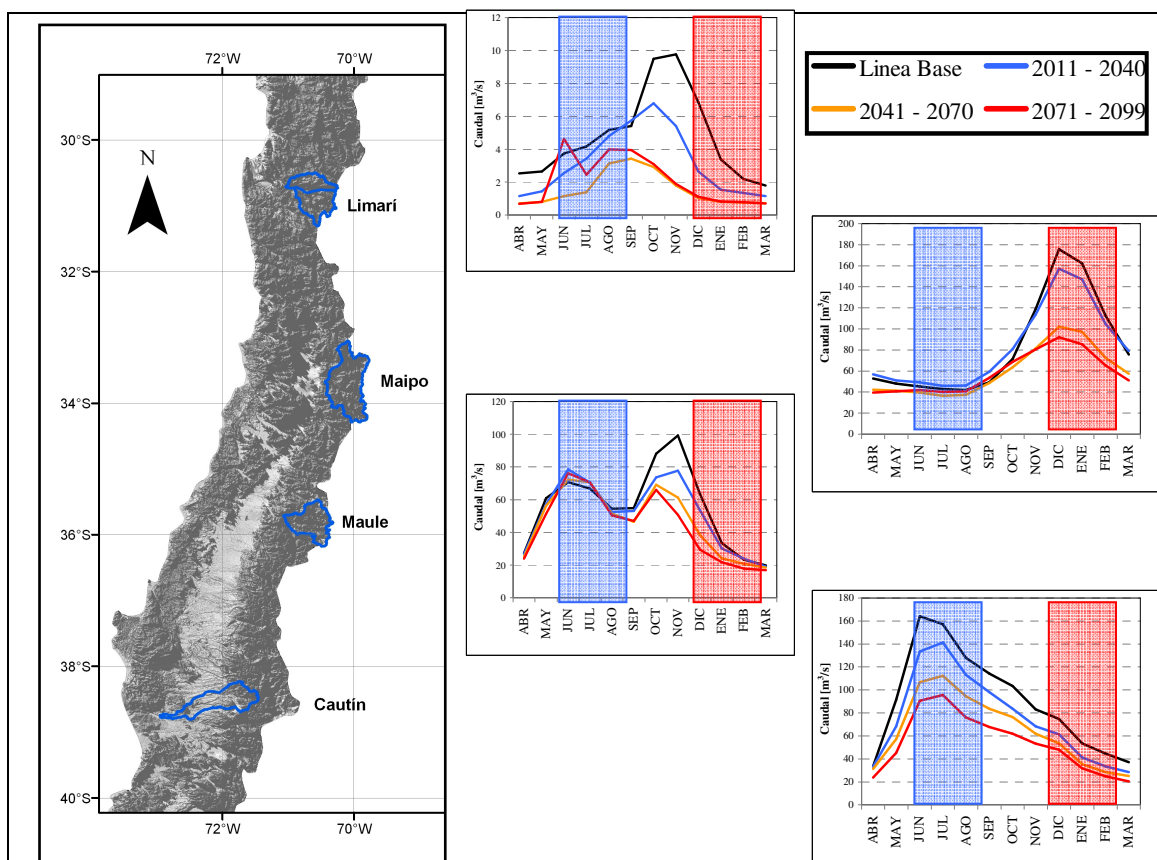


Figura II-4: Impactos esperados del cambio climático en diferentes cuencas hidrográficas en Chile.

Estos cambios finalmente se traducen en impactos en la demanda y oferta de agua y por lo tanto en el uso de recursos hídricos para diferentes sectores del país. Resulta importante en este sentido evaluar de manera indicativa cuales serian los potenciales impactos que evidenciarían las cuencas estratégicas para la empresa Arauco, donde se encuentran sus plantas de celulosa. De norte a sur estas cuencas son la cuenca del Mataquito y Maule (ambas en la Región del Maule), la cuenca del Itata y costera de Arauco (ambas en la Región del Bío-Bío) y la cuenca del Río Cruces (ubicada en la Región de Los Ríos). Es de esperar que los impactos que afecten a la cuenca del Maule se asociaran tanto a dicha cuenca como a los potenciales impactos en la cuenca del Mataquito y del Itata. En este sentido en estas cuencas se esperaría una reducción en los caudales durante los meses de primavera y verano. Producto del aumento del derretimiento temprano de nieves acumuladas en la cordillera no se esperarían cambios importantes en los caudales en los meses de invierno. La situación que se espera afecte la cuenca costera de Arauco

sea una en que se reduzcan los caudales en los meses de invierno (esta es una cuenca netamente pluvial por lo tanto con poco caudal en los meses de primavera y verano). Algo similar a lo que se proyecta para el caso del Río Cautín ocurriría en la cuenca del Río Cruces. Es decir, una disminución en los caudales de los meses de invierno.

Se espera para el futuro en general una situación compleja en cuanto a la disponibilidad de agua en los meses de primavera y verano para todas las cuencas estratégicas de Arauco. Esto también podría afectar la capacidad de dilución de descarga de residuos líquidos desde las plantas de celulosa localizadas en estas cuencas. En las cuencas con aporte nival es probable también que ocurran aumentos en caudales en meses de otoño e invierno producto del derretimiento temprano de nieves que se acumularían en la cordillera producto del aumento de temperaturas.

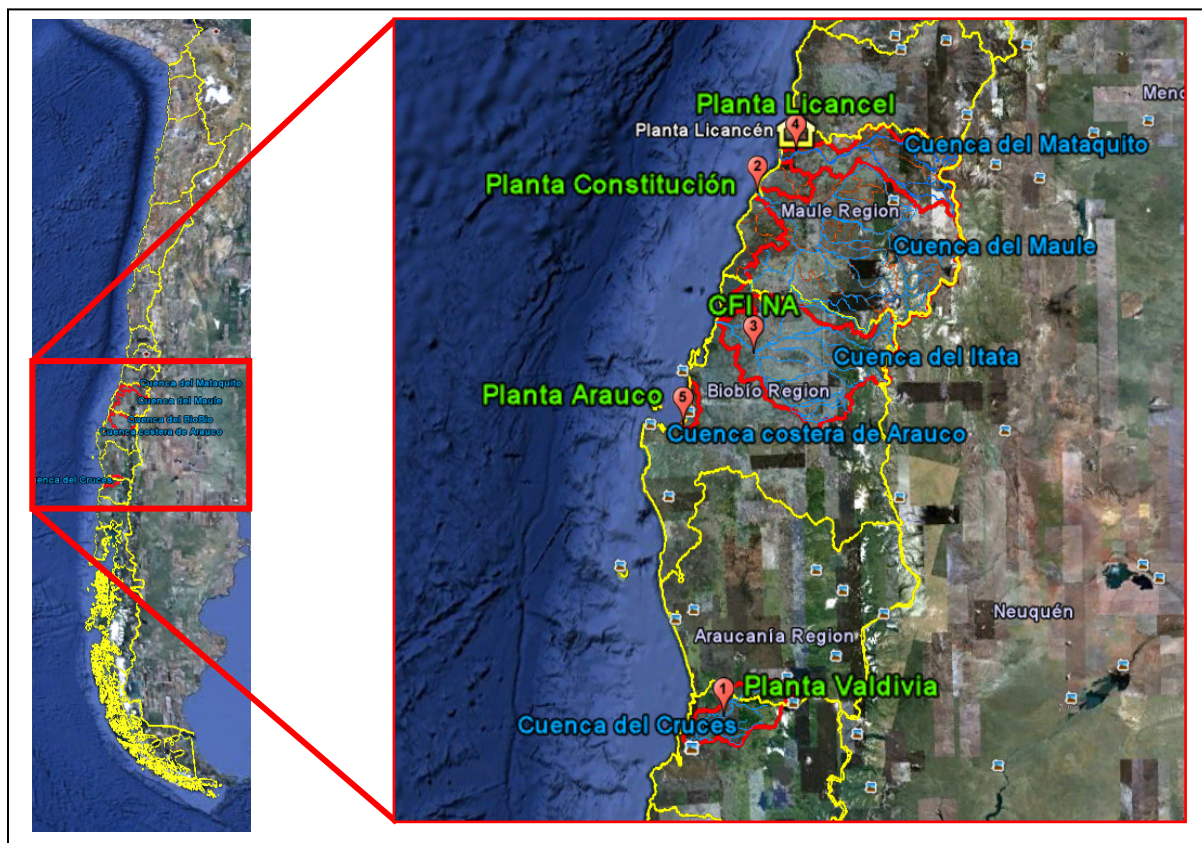


Figura II-5: Ubicación cuencas estratégicas para Arauco.

II.3 Plantaciones y sistemas naturales

En términos ecológicos el clima es el mayor determinante de la distribución y productividad forestal, afectando cada uno de los aspectos de manejo, desde la plantación hasta la cosecha (Kimmins, 2004).

Si bien la productividad de ecosistemas forestales depende en último término de la cantidad de radiación solar absorbida existen otros factores que determinan la productividad primaria. Todas las plantas necesitan luz solar, dióxido de carbono y agua para la fotosíntesis, sin embargo, más allá de estos “*drivers*” primarios, la cantidad de follaje, la eficiencia en el uso de la luz de este follaje, la disponibilidad de agua, la temperatura ambiente, la disponibilidad de nutrientes y la adaptación a temperaturas extremas constituyen controles más finos de la productividad forestal. Los factores primarios de la productividad forestal (temperatura, radiación y agua) interactúan imponiendo restricciones complejas a la actividad de las plantas.

En este sentido está bien documentado que las respuestas fisiológicas de la vegetación a cambios en el clima son altamente dependientes de los factores limitantes al crecimiento en un determinado sitio y la literatura recoge el testimonio de la influencia de factores como temperatura, precipitaciones y niveles de CO₂ en la productividad forestal. La mayor parte de las experiencias documentadas sobre la interacción entre el clima y la productividad primaria se ubican en el hemisferio Norte, pero las tendencias son absolutamente aplicables a los bosques en el Sur.

La evidencia acumulada sobre la influencia del clima en la productividad forestal permite afirmar que con seguridad debemos esperar cambios en la productividad y distribución de los bosques si aceptamos que en el futuro habrá un cambio sustancial en el clima. Asimismo, el análisis de las respuestas de la vegetación a estos cambios esperados en el clima debe apoyarse en la evidencia de las respuestas observadas en la vegetación en estudios de campo o estudios experimentales en los que los factores primarios de crecimiento hayan sido o bien observados o manipulados y registradas junto con alguna medida de productividad primaria. Los mecanismos

básicos de crecimiento no cambian, lo que se espera que cambie son las condiciones en las que se desarrollarán nuestros ecosistemas forestales.

Chile tiene una superficie de 15,9 millones de hectáreas de bosques de los cuales 13,6 millones son bosques naturales y 2,3 millones plantaciones comerciales, principalmente pino radiata y eucaliptos. Estos bosques están concentrados entre las regiones del Maule y de Magallanes, donde los cambios climáticos esperados indican aumentos en temperatura en superficie (calentamiento). En el caso de las precipitaciones el escenario es más complejo. La tendencia general en las áreas de distribución de los bosques en Chile Central (31°-37°) indica una disminución de los montos, siendo más marcada hacia la cordillera de los Andes. En la Región Sur (37°-45°) se esperan también reducciones en precipitación pero en menor medida, siendo estas disminuciones mayores durante el verano y primavera, y muy leves en otoño e invierno. Finalmente en la Región Austral (45°-55°) se esperan solamente disminuciones estivales leves en precipitación.

Los tipos forestales de Chile Central están en general adaptados a condiciones de sequía estival, y lo mismo puede decirse de las especies comerciales más importantes que se plantan en Chile (pino radiata y eucaliptos). En el caso de las especies nativas de las zonas Sur y Austral, las adaptaciones están relacionadas principalmente con bajas temperaturas y condiciones de saturación de agua en el suelo.

Las evaluaciones hechas por AGRIMED (2008) indican que para pino radiata en la zona de Chile Central se esperan disminuciones moderadas en la productividad principalmente por efecto de la disminución de las precipitaciones en esta zona (Figura II-6). Esta disminución se prolonga por el valle central hasta la latitud de Collipulli (38°). En ambas cordilleras y en la costa se predicen aumentos en la productividad en una zona que comienza en cerca de Concepción y se prolonga hasta la latitud de Temuco. Para eucaliptos la situación es la misma en el valle central hasta cerca de Temuco, es decir disminuciones moderadas de productividad. Las predicciones para la zona costera entre Santiago y Concepción y la precordillera entre Chillán y Los Ángeles indican aumentos moderados en la productividad, principalmente por el aumento de las temperaturas que es una limitante relevante al desarrollo de los eucaliptos en estas zonas,

especialmente en altura. Para ambas especies en las Zonas Sur y Austral — desde Temuco hasta el extremo Austral— las predicciones indican aumentos en productividad que van desde moderado a alto, principalmente por los aumentos en temperaturas y que en esta zona las precipitaciones no parecen ser un factor limitante al desarrollo de estas dos especies.

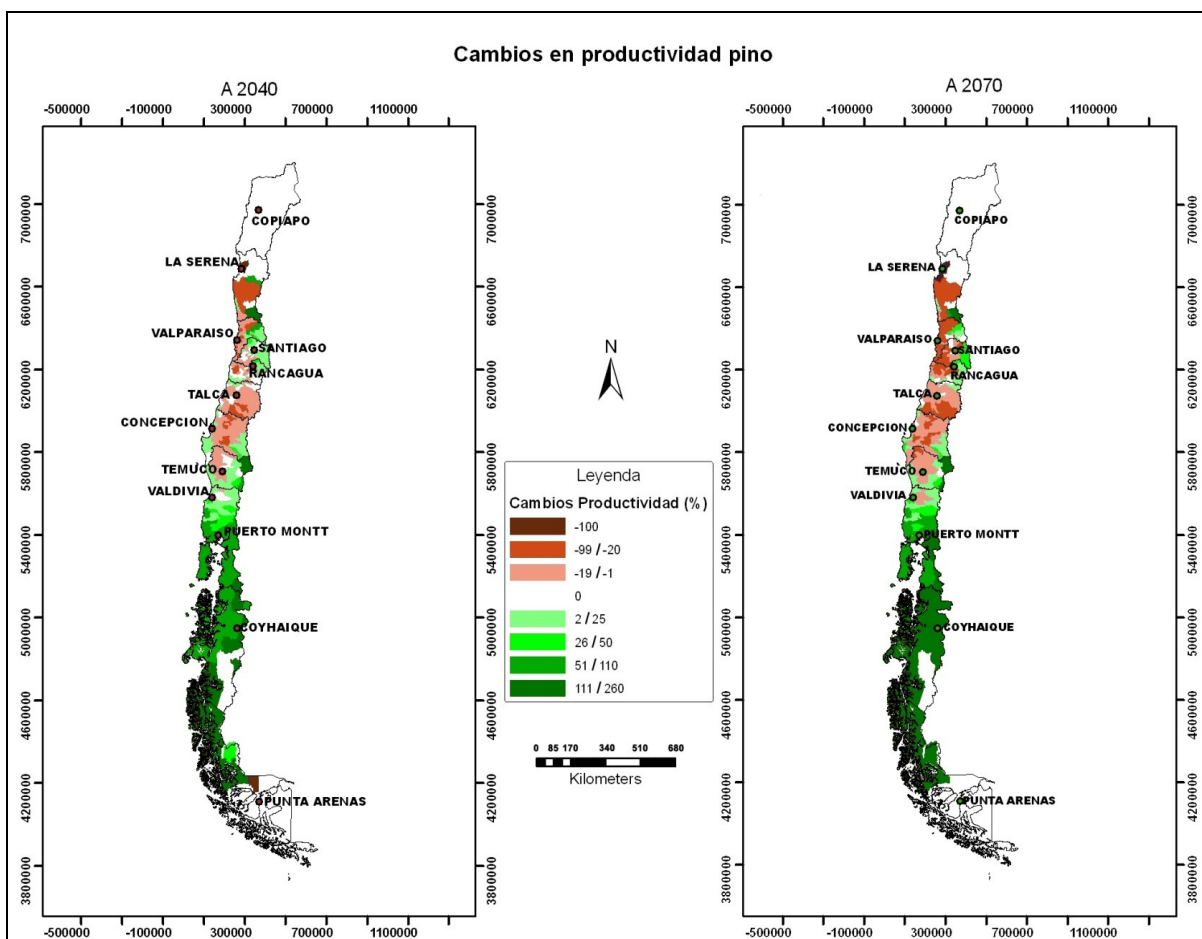


Figura II-6: Resultados de cambios en la productividad de pino para escenario A2 en el período intermedio (2040) y tardío (2070). Fuente: AGRIMED, 2008

En el caso de las especies y ecosistemas de bosques naturales no hay estudios que muestren los impactos del cambio climático en la productividad, y los efectos deberían inferirse a partir de experiencias en otras especies comparables a las que existen en Chile.

Estudios sobre la distribución esperada de especies y comunidades arbóreas características del bosque esclerófilo chileno ante los escenarios de cambio climático A2 y B2 (CONAMA, 2009; Bambach, 2010) mostró que el número de especies arbóreas disminuye y por lo tanto hay una pérdida en la riqueza de especies en este ecosistema. Se concluye de este estudio que el cambio climático tendría un impacto negativo en la distribución, estructura, composición y riqueza del bosque y matorral esclerófilo de Chile. Asimismo, estos efectos dependen en gran medida de dos factores críticos, precipitación y temperatura, en este tipo de ecosistemas que son altamente dependientes de las precipitaciones y cuyo desarrollo está condicionado por temperaturas cálidas en los meses de primavera-verano (Franklin, 1998 citado por Bambach 2010).

Respecto de los bosques templados, que corresponden a los que se pueden encontrar en el área de distribución de las plantaciones forestales y de gran parte de los bosques naturales en Chile, Boisvenue y Running (2006) en una extensa revisión de evidencia de los impactos del cambio climático en la productividad de bosques naturales reportan para los bosques europeos en el período 1950- 1999 incrementos casi constantes en productividad (NBP: *net biome production*) desde 0.03Pg C año⁻¹ en los 50s hasta 0.14 Pg C año⁻¹ en los 90s. El análisis de datos de satélites en la Cordillera Canadiense muestra incrementos en crecimientos a lo largo del siglo 20, que se han estancado en las últimas dos décadas. Cronologías sensibles a la temperatura muestran máximos crecimientos a mediados del siglo 20 en estos sitios.

Si bien es difícil determinar una tendencia clara a escalas espaciales finas, el análisis de datos satelitales y de estudios de campo y mediciones en parcelas permanentes indican que a nivel global los cambios climáticos ocurridos en los últimos 55 años tienen un efecto general positivo en la productividad en aquellos sitios donde el agua no es limitante.

Este no es el caso de la Zona Central de Chile, donde efectivamente la disponibilidad total y estacional de agua es uno de los factores clave en la distribución y productividad de los bosques. Los incrementos esperados en temperatura pueden gatillar incrementos en déficit de presión de vapor del aire, incrementando a su vez las tasas de transpiración lo que puede tener efectos muy negativos en las zonas más áridas.

Por otro lado la temperatura controla el metabolismo de las plantas, lo que determina las tasas de fotosíntesis. La mayor parte de las actividades metabólicas ocurren en el rango 0-50° C, las temperaturas óptimas para la productividad primaria están en el rango 15-25° C y los procesos letales ocurren sobre los 44° C (Boisvenue y Running 2006). Tomando en consideración estos rangos es esperable un efecto moderado de los incrementos en temperatura en la productividad de los bosques de la zona central, sin llegar a ser letales. Este efecto dependerá en gran medida de la interacción con las disminuciones en precipitaciones.

Las limitaciones de productividad en las Zonas Sur y Austral están principalmente asociadas a temperatura y en el extremo sur a radiación. El efecto del aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones resultarían en términos generales en un aumento de la productividad ya que por una parte se modera el efecto limitante de las bajas temperaturas y la reducción en las precipitaciones no aparece como un factor que pueda inducir un cambio negativo en productividad en zonas donde hay actualmente abundantes precipitaciones.

Humedales

Los humedales son ecosistemas claves en las dinámicas del ciclo del carbono ya que muchos de ellos son considerados como importantes sumideros de carbono, a pesar de las altas tasas de emisión de metano (CH₄). En general estos ecosistemas poseen un potencial de secuestro mediante la formación de turberas, deposición de sedimentos, y la producción de biomasa de las plantas y constituyen en el presente importantes reservorios de carbono (Davidson and Janssens, 2006). Algunas estimaciones han determinado que estos ecosistemas contienen entre un 15-22% del carbono global terrestre (Eswaran et al., 1995; Gorham, 1991) y contribuyen con un 15-20% de las emisiones de metano a la atmósfera a nivel global (Aselmann y Crutzen, 1989).

Se sabe además que los humedales son los ecosistemas más productivos del mundo y desempeñan diversas funciones como control de inundaciones, recarga de acuíferos, control de erosión y regulación de carga de sedimentos y nutrientes. Además son generalmente zonas que constituyen un hábitat importante para numerosas especies, siendo considerados como focos importantes de biodiversidad.

En la región del Maule, se han identificado 183 humedales naturales y artificiales en la, que ocupan una superficie superior a las 27 mil hectáreas (CONAMA, 2000). Dentro de ellos se destacan los humedales que se encuentran en las desembocaduras de los ríos Maule, Mataquito y Curanipe y los humedales Los Coipos, de Putú y de Reloca.

El nivel de conocimiento sobre las influencias que tiene el cambio climático sobre el comportamiento y la funcionalidad de los humedales es aún limitado. Se estima que algunos de ellos, especialmente los costeros, serían susceptibles al aumento del nivel del mar. En otros casos serían particularmente vulnerables a las condiciones de mayor aridez y de aumento de temperatura y que a consecuencia de su deterioro se liberarían importantes cantidades de metano, generando un efecto de retroalimentación del problema del cambio climático (Burkett y Kussler, 2000). De hecho algunas estimaciones hechas por Cao et al. (1998) hablan de 90 Tg por año como emisión neta desde estos ecosistemas una vez que se producen los impactos del cambio climático.

Reconociendo su importancia en la región y la potencial disrupción que tiene el cambio climático sobre los servicios ecosistémicos que brindan los humedales, se ha iniciado un programa de investigación y cuantificación del potencial de captura de carbono del humedal Ciénagas del Name en el año 2010. El trabajo de campo ha permitido las primeras mediciones de flujos de carbono en dos momentos del año y de cuantificación de la cantidad de carbono asimilada en los suelos. (Centro de Cambio Global, datos no publicados)

Relaciones Cobertura Vegetal y Escorrentía

Se sabe que el impacto de los bosques sobre la escorrentía consiste fundamentalmente en la modificación de la forma en que estos volúmenes asociados a las precipitaciones se transforman finalmente en caudales, disminuyendo drásticamente las aportaciones superficiales y aumentando las aportaciones subterráneas.

En la región del Maule Pizarro et al. (2006) estudiaron el comportamiento del coeficiente de escorrentía instantáneo, en la cuenca del río Tutuvén. Según los autores los coeficientes de escorrentía mostraron valores mayores para la precipitación de mayor duración, y con

vegetación escasa y condición de humedad alta. Por el contrario, los valores más bajos fueron para las situaciones con vegetación plena y condiciones secas de humedad del suelo.

Huber et al (2008) muestran que los sitios cubiertos con plantaciones de pino tienden a tener mayores tasas de evaporación que aquellas con pastizal y que por ende, las plantaciones juegan un rol importante en el comportamiento de la hidrología de una cuenca. En la misma línea, Trabucco et al., (2008) señalan que el cambio de uso del suelo genera alteraciones en el ciclo hidrológico tanto en los caudales y nivel de sedimentos como en los niveles de evapotranspiración. Es interesante notar también que Pizarro et al. (2005) trabajando en la cuenca del río Purapel, no observan diferencias estadísticas en las cantidades de agua generadas por los escurrimientos en los 40 años estudiados. Los autores señalan que las variaciones observadas en las variables hidrológicas se deberían a los montos e intensidades de precipitación ocurridos y a la alta variabilidad intermensual.

Es posible que en el caso anterior, la interacción entre elementos climáticos y de cobertura vegetal, sumado a las condiciones de humedad de los suelos presenten características de mayor complejidad que las que revela el análisis causa-efecto simple, pero sí es evidente que la cobertura de suelo juega un rol importante en la provisión de servicios ecosistémicos, particularmente la calidad y cantidad de agua que se obtiene desde una cuenca.

III. ESTUDIO DE CASO EN CUENCA DEL RIO MATAQUITO

III.1 Introducción a la cuenca del Río Mataquito

La cuenca del Río Mataquito está ubicada en la zona central de Chile, en la VII Región del Maule entre los 34,5° y 35,3° de latitud Sur. La cuenca tiene una superficie aproximada de 6200 km² y es la de menor extensión de las cuencas andinas de la zona. El río Mataquito se origina de la confluencia del río Teno, que drena la porción norte del área, y del Lontué, que drena la porción sur. La conjunción se produce a 12 km al Oeste de Curicó; desde aquí el Mataquito recorre cerca de 100 km por un valle ancho en dirección al oeste hasta desembocar en el Océano

Pacífico. El Mataquito recibe afluentes de escasa consideración, los cuales en su mayoría son generados en depresiones de la cordillera de la Costa (DGA, 2004).

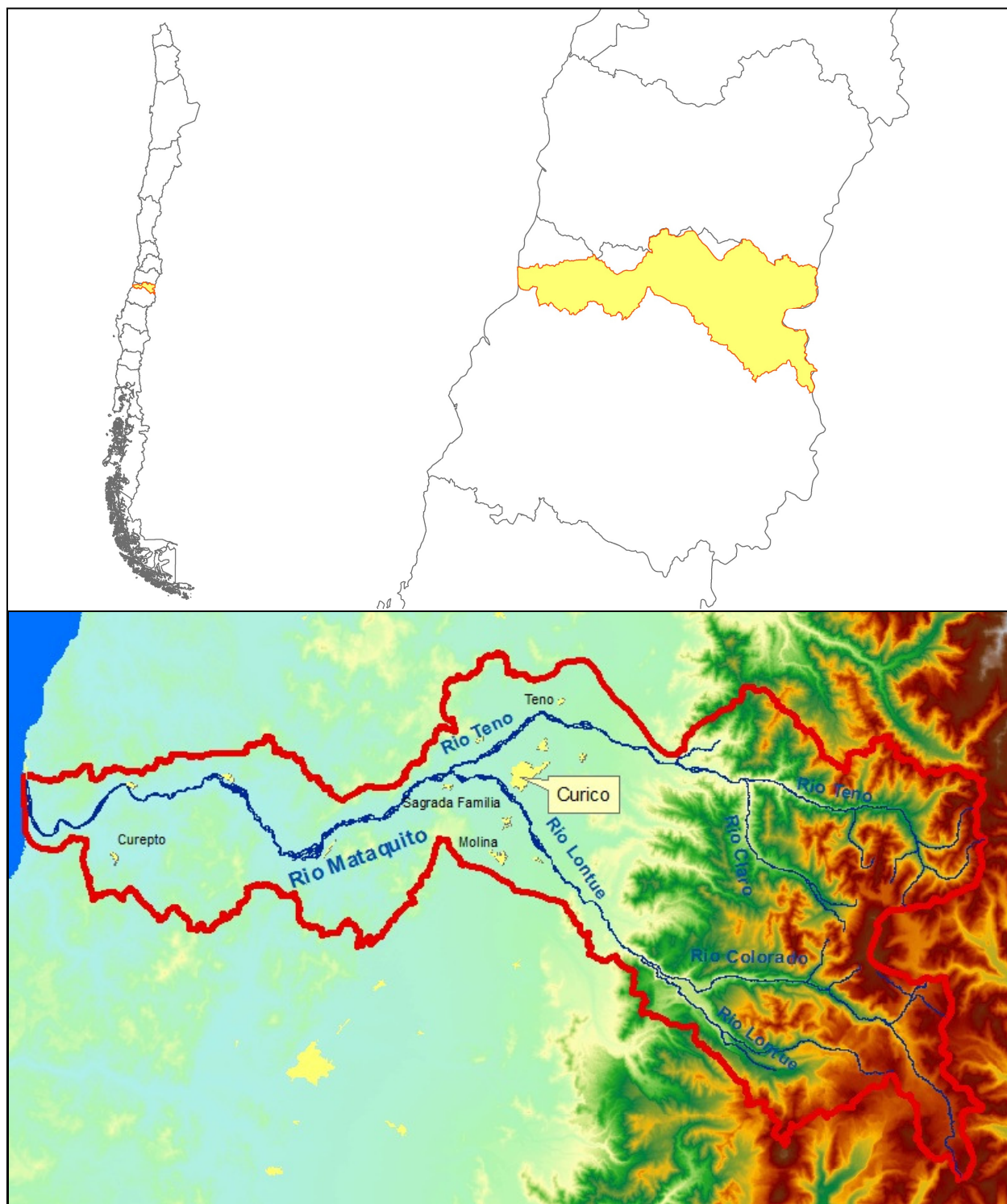


Figura III-1. Cuenca del Río Mataquito, ubicación, principales afluentes y centros poblados.

La cuenca del Mataquito se encuentra bajo la influencia de un clima mediterráneo, caracterizado por presentar al menos dos meses consecutivos de déficit hídrico durante el verano. La condición geomorfológica de la cuenca determina la existencia de ombroclimas que varían de húmedo a subhúmedo. Las variaciones pluviales junto con las diferencias térmicas que ocurren en la cordillera andina, definen dos bioclimas en la cuenca del Mataquito:

- Mediterráneo pluviestacional – oceánico, el cual influye en los sectores costeros, la Cordillera de la Costa, el Valle Central y los pisos inferiores de la Cordillera de los Andes, bajo los 2.000 m.s.n.m.
- Mediterráneo pluviestacional – continental, el cual determina el clima de las zonas andinas altas por sobre los 2.000 m.s.n.m., donde el régimen ombrotérmico está dado por el efecto que ejerce la altitud sobre la continentalidad.

Las características de continentalidad en el Valle Central y la Precordillera provocan que los contrastes térmicos sean más acentuados que en la costa. La temperatura media anual es de 19° C, con una máxima de 30° C y una mínima de 7° C. El período seco es de seis meses y la precipitación promedio anual es de 740 mm anuales (DGA, 2001).

En términos generales, la cuenca del Río Mataquito muestra usos In situ y usos extractivos. Mientras los primeros están fuertemente ligados a actividades de recreación y la preservación de ecosistemas y el desarrollo de la acuicultura, los usos extractivos representan la mayor proporción y reflejan los múltiples usos que tiene el agua en esta cuenca.

Entre los usos extractivos se encuentra:

- Agua potable. El uso de agua para fines domésticos tanto a nivel rural como urbano es relativamente importante. Los principales asentamientos humanos en la zona son Curicó, Teno y Sagrada Familia. El consumo total asociado a la demanda neta de agua potable es cercano a los 400 l/s, siendo la ciudad de Curicó la mayor demandante con casi 300 l/s.
- A nivel industrial destaca la presencia de la agroindustria como uno de los principales sectores. La demanda neta industrial al año 1997 fue estimada en 530 l/s. Considerando

el crecimiento del período se estima que esta debiese encontrarse en torno a los 1500 l/s actualmente.

- La actividad minera en la cuenca es relativamente menor, estando concentrada en el sector alto de Los Queñes con demandas de agua asociado al Río Claro.
- Agricultura. Este es el sector dominante. A nivel nacional su consumo es del orden del 70%. El Río Mataquito cuenta con 116 canales que tienen una capacidad de irrigar a 13.600 hectáreas. En la provincia de Curicó, los ríos Teno y Lontué también tienen una profusa red de canales con una capacidad de regar cerca de 90.000 hectáreas.

III.2 Escenarios futuros para cuenca del Río Mataquito

En general, la mayoría de los estudios desarrollados en Chile, se basan en el análisis de un modelo de circulación general de la atmósfera (GCM) que permite estimar las potenciales condiciones climáticas a futuro. El modelo utilizado para la mayoría de los estudios en Chile, corresponde al GCM UKMO-HadCM3, desarrollado por el Hadley Centre for Climate Prediction and Research. Este modelo se encuentra validado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPPC, por sus siglas en inglés), y existe un importante grado de consenso en cuanto a su adecuado desempeño estimando condiciones climáticas futuras. Sin embargo, los estudios de evaluación de impactos del cambio climático, en la mayoría de los casos, requieren de una resolución espacial más detallada que la provista por los GCM. En el caso de Chile, se utilizó el modelo PRECIS como herramienta para realizar un “downscaling” espacial del modelo UKMO-HadCM3. Los resultados de PRECIS-HadCM3, son consistentes con las proyecciones realizadas por la mayoría de los GCM para la región.

En este trabajo se presenta una evaluación de los impactos del alza en temperatura y disminución de precipitaciones, como consecuencia del cambio climático, en el balance hídrico de la Cuenca del Mataquito. El objetivo principal es estimar la incertidumbre asociada a los posibles cambios en las variables climáticas que determinan la disponibilidad hídrica de la cuenca. En este contexto, son utilizados los GCM a escala de centenas de kilómetros, considerando que es la

mejor información disponible para estimar la incertidumbre asociada al fenómeno de cambio climático.

MODELOS CLIMÁTICOS

Los modelos climáticos proporcionan estimaciones cuantitativas creíbles sobre los cambios climáticos futuros, en particular, a escala continental y más allá de ésta. La veracidad de los modelos se deriva del hecho de que los modelos se basan en principios físicos aceptados y son capaces de reproducir las características observadas del clima actual y de cambios climáticos del pasado. La confianza que se tiene en las estimaciones de los modelos es mayor para algunas variables climáticas como la temperatura, que para otras como las precipitaciones.

Los modelos se sustentan en su capacidad de simular aspectos importantes del clima actual, para lo cual son evaluados comparando las simulaciones de estos con las observaciones de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie terrestre. Durante el último decenio han tenido lugar niveles de evaluación sin precedentes mediante ‘intercomparaciones’ organizadas de modelos múltiples. Los modelos han mostrado una capacidad importante y cada vez mayor para representar muchas características importantes del clima medio, tales como la distribución en gran escala de la temperatura atmosférica, de la precipitación, las radiaciones y los vientos; así como la distribución de las temperaturas oceánicas, las corrientes y las capas de hielo sobre el mar.

Los modelos pueden simular también aspectos esenciales de muchos de los patrones de la variabilidad del clima observada en todo un rango de escalas de tiempo. Algunos ejemplos de ello son el avance y retirada de los principales sistemas de monzones, los cambios estacionales de temperatura, las trayectorias de las tormentas y las franjas de lluvias, así como la variación a escala hemisférica de las presiones extra-tropicales de la superficie (‘modos anulares’ septentrionales y meridionales).

No obstante, los modelos aún muestran errores significativos. Aunque, por lo general, estos son mayores a escalas más pequeñas, aún persisten importantes problemas a gran escala. Por ejemplo, todavía existen deficiencias para la simulación de la precipitación tropical, El Niño/Oscilación Meridional y la Oscilación Madden-Julian (una variación observada de los vientos tropicales y precipitaciones en una escala de tiempo de 30 a 90 días). La razón fundamental para la mayoría de estos errores es que muchos procesos importantes a pequeña escala no pueden representarse de manera explícita en los modelos, y deben incluirse por tanto de forma aproximada cuando interactúan con accidentes de mayor escala. Ello se debe en parte a las limitaciones de la capacidad de procesamiento, pero es también el resultado de limitaciones en cuanto al conocimiento científico o la disponibilidad de observaciones detalladas de algunos procesos físicos.

A pesar de las incertidumbres existentes, los modelos son unánimes en cuanto a la predicción que hacen del calentamiento considerable del clima por el aumento de los gases de efecto invernadero, y la magnitud de este calentamiento está en correspondencia con las estimaciones independientes, procedentes de otras fuentes, tales como las que son el resultado de cambios climáticos observados y reconstrucciones de climas pasados.

La incertidumbre asociada a los modelos globales disminuye a escalas menores, por lo que se han desarrollado específicamente otras técnicas, tales como el uso de modelos climáticos regionales o métodos de reducción gradual de la escala con el objetivo de estudiar los cambios climáticos a escalas regional y local.

Fuente: IPCC, 2007.

Metodología

La cuantificación de la incertidumbre asociada las proyecciones de cambio climático, es de vital importancia para la generación de medidas de adaptación que consideren una gama de escenarios posibles, a los cuales debiesen hacer frente los sistemas en un futuro cercano. En este estudio, se realiza un análisis de la incertidumbre de precipitaciones y temperaturas estimadas a futuro. Las estimaciones del clima futuro corresponden a 34 escenarios de cambio climático, provenientes de 17 GCMs, los que a su vez toman como dato de entrada dos escenarios de gases de efecto invernadero: A1B y B1. Los modelos considerados en el trabajo son un subconjunto de los utilizados en el último informe del IPCC. El listado de los modelos considerados se presenta en la Tabla III-1.

Tabla III-2. Modelos utilizados en el análisis de incertidumbre

Nombre Modelo	Desarrolladores - País	Escenarios
BCCR-BCM2.0, 2005	Bjerknes Centre for Climate Research, Noruega	A1B, B1
CCSM3, 2005	National Center for Atmospheric Research, USA	A1B, B1
CGCM3.1(T47), 2005	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	A1B, B1
CGCM3.1(T63), 2005	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	A1B, B1
CNRM-CM3, 2004	Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques, Francia	A1B, B1
CSIRO-MK3.0, 2001	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research, Australia	A1B, B1
ECHAM5/MPI-OM, 2005	Max Planck Institute for Meteorology, Alemania	A1B, B1
ECHO-G, 1999	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of the Korea Meteorological Administration (KMA), and Model and Data Group, Alemania/Corea	A1B, B1
FGOALS-g1.0, 2004	National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG)/Institute of Atmospheric Physics, China	A1B, B1
GFDL-CM2.1, 2005	U.S. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), USA	A1B, B1,
GISS-AOM, 2004	National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA	A1B, B1
GISS-ER, 2004	National Aeronautics and Space Administration (NASA)/Goddard Institute for Space Studies (GISS), USA	A1B, B1,
INM-CM3.0, 2004	Institute for Numerical Mathematics, Rusia	A1B, B1
IPSL-CM4, 2005	Institut Pierre Simon Laplace, Francia	A1B, B1
MIROC3.2(hires), 2004	Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japón	A1B, B1
PCM, 1998	National Center for Atmospheric Research, USA	A1B, B1
UKMO-HadCM3, 1997	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, UK	A1B, B1

Fuente: http://www.pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php

El balance hídrico del Mataquito fue estimado para un escenario base (1970 – 2000) y tres periodos futuros: 2011 -2040, 2041 2070, y 2071 – 2100. Además, se consideró en cada caso dos escenarios de emisiones de GEI; A1b y B1. Todos los análisis fueron realizados para tres puntos de la Cuenca del Mataquito, cada uno de los cuales representa la zona de cordillera, valle central y costa, según corresponde. El balance hídrico fue calculado a partir del método sugerido por la Dirección General de Aguas (DGA, 1989), en base a la Ecuación 1.

$$P + Q_{si} + Q_{ui} - E - ET_{Nat} - ET_{Irrig} - Q_{so} - Q_{uo} + \Delta S + \eta = 0 \quad (1)$$

Dónde:

P : Precipitación

Qsi : Caudal afluente superficial a la cuenca

Qui : Caudal afluente subterráneo a la cuenca

E : Evapotranspiración desde superficies de agua libre

ETNat : Evapotranspiración natural

ETIrrig: Evapotranspiración riego

Qso : Caudal efluente superficial

Quo : Caudal efluente subterráneo

ΔS : Variación del almacenamiento de agua en la cuenca

η : Término residual de discrepancia

Cada una de estas variables fue modificada siguiendo la siguiente metodología:

- Los cambios en evaporación natural son estimados primero asumiendo un cambio en la demanda por evaporación usando la fórmula de Blannay Criddle, según la Ecuación 2.

$$fDemPot = \frac{0.46 * (T + \Delta T) + 8.13}{0.46 * (T) + 8.13} \quad (2)$$

- Esta demanda potencial es ajustada de acuerdo al cambio en la disponibilidad de agua producto del cambio en precipitación. Con esto se obtiene la nueva evaporación natural de acuerdo a la Ecuación 3.

$$ET_{Nat}(fut) = ET_{Nat}(hist) * fDemPot * \frac{P(fut)}{P(hist)} \quad (3)$$

- El caudal remanente en la desembocadura del río se ajusta asumiendo cambios relativos al cambio de precipitación y la necesidad de mantener ciertos caudales mínimos en el balance hídrico (asociados a caudales ecológicos o agua que recircula en la cuenca).
- Luego se calcula la demanda evaporativa como el mínimo de dos términos: el primero equivalente a la demanda ajustada de la misma manera que para el caso de la evaporación natural y el segundo equivalente a la disponibilidad de agua en la cuenca, o sea, la

precipitación menos la evaporación natural y menos el caudal remanente en la desembocadura de la cuenca.

- Si la demanda potencial es mayor que la demanda real disponible entonces existe una restricción que se calcula de acuerdo a lo establecido en la Ecuación 4.

$$RRiego = 1 - \frac{Disp(fut)}{ETIrr(fut)} \quad (4)$$

Donde, $Disp(fut)$ es la disponibilidad de agua para riego futura.

- Finalmente, el caudal remanente en la cuenca es estimado como la precipitación menos la evapotranspiración natural y la demanda de agua para riego.

$$Q = Pp - ETNat - ETIrrig \quad (5)$$

Donde:

Q = Caudal (mm/año)

Pp = Precipitación (mm/año)

Et = Evapotranspiración (mm/año)

En el caso de los escenarios futuros, se perturbo la precipitación y temperatura actual, por las correspondientes anomalías estimadas para cada uno de los escenarios. Se estimó el cambio en caudales como la diferencia porcentual entre el caudal estimado a futuro y el caudal actual de la cuenca del Mataquito.

Además, se realizó un análisis de los cambios en el comportamiento de montos de precipitación mensual y temperatura media mensual extrema. Se comparó la curva de distribución de la serie de precipitación y temperatura media en el periodo 1980 – 2000 y 2080 – 2100 (Escenario A1b). Así también, fue estimada la frecuencia de eventos al extremo del percentil 10 y 90 hacia fines de siglo, como una medida de los cambios en recurrencia de eventos extremos hacia finales de siglo.

Resultados

El cambio climático en la cuenca del Mataquito se caracterizaría por un aumento promedio de temperatura que fluctúa entre 0.6 °C para el periodo temprano en el escenario A1b y B1 en la zona del Valle y 2.4 °C hacia fines de siglos en la zona cordillerana (Tabla III-2). En términos de precipitaciones, la tendencia es consistente hacia la disminución; fluctuando entre 10% de la precipitación actual, en el escenario B1 para el periodo temprano en todos los puntos de la Cuenca, y 29% de la precipitación actual, en el escenario A1b hacia finales de siglo, en la zona costera de la región (Tabla III-3).

Tabla III-2. Promedio de Anomalía de Temperaturas Medias Mensuales (°Celsius) de 34 escenarios en 3 periodos de tiempo para tres puntos de la Cuenca del Mataquito.

ESCENARIO	PERIODO	CORDILLERA	VALLE	COSTA
A1b	2011 - 2040	0.9	0.6	0.7
	2041 - 2070	1.7	1.3	1.3
	2071 - 2100	2.4	1.9	1.9
B1	2011 - 2040	0.8	0.6	0.6
	2041 - 2070	1.3	1.0	1.0
	2071 - 2100	1.7	1.3	1.4

Tabla III-3. Variación Promedio de las Precipitaciones Mensuales (en porcentaje) de 34 escenarios en 3 periodos de tiempo para tres puntos de la Cuenca del Mataquito.

ESCENARIO	PERIODO	CORDILLERA	VALLE	COSTA
A1b	2011 - 2040	-13%	-14%	-15%
	2041 - 2070	-19%	-21%	-22%
	2071 - 2100	-26%	-28%	-29%
B1	2011 - 2040	-10%	-10%	-10%
	2041 - 2070	-12%	-13%	-14%
	2071 - 2100	-16%	-18%	-18%

En términos de la incertidumbre asociada a los cambios, en las Figuras III-2, III-3 y III-4 es posible apreciar que tanto en la zona cordillerana, el valle, y la costa el comportamiento de las curvas de distribución estimadas a partir de los histogramas de frecuencia de los 34 escenarios evaluados para las variables de precipitación, temperatura, y caudal, presentan un comportamiento similar. En general, a medida que las proyecciones se realizan a un periodo más lejano del escenario base, la incertidumbre tiende a aumentar.

El cambio en caudales estimados, si bien esta influenciado por una disminución de precipitaciones y un aumento de temperaturas, el impacto de temperaturas es bastante moderado en comparación del impacto por cambio en precipitaciones. Cabe considerar que el análisis de incertidumbre realizado, es a escala anual, por lo que los patrones de cambio estacional no tienen ninguna influencia en el análisis realizado.

Comparativamente, el mayor decrecimiento de caudales como consecuencia de la disminución de precipitaciones y aumento de temperatura es observada en la Zona Costera, seguida por el Valle, y finalmente la Cordillera de los Andes. De este modo, es posible observar la mayor influencia de las precipitaciones en los caudales, puesto los incrementos en temperatura presentan un comportamiento inverso, proyectándose los mayores incrementos en la Cordillera de los Andes. El comportamiento, inverso, en un transepto longitudinal, de las temperaturas y las precipitaciones generan que los resultados en términos de disminución de caudales, sean bastante similares en los distintos puntos de la cuenca que fueron evaluados.

El comportamiento de la variabilidad interanual de cada una de estas variables se evalúa en la Figura III-5. En dicha Figura se comparan para los tres periodos de tiempo futuros la relación de cada año perteneciente a un escenario en particular con respecto a la situación promedio de dicha variable en la situación histórica. Se incorpora en cada panel en barras blancas la comparación de las series de tiempo históricas con dicho valor promedio lo que representa la variabilidad interanual existente en la cuenca. Se puede apreciar que como es de esperar cada uno de estos set de barras blancas (variabilidad interanual histórica) está centrado en torno a un valor de 0% (para el caso de los cambios de precipitación y caudal) y de 0°C (para el caso de la temperatura). Sin embargo, para los escenarios futuros claramente esta tendencia no existe. Destaca el caso de la

temperatura donde ya a partir del periodo 2040-2070 no existiría ningún año dentro de la serie complete con temperaturas bajo el promedio histórico. En cuanto a la precipitación y caudales se aprecia que en futuro se mantiene la extensión de la variabilidad interanual (el rango de valores se mantiene), sin embargo, la distribución se concentra en valores que muestran una disminución de ambas variables con respecto a la situación histórica. Son cada más frecuentes los años secos (que existen en el periodo histórico pero con menor frecuencia) y empiezan a desaparecer los años con altos niveles relativos de precipitación y caudales.

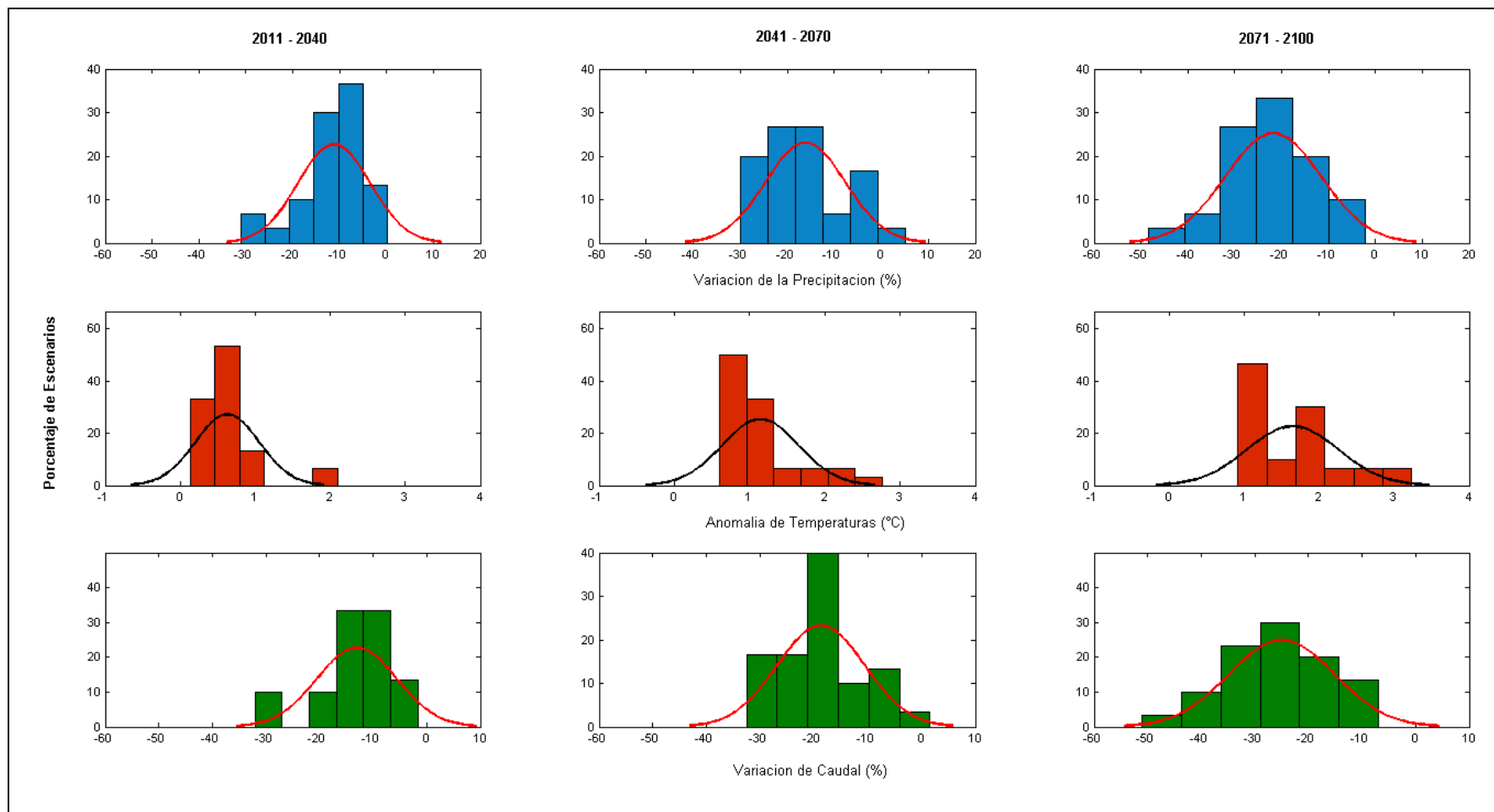


Figura III-2. Cambios en Temperatura, Precipitación y Caudales estimados por 17 GCMs, en dos escenarios de emisiones de GEI (A1b y B1), en tres periodos de tiempo, en la Zona cordillerana de la Cuenca del Mataquito.

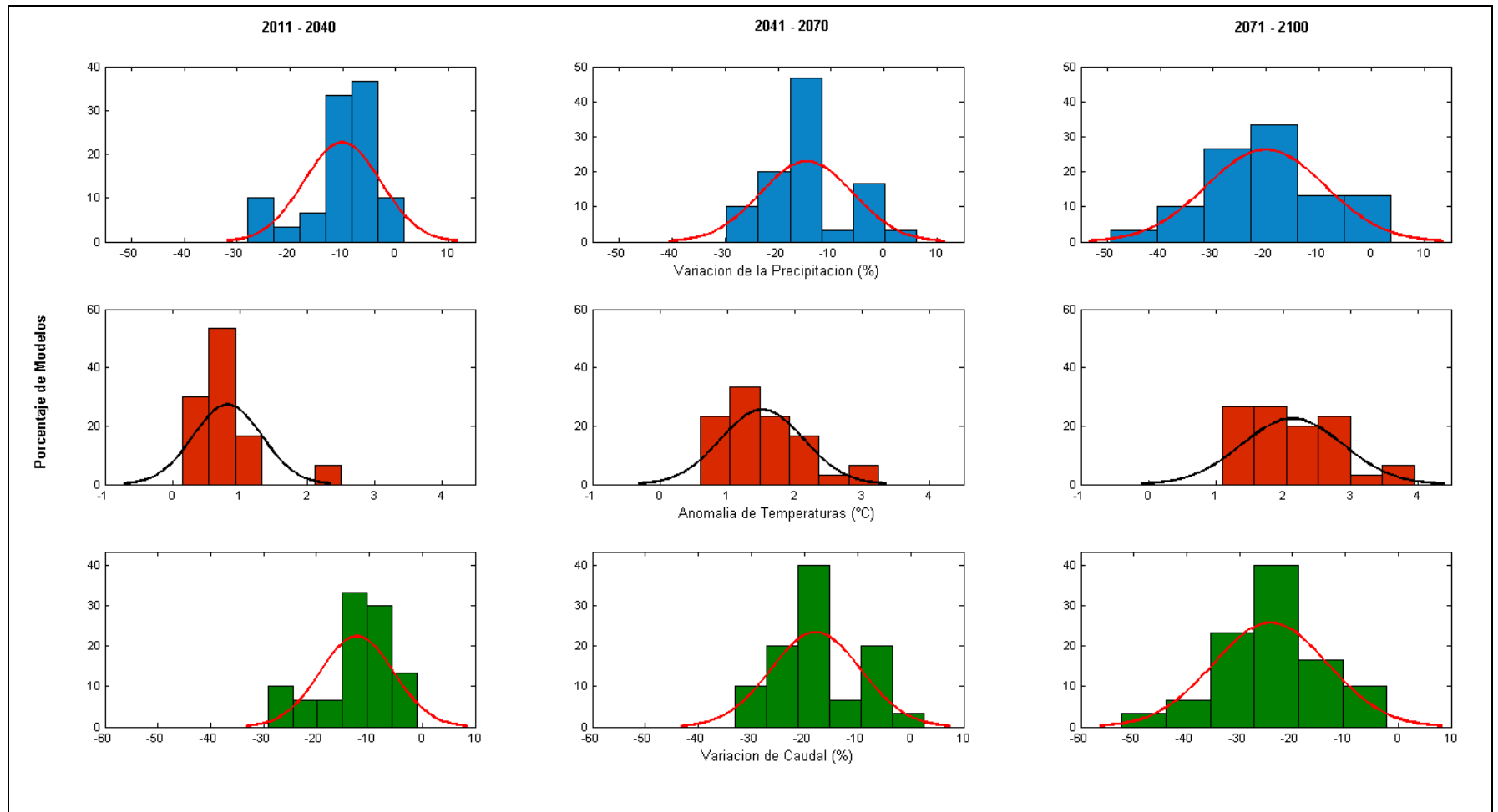


Figura III-3. Cambios en Temperatura, Precipitación y Caudales estimados por 17 GCMs, en dos escenarios de emisiones de GEI (A1b y B1), en tres periodos de tiempo, en el Valle de la Cuenca del Mataquito.

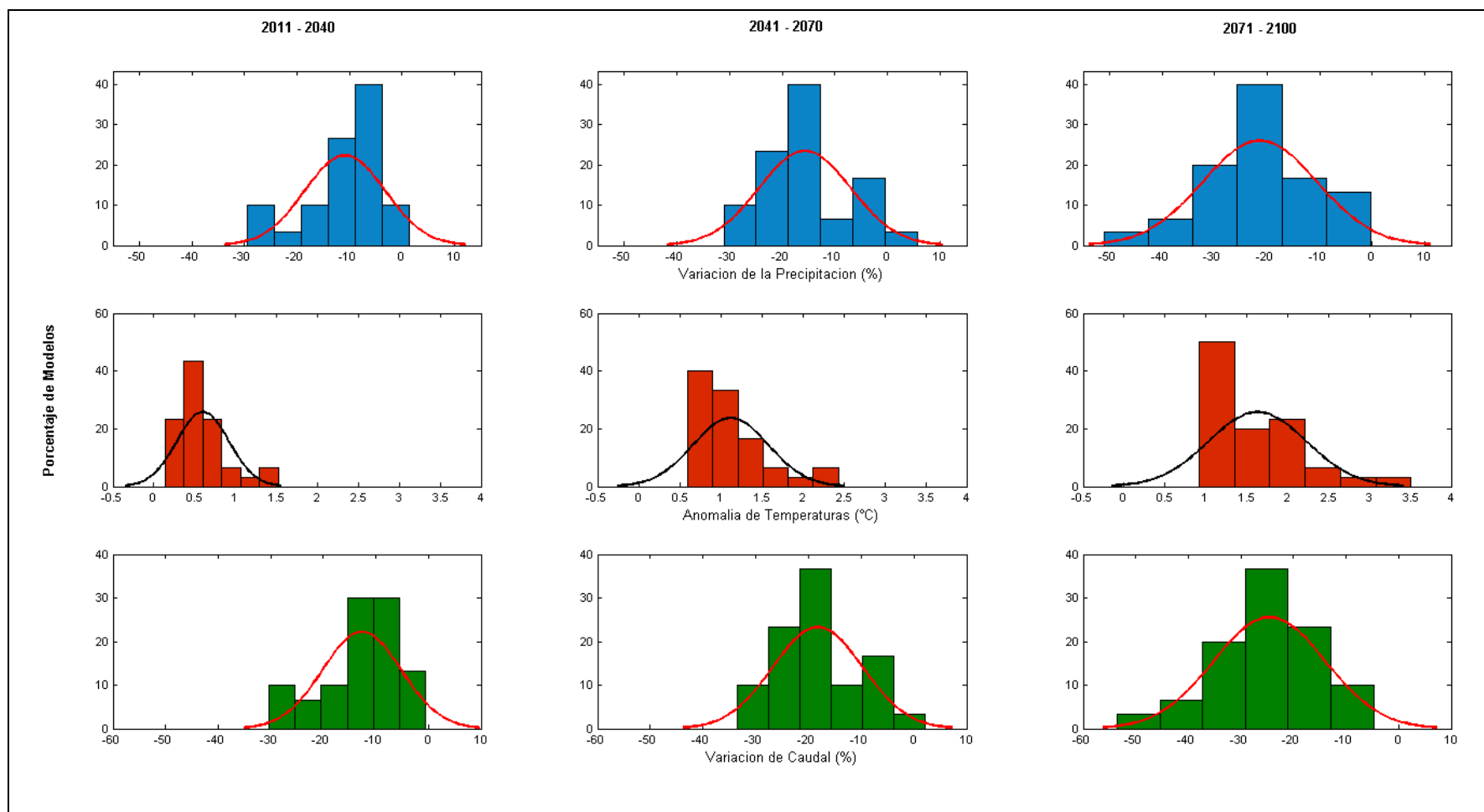


Figura III-4. Cambios en Temperatura, Precipitación y Caudales estimados por 17 GCMs, en dos escenarios de emisiones de GEI (A1b y B1), en tres periodos de tiempo, en la Costa de la Cuenca del Mataquito.

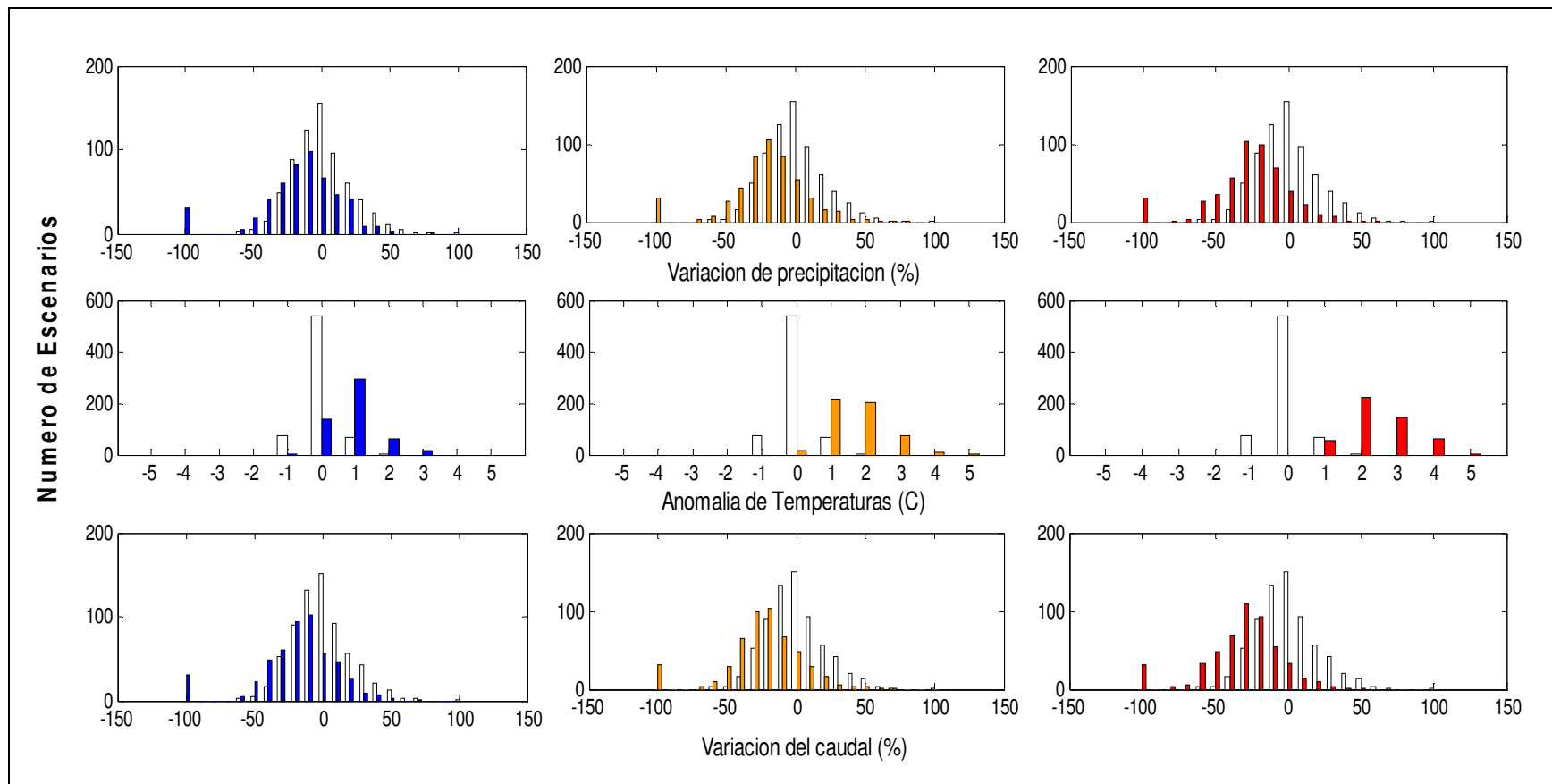


Figura III-5. Comparacion de la variabilidad interanual en escenarios historicos (barras blancas en todos los paneles) y escenarios futuros (barras de colores en cada panel) de acuerdo al escenario A1b en la zona cordillerana en la cuenca del Mataquito.

III.3 Análisis de tendencias hidroclimatológicos

En la presente sección se presenta un análisis detallado de tendencias hidroclimáticas en la cuenca del Río Mataquito durante el periodo 1976-2008. Adicionalmente se agrega un análisis de grandes crecidas, identificándose las condiciones meteorológicas al momento en que éstas ocurren.

Información utilizada

Se seleccionaron varias estaciones hidrometeorológicas administradas por la Dirección General de Aguas (DGA) tanto dentro como fuera de la cuenca del río Mataquito (Figura III-6). Estas estaciones cuentan con registros diarios de temperatura (T), precipitaciones (P) y caudales (Q), y se resumen en la Tabla junto con sus principales características, variables disponibles y la extensión considerada para cada uno de los registros. La Tabla muestra el promedio a nivel anual, pluvial (abril-septiembre) y nival (octubre-marzo) de las variables. Con respecto a la extensión de los registros, se decidió considerar el periodo posterior a 1976, empezándose después en los casos de registros más cortos. Esta extensión se debe a que diferentes estudios históricos reportan un cambio brusco de la temperatura superficial del mar entre los años 1975 y 1977 (e.g., Trenberth y Stepaniak, 2001; Giese et al., 2002; Boisier y Aceituno, 2006; Roesenblüth et al., 1997; Bown y Rivera, 2007). No existe consenso en la razón de este cambio, pudiéndose deber tanto a un fenómeno de carácter periódico o a una situación particular única dentro del siglo XX (Jacques-Coper y Garreaud, 2009). Así entonces, se evitó incorporar años anteriores a este salto climático de modo de no afectar el análisis de las tendencias recientes de las variables hidroclimatológicas.

Tabla III-4: Estaciones y variables hidrometeorológicas utilizadas en el estudio.

Estación	Latitud (grados decimales)	Longitud (grados decimales)	Elevación (msnm)	Años de Registro	Nº de años	T _{media} (°C)	T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	P (mm)	Q _{medio} (m³/s)
Curicó (DMC)	-35	-71,25	195	1976-2010	34	✓ ¹	✓	✓	✓	-
Potrero Grande (DGA)	-35,18	-71,1	445	1976-2009	33	✓	✓	✓	-	-
Potrero Grande (DGA)	-35,18	-71,1	445	1978-2009	31	-	-	-	✓	-
Colorado (DGA)	-35,63	-71,27	420	1981-2009	28	✓	✓	✓	-	-
Talca (DGA)	-35,41	-71,63	110	1982-2009	27	✓	✓	✓	-	-
Río Teno (DGA)	-35	-70,81	680	1976-2009	33	-	-	-	✓	-
El Manzano (DGA)	-34,96	-70,92	574	1977-2009	32	-	-	-	✓	-
Lontué (DGA)	-35,04	-71,29	195	1977-2010	32	-	-	-	✓	-
Santa Susana (DGA)	-34,91	-71,04	410	1985-2009	24	-	-	-	✓	-
Estero Upeo en Upeo (DGA)	-35,18	-71,1	450	1976-2009	33	-	-	-	-	✓
Río Colorado en junta con Palos (DGA)	-35,28	-71	600	1976-2009	33	-	-	-	-	✓
Río Palos en junta con Colorado (DGA)	-35,28	-71,02	600	1976-2009	33	-	-	-	-	✓
Río Teno después de junta con Claro (DGA)	-35	-70,82	647	1976-2009	33	-	-	-	-	✓
Río Mataquito en Licantén (DGA)	-35	-70,81	20	1987-2009	22	-	-	-	-	✓

T_{media} : Temperatura media diaria
 T_{max} : Temperatura máxima diaria
 T_{min} : Temperatura mínima diaria
 P : Precipitación diaria
 Q_{medio} : Caudal medio diaria

Tabla III-5: Valor medio de las variables hidrometeorológicas por estación.

	Caudal Promedio Época Pluvial (m³/s)	Caudal Promedio Época Nival (m³/s)	Caudal Promedio Anual (m³/s)
Estero Upeo en Upeo	11,3	3,2	7,2
Río Colorado en junta con Palos	34,3	58,6	46,5
Río Palos en junta con Colorado	26,6	33,7	30,1
Río Teno después de junta con Claro	49,9	64,8	57,4
Río Mataquito en Licantén	176,7	87,1	131,9
	Precipitación Promedio Época Pluvial (mm)	Precipitación Promedio Época Nival (mm)	Precipitación Promedio Anual (mm)
Curicó	679	65	744
Potrero Grande	1007	119	1129
Río Teno	1217	157	1382
El Manzano	1180	134	1316
Lontué	596	74	670
Santa Susana	722	73	796
	Temperatura Promedio Época Pluvial (°C)	Temperatura Promedio Época Nival (°C)	Temperatura Promedio Anual (°C)
Curicó	10,1	18,4	14,3
Potrero Grande	9,0	16,3	12,7
Colorado	10,1	17,3	13,7
Talca	10,4	18,6	14,5

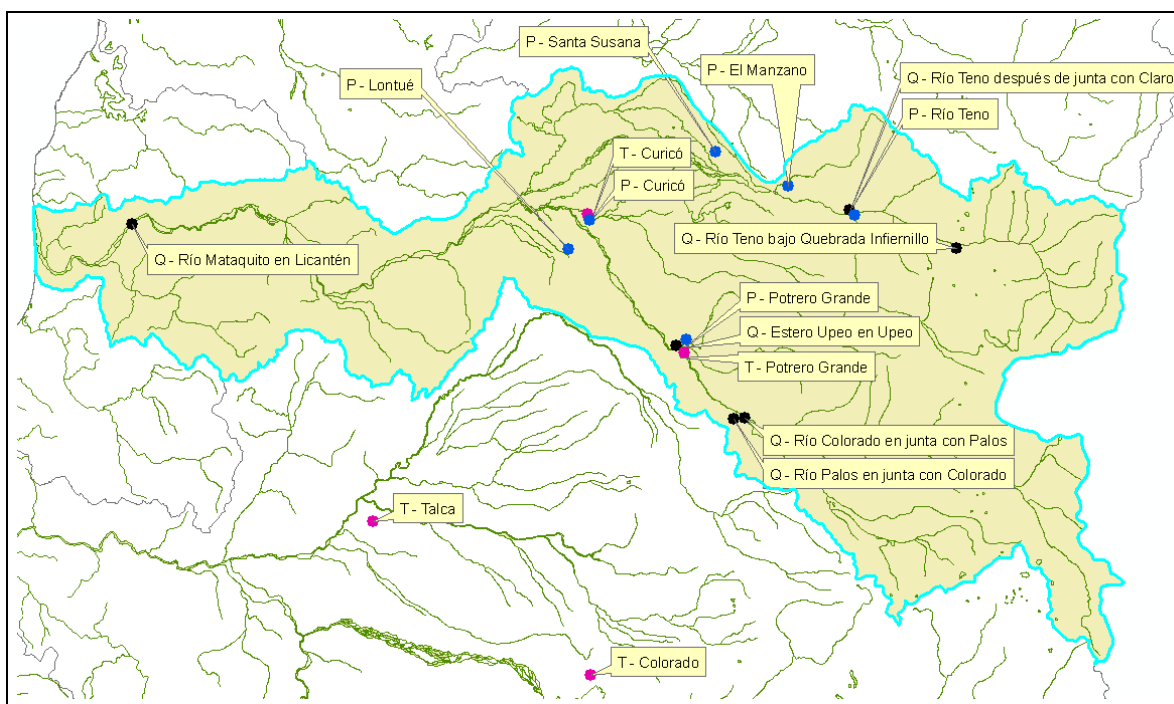


Figura III-6: Cuenca del Río Mataquito y estaciones hidrometeorológicas.

Los registros de precipitaciones y de caudales no se encuentran completos, por lo que se procedió con un relleno de los datos faltantes cuando fuese posible. Por otra parte, no fue necesario rellenar datos en ninguna de las series de temperaturas. En el caso de las precipitaciones, se rellenaron los datos del mes de noviembre de 1989 en la estación Lontué, del mes de septiembre de 1987 en la estación El Manzano, y del mes de diciembre de 1988 y octubre de 1989 en la estación Santa Susana. Este relleno se hizo mediante una regresión lineal con el registro de alguna estación cercana altamente correlacionado con el de la estación considerada (coeficiente de determinación $R^2 > 0,8$). De este modo, para el relleno de los datos en la estación Lontué se utilizó el registro entre enero de 1988 y diciembre de 1991 de la estación Portero Grande. El relleno de la estación El Manzano se desarrolló con el registro entre enero de 1986 y diciembre de 1988 de la estación Río Teno. Finalmente, las precipitaciones faltantes de la estación Santa Susana se estimaron con el registro entre junio de 1987 y diciembre de 1991 de la estación Portero Grande. Para el relleno de los caudales se utilizó un procedimiento similar, pero un poco más flexible dada la mayor falta de datos y las menores correlaciones explicadas por los efectos de la escala espacial en la propagación de caudales. En los anexos se presenta en mayor detalle la metodología utilizada y los supuestos considerados.

Finalmente, es de interés también contar con la mayor cantidad en lo referido a los caudales máximos instantáneos anuales, necesarios para elaborar un análisis de frecuencia y estimar así los caudales asociados a distintos periodos de retorno. Los caudales máximos instantáneos reportados por Aguilera (2007) están altamente correlacionados en forma lineal con los caudales máximos diarios anuales ($R^2 > 0,85$). McCuen y Beighley (2003) demostraron que los parámetros de esta relación lineal incorporan principalmente el efecto del área aportante y del uso de suelo. A través de los ajustes lineales se rellenaron los caudales máximos instantáneos anuales hasta el año 2009, con excepción de los caudales de los años 2006 y 2008, los que fueron tomados directamente del informe de crecidas del 2006 y 2008 preparado por la DGA (2008).

Evaluación de tendencias hidroclimáticas

Variables e indicadores analizados

Se calculó la tendencia en la media de la temperatura media diaria, en la media de la temperatura máxima diaria, en la media de la temperatura mínima diaria, en la precipitación diaria y en la media del caudal medio diario. Otros estudios previos ya han realizado un análisis de tendencias de estas variables fundamentales (e.g. Regonda et al., 2005; Quintana y Aceituno, 2006; Bae, 2008 y Falvey y Garraud, 2009). Por otra parte, se calculó la tendencia de otros indicadores hidroclimáticos y de eventos extremos presentados en la Tabla III-6, los cuales se construyen a partir de los registros de temperaturas, precipitaciones y caudales (Tabla III-4). Estos indicadores han sido evaluados en una serie de estudios recientes similares a este trabajo (e.g. Alexander et al., 2006; Kioutsioukis et al., 2010; Lupikasza, 2010; Taschetto y England, 2009; Pal y Al-Tabbaa, 2009; Villarroel et al., 2006; Klein Tank y Können, 2003; Fiala et al., 2010; Yenigun et al., 2008). De la Tabla se puede ver que mucho de los indicadores basados en percentiles se calcularon tanto considerando el percentil definido de la serie completa como también el obtenido de la estación o época del año de interés. Por ejemplo, el indicador Warm Days R corresponde al número de días en que la temperatura diaria máxima sobrepasa el percentil 90 del registro completo de temperaturas máximas diarias. En este caso, el percentil no cambia cuando el indicador se calcula para el año completo o para una estación en particular. Por otra parte, indicador Warm Days E corresponde al número de días en que la temperatura diaria máxima sobrepasa el percentil 90 del registro de temperaturas máximas diarias de la estación o época del año de interés. Este percentil entonces varía para cada estación del año. De este modo, el

indicador Warm Days E para el invierno requiere del cálculo del percentil 90 considerando sólo las temperaturas medidas en los meses de invierno.

Tabla III-6: Índices estudiados.

INDICE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
Max Tmax	Temperatura máxima de las temperaturas máximas	°C
Min Tmax	Temperatura mínima de las temperaturas máximas	°C
Max Tmin	Temperatura máxima de las temperaturas mínimas	°C
Min Tmin	Temperatura mínima de las temperaturas mínimas	°C
Warm Nights R	Nº días Tmin sobre percentil 90 registro	Días
Warm Nights E	Nº días Tmin sobre percentil 90 estacional	Días
Cold Nights R	Nº días Tmin bajo percentil 10 registro	Días
Cold Nights E	Nº días Tmin bajo percentil 10 estacional	Días
Warm Days R	Nº días Tmax sobre percentil 90 registro	Días
Warm Days E	Nº días Tmax sobre percentil 90 estacional	Días
Cold Days R	Nº días Tmax bajo percentil 10 registro	Días
Cold Days E	Nº días Tmax bajo percentil 10 estacional	Días
Summer Days	Nº días Tmax > 25 °C	Días
Frost Days	Nº días Tmin < 0 °C	Días
CDF	Nº días consecutivos de Tmin < 0 °C	Días
Rango	Rango Temperatura Diaria	°C
Desviación	Desviación Estándar	mm
R10mm	P mayor a 10 mm	días
R20mm	P mayor a 20 mm	días
TDD	P menor a 1 mm (días sin lluvia)	días
RX1day	P máxima	mm
RX5day	P máxima en 5 días consecutivos	mm
R95% R	Días que P>P percentil 95 registro	días
R95% E	Días que P>P percentil 95 estacional	días
R75% R	Días que P>P percentil 75 registro	días
R75% E	Días que P>P percentil 75 estacional	días
P> R95% R	Suma de P>P percentil 95 registro	mm
P> R95% E	Suma de P>P percentil 95 estacional	mm
P> R75% R	Suma de P>P percentil 75 registro	mm
P> R75% E	Suma de P>P percentil 75 estacional	mm
Qmin	Caudal mínimo de los caudales medios	m ³ /s
Qmax	Caudal máximo de los caudales medios	m ³ /s
Día Qmax	Día en que ocurre Qmax	días
Qmax inst	Caudal máximo de los caudales instantáneos	m ³ /s
Low Flow	Mínimo promedio de 7 días consecutivos	m ³ /s

El análisis de los caudales medios agrupados en estaciones del año puede complicar la detección de posibles variaciones temporales significativas en el comportamiento del régimen hidrológico. Por lo tanto se proponen otro indicador que permite caracterizar en más detalles estas posibles tendencias. Este indicador es el porcentaje del volumen total escurrido durante un cierto periodo

(Stewart et al., 2005). Finalmente se consideraron también índices de adelantamiento de la primavera propuestos y utilizados por Stewart et al. (2004), Stewart et al. (2005) y Regonda et al. (2005) y Vicuña y Dracup (2007). Estos índices caracterizan en parte el régimen hidrológico preponderante de modo que permiten identificar condiciones de adelantamiento de la primavera o época de deshielo. Los indicadores son los siguientes:

- Caudal mensual y estacional como porcentaje del caudal anual (Stewart et al., 2005)
- Día del año en que el volumen diario escurrido acumulado sobrepasa el 50% del volumen total anual (Regonda et al., 2005).
- Centro de masa de la serie anual de precipitaciones y caudales, considerándose tanto los valores mensuales como los diarios (Stewart et al., 2004). Este centro de masa es expresado como día del año y se calcula como:

$$CM = \frac{\sum_{i=1}^{12 \text{ o } 365} t_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^{12 \text{ o } 365} Q_i} \quad (6)$$

Donde CM es el centro de masa, t_i es el mes o día i y Q_i es el caudal en el mes o día i .

Detección de tendencias

La tendencia se estimó mediante una regresión lineal de la serie en el tiempo según el método de mínimos cuadrados. La significancia de las tendencias se definió mediante el test de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), el cual asume observaciones independientes y puede ser utilizado en series con datos faltantes (ver Anexo para más detalles). Para la aplicación del test se consideró un nivel de confianza del 90% adoptado previamente en otros estudios similares (Quintana y Aceituno, 2006; Bae, 2008; Yenigun et al., 2008; Falvey y Garraud, 2009). Para el análisis de tendencia los datos se agregaron a nivel estacional y anual. En el caso de la agregación estacional, se consideraron los meses de abril-mayo-junio como otoño, julio-agosto-septiembre como invierno, octubre, noviembre y diciembre como primavera, y enero, febrero y marzo como verano. Para poder detectar en más detalle las posibles variaciones temporales en el comportamiento hidrológico, que no son detectadas en la agregación estacional, en algunos casos puntuales se agregaron los datos según una estación de 6 meses húmeda-pluvial (otoño e

invierno) y otra seca-nival (primavera y verano), y se incluyó al análisis la diferencia pluvial-nival, indicador propuesto por este estudio.

Resultados

A continuación se presentan y analizan los resultados asociados a tendencias estadísticamente significativas según los criterios antes mencionados, a nivel estacional y anual.

Tendencias climáticas

Primeramente se muestran los resultados para las variables meteorológicas de temperatura y precipitación (Tabla) y luego para los indicadores que caracterizan la ocurrencia de condiciones extremas (Tabla y **Tabla**). Las estaciones consideradas son Curicó (CU), Potrero Grande (PG), Colorado (CO) y Talca (TA), en el caso de las temperaturas, y Curicó (CU), Potrero Grande (PG), Río Teno (RT), El Manzano (EM), Lontué (LO) y Santa Susana (SS), en el caso de las precipitaciones.

La Tabla muestra que, en general, las temperaturas presentan tendencias al alza, tanto en la media como en la máxima y la mínima diaria, sobretudo en primavera y verano (color *rojo*). En otoño esta situación es menos notoria, llegando a presentarse en algunas estaciones una tendencia a la baja en la media de las temperaturas máximas y mínimas diarias. En la temperatura media diaria se tiene una tendencia significativa al alza en la estación de Curicó a nivel anual y, sobre todo, en las épocas de verano y primavera (Tabla), de modo que la temperatura media en primavera ha aumentado en 2 °C durante los últimos 35 años. Similar comportamiento se observa en la estación Potrero Grande con temperaturas medias de verano que han aumentado en casi 2 °C desde 1975. Estas tendencias son menos significativas en la estación de Talca y en la estación de Colorado, donde no se detectaron tendencias significativas.

Por otra parte, para la temperatura máxima diaria se tiene una tendencia significativa al alza en la estación de Curicó en primavera y, en menor grado, en invierno. Por otra parte hay una tendencia a la baja en otoño. La situación durante primavera y verano en Potrero Grande es relevante, existiendo tendencias al alza que han elevado la temperatura máxima promedio en 2 y 3 °C

respectivamente. Esta tendencia positiva es lo suficientemente fuerte como para influir en el promedio anual de las temperaturas máximas, registrándose un aumento de poco más de un 1 °C durante el periodo de estudio. Finalmente, ninguna tendencia significativa de esta variable es detectada en las estaciones Colorado y Talca.

Tabla III-7: Tendencias climáticas.

	Estación ¹	Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Anual
Temperatura media diaria (°C/déc.)	CU	+ 0,3		+ 0,2	+ 0,6	+ 0,2
	PG	+ 0,5			+ 0,25	+ 0,2
	CO					
	TA				+ 0,15	+ 0,02
Temperatura máxima diaria (°C/déc.)	CU		- 0,5	+ 0,3	+ 0,6	
	PG	+ 0,9			+ 0,6	+ 0,4
	CO					
	TA					
Temperatura mínima diaria (°C/déc.)	CU	+ 0,5			+ 0,5	+ 0,3
	PG	+ 0,2				
	CO		- 0,4			
	TA					
Precipitación (mm/déc.)	CU			- 56	- 15	- 94
	PG					
	RT				- 48	
	EM				- 31	
	LO					
	SS			+ 70		

¹ CU: Curicó, PG: Potrero Grande, CO: Colorado, TA: Talca, RT: Río Teno, EM: El Manzano, LO: Lontué, SS: Santa Susana.

En el caso de la temperatura mínima diaria, se tiene una tendencia significativa al alza en la estación de Curicó en primavera y verano (0,5 °C/década), lo que implica que los días de baja temperatura en estas estaciones son cada vez un poco más cálido. Analizando el promedio anual de las temperaturas mínimas en esta estación, se detecta un aumento promedio de 1 °C durante los últimos 35 años. En Potrero Grande el aumento del promedio de las temperaturas mínimas es sólo significativo en verano, mientras que para la estación de Colorado se tiene una tendencia a la baja de esta variable sólo durante otoño. La estación de Talca no presenta ninguna tendencia. Los resultados en las precipitaciones muestran una reducción significativa de aproximadamente 300 mm en el periodo de estudio en las precipitaciones anuales en la estación de Curicó (Tabla). Una reducción importante de las precipitaciones anuales dentro de este período ocurre en los meses de invierno (200 mm) y primavera (50 mm) (Color verde). Tendencias significativas a la

baja durante primavera también se observan en las estaciones de Río Teno y El Manzano, con disminuciones de 47,6 y 31,4 °mm/década respectivamente. Finalmente se observa una tendencia al alza en las precipitaciones de invierno en Santa Susana. La explicación de esto no es clara.

Los resultados más relevantes del análisis de tendencias de los indicadores de eventos extremos se presentan en las Tabla (eventos de temperatura) y **Tabla** (eventos de precipitación). Para cada estación hidrometeorológica se señala el indicador y el rango de tiempo en el año para el cual se observa una tendencia estadísticamente significativa positiva (+) o negativa (-).

Los eventos extremos de temperatura son cada vez más extremos, particularmente en otoño e invierno (Tabla III-8). Por un lado, se detecta una tendencia positiva significativa en la máxima de las temperaturas máximas diarias (*Max Tmax*, color rojo) y en el número de días con temperaturas máximas superiores a 25°C (*Summer Days*, color rojo). Los días y las noches son cada vez más cálidos, tanto si las condiciones son comparadas con las históricas representativas de todo el registro, o representativas del periodo del año al cual pertenece cada día evaluado (color verde). Los indicadores que registran este aumento son *Warm Nights* y *Warm days*. Por otro lado, se detecta una tendencia significativa a la baja en la mínima de las temperaturas mínimas (*Min T_{min}*, color gris). Adicionalmente ha habido un aumento en la cantidad de días con temperaturas mínimas inferiores a 0°C (*Frost Days*, color gris). Por consiguiente, el rango o diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima (*Rango*) también ha aumentado significativamente en el tiempo (color amarillo).

A parte de la tendencia a la baja en las precipitaciones en primavera ya mencionada, también se concluye que hay una tendencia a la baja tanto en la magnitud (color rojo en la **Tabla** III-9) como en la frecuencia, (color verde en la misma tabla). Estas tendencias son particularmente notorias durante la primavera. En particular se detecta una tendencia negativa significativa en la magnitud de los eventos de precipitación de gran magnitud que ocurren en periodos de 1 y 5 días (*RX1day* y *RX5day*, color rojo). Por otra parte, se detecta una disminución significativa en el número de días en los cuales ocurren precipitaciones significativas mayores a 10 y 20 mm (*R10mm* y *R20mm*, color verde). Otros indicadores que plasman esta disminución son *R95%* y *R75%*, los cuales presentan tendencia a la baja si las condiciones de precipitación son

comparadas con las históricas representativas de todo el registro, o representativas del periodo del año al cual pertenece cada día evaluado (color verde). Finalmente se detecta un aumento significativo a nivel anual, en varias de las estaciones meteorológicas, en la cantidad de días sin lluvia (Indicador *TDD*, color *verde*).

La estación de Curicó presenta un comportamiento bastante particular y único dado que las tendencias a la baja en la magnitud y frecuencia de las precipitaciones también se observan en los meses lluviosos de otoño e invierno, provocando una fuerte disminución de las precipitaciones a nivel anual. Las tendencias detectadas se comportan de manera diferente en cada estación del año. En otoño se detecta una baja en los índices más extremos (*RX1day*, *R95%* y *P>R95%*), mientras en invierno se detecta una baja en índices menos extremos (*R10mm*, *R20mm*, *RX5day*, *R75%* y *P>R75%*).

Tabla III-8: Tendencias en índices de temperatura.

Estación ¹	Verano				Otoño				Invierno				Primavera				Anual			
	CU	PG	CO	TA	CU	PG	CO	TA	CU	PG	CO	TA	CU	PG	CO	TA	CU	PG	CO	TA
Max Tmax (°C/déc.)	+0,4	+1,2				+0,9	+0,8		+0,6			+0,6					+0,5	+1,1		
Min Tmax (°C/déc.)		+0,6						-1,4					+0,8							-1,5
Max Tmin (°C/déc.)						+1							+0,4						-0,8	
Min Tmin (°C/déc.)						-0,3	-0,7	-0,5		-0,6		-0,7	+0,8					-0,6		-0,7
Warm Nights R (días/déc.)	+5,6	+4				+1				+0,4			+4,4				+11	+5,5		
Warm Nights E (días/déc.)	+2,6	+1,4											+3,6				+8,7		-6	
Cold Nights R (días/déc.)									-1,2		+5,7		-0,3						+7,7	
Cold Nights E (días/déc.)						+2,4	+3			+2,3	+3,8		-2,3				-4,4		+6	
Warm Days R (días/déc.)	+2	+13					+0,3						+3,6	+4			+6	+17		
Warm Days E (días/déc.)	+2	+7,5				+2			+1,7			+1,6	+3	+4			+5,4	+13,7		+5,7
Cold Days R (días/déc.)					+4				-0,6									-0,6	+2,7	
Cold Days E (días/déc.)		-1,3				+1,7					+2,3		-2,2	-1,6	-2					
Summer Days (días/déc.)		+6,7				+2		+1,6					+5	+5,2			+6	+13,7		
Frost Days (días/déc.)						+3,3				+2,8	+2,4							+6,2		
CDF (días/déc.)																				
Rango (°C/déc.)		+0,7	+0,5				+0,5				+0,4			+0,7	+0,5			+0,4	+0,5	

Tabla III-9: Tendencias en índices de precipitación.

Estación ¹	VERANO						OTOÑO						INVIERNO						PRIMAVERA						ANUAL					
	CU	PG	RT	EM	LO	SS	CU	PG	RT	EM	LO	SS	CU	PG	RT	EM	LO	SS	CU	PG	RT	EM	LO	SS	CU	PG	RT	EM	LO	SS
Desviación (mm/déc.)													-1,1				+2	-0,6		-1,7					-0,9					
R10mm (días/déc.)													-1,7				-1,7	-2,2	-0,7		-1,3			-0,5	-2,2				-2,7	+4,2
R20mm (días/déc.)													-1,1						-0,4	-1,1										+3,5
TDD (días/déc.)																		+1							+3	+4,3	+3,7			
RX1day (mm/déc.)						-12											+15		-7,3	-12					-12					
RX5day (mm/déc.)													-19					-9,5		-23					-21					
R95% R (días/déc.)						-0,5														-0,1					-0,7					
R95% E (días/déc.)						-0,5			+0,4										-0,3						-0,8					
R75% R (días/déc.)													-1							-0,6	-0,3				-1,3					
R75% E (días/déc.)													-1,2						-0,7		-1,3	-0,6	-0,5		-1,7					+2,7
P> R95% R (mm/déc.)						-45														-12					-56					
P> R95% E (mm/déc.)						-45			+43										-14,4						-61					
P> R75% R (mm/déc.)													-45							-30					-75					
P> R75% E (mm/déc.)													-49					+55	-13		-45	-29	-13		-81					

¹ CU: Curicó, PG: Potrero Grande, CO: Colorado, TA: Talca, RT: Río Teno, EM: El Manzano, LO: Lontue, SS: Santa Susana.

Tendencias en los caudales

Para el análisis de tendencias en los caudales y otros indicadores representativos de la escorrentía, se consideró las estaciones de Upeo (UP), Colorado en junta con Palos (CP), Palos en junta con Colorado (PC), Río Teno (RT) y Licantén (LI). El análisis muestra que en muchos casos se observan tendencias estadísticamente no significativas, pero sí bastante consistentes para todas las estaciones. Esto motivó señalar explícitamente aquellos indicadores de escorrentía que presentan una tasa de crecimiento o disminución mayores a un 5% del promedio por década. Se define entonces la siguiente nomenclatura para los valores de los resultados mostrados en la Tabla III-10, Tabla III-11 y Tabla III-12: (1) si la tendencia es significativa y superior al 5%, aparece el valor de la tasa; (2) si es significativa pero inferior al 5%, el valor de la tasa se acompaña con un asterisco; (3) si la tendencia es superior al 5% pero no es significativa, el crecimiento se expresa con la letra P y la disminución con la letra N; (4) Si no hay tendencias significativas ni una variación superior al 5%, no se presenta ningún valor; (5) finalmente el símbolo s/i aparece cuando la información para la detección de tendencias es insuficiente.

La Tabla muestra los resultados del análisis de tendencia para los caudales medios. Sólo los caudales en el Estero Upeo, durante el periodo nival, y en forma independiente en primavera y verano, presentan una tendencia a la baja estadísticamente significativa (color *rojo*). Sin embargo se observan suaves tendencias no significativas al alza durante el otoño (color *amarillo*), y a la baja en los meses de primavera y verano (color *gris*) para todas las estaciones. En lo referido a variación porcentual del escurrimiento, la Tabla III-11. En la estación Estero Upeo en Upeo se detectó una tendencia significativa a la baja tanto en primavera (2,9 %/década) y verano (0,4 %/década) (color *gris*). Por lo tanto, cada vez menos escorrentía en este punto ocurre durante la temporada de derretimiento nival y más ocurre durante la época pluvial, lo que se traduce en un incremento en el tiempo de la diferencia porcentual entre el volumen de escurrimiento en la época pluvial y la nival (color *verde*). En el caso de la estación Río Colorado en junta con Palos, existen similares tendencias pero de menor magnitud, de modo que no son significativas a nivel de estaciones del año, pero sí lo son cuando los caudales se agregan en épocas pluviales (tendencia creciente, color *amarillo*) y nival (tendencia decreciente, color *gris*). Estas tendencias, similares a las observadas en la estación de Upeo, ocurren a pesar de la diferencia en el régimen

hidrológico correspondiente (Régimen nival en la estación Río Colorado en junta con Palos vs. Régimen pluvial en la estación Estero Upeo). Las mismas tendencias se observan en la Estación Río Palos en junta con Colorado. La estación Río Teno después de junta con Palos no se comporta de igual manera ya que las tendencias no son significativas. Una explicación a este comportamiento puede ser la presencia del embalse El Planchón aguas arriba de esta estación. Finalmente, el registro de caudales en la estación de Licantén también muestra una tendencia negativa en el porcentaje del volumen de escurrimiento nival que ocurre en primavera.

La Tabla 11 resume el comportamiento de las tendencias de los indicadores de eventos extremos para el caso de los caudales. En general, se observan tendencias negativas en el caudal mínimo y en el índice Low Flow (caudal mínimo en 7 días consecutivos del año) para los períodos nival, pluvial y anual (color *verde*). A pesar de que la diferencia pluvial-nival de estos índices no es significativa en ninguna de las estaciones, se detecta una leve alza. Por otro lado, se observa un aumento de los caudales máximos anuales proveniente de un aumento de los caudales máximos pluviales (color *amarillo*). Este aumento, sumado a la disminución de los caudales máximos nivales (color *amarillo*), provoca tendencias significativas en la diferencia pluvial-nival del caudal máximo (color *rojo*). También se estudió el comportamiento del caudal máximo instantáneo a nivel anual (Qmax inst) disponible para todas las estaciones, a excepción de la estación Estero Upeo en Upeo. La serie de Qmax instantáneos se trabajó a nivel de año calendario y no según el año hidrológico (abril-marzo) utilizado a lo largo del estudio, ya que de esta manera se encuentra la información disponible. Los resultados de Qmax instantáneo muestran una tendencia al alza en todos los casos (color *rosado*). Sólo en la estación Río Colorado en junta con Palos la tendencia es significativa (esta estación también es la única que presenta una tendencia significativa en Qmax diario si se utiliza un año calendario). Finalmente no existe una tendencia significativa en el día de la ocurrencia del caudal máximo diario. Sin embargo la Tabla III-11 muestra el valor de la tendencia de día con objeto de indicar el comportamiento de este indicador.

Finalmente la Tabla resume el comportamiento de los indicadores temporales definidos para caracterizar variaciones en la temporalidad del régimen hidrológico y el adelantamiento de la primavera. Nuevamente ninguno de los indicadores presenta una tendencia significativa, pero

vuelven a mostrarse los valores numéricos para ilustrar el comportamiento general. En la Tabla 12 se incluyen las estaciones de precipitación en los índices que así lo requieran. En general, los índices de adelantamiento de la primavera muestran efectivamente un adelantamiento en el del régimen hidrológico, llegándose a valores bastante altos como por ejemplo de 15 días en 35 años en la estación Río Palos en junta con Colorado. Por otra parte, no se encontró una tendencia bien definida para el adelantamiento (o atraso) de las precipitaciones. Por último, cabe mencionar que no fue posible calcular los índices de eventos extremos ni de adelantamiento de primavera en la estación Licantén ya que la serie diaria tiene poca información. A pesar de esto, la serie de caudales máximos diarios anuales tiene coherencia (McCuen, 2003) con la serie de caudales máximos instantáneos anuales (Aguilera, 2007), lo cual permite detectar tendencias en Q_{max} en el período anual.

Tabla III-10: Tendencias hidrológicas.

Periodo ²	Caudal medio (m ³ /s/déc.)								Porcentaje de caudal con respecto al volumen anual (%/déc.)							
	V	O	I	P	A	N	PL	P-N	V	O	I	P	A	N	PL	P-N
Estero Upeo en Upeo	-0,2			-1,4	N	-0,8			-0,4	P		-2,9		-3,3	+3,3*	+6,5
Río Colorado en junta con Palos	N	P						P	N	P				-2*	+2*	+3,7
Río Palos en junta con Colorado		P						P	N	P				-2*	+2*	+3,8
Río Teno después de junta con Claro¹	N	P					P	P		P						P
Río Mataquito en Licantén	P	P		N	P	P	P	P		P		-3,8		N		P

¹ Carencia de registros al inicio del periodo de estudio y la presencia del embalse El Planchón, aguas arriba de la estación, que afectan el cálculo de la tendencia

² V: verano, O: otoño, I: invierno, P: primavera, A: anual, N: nival, PL: pluvial, P-N: diferencia pluvial-nival.

Tabla III-11: Tendencias en índices de caudal.

Estación ¹	Nival					Pluvial					Diferencia pluvial - nival					Anual				
	UP	CP	PC	RT	LI	UP	CP	PC	RT	LI	UP	CP	PC	RT	LI	UP	CP	PC	RT	LI
Qmin (m³/s/déc.)	-0,1	N	N	N	s/i	-0,1	-1,3	N	N	s/i	P	P		P	s/i	-0,1	-1,2	N		s/i
Qmax (m³/s/déc.)	N	N	N	N	s/i	P	P	P	P	s/i	P	+86	+57	+90	s/i		P	P	P	P
Día Qmax (días/déc.)²	0,2	2,5	4,9	2,6	s/i	-2,7	-6,4	-4,2	-5,9	s/i	-2,8	-9	-9	-8,6	s/i	-2,7	-12	-6,6	-2,5	-14
Qmax inst (m³/s/déc.)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	+ 137	P	P	P
Low Flow (m³/s/déc.)	-0,07	N	N	N	s/i	N	N	-1	N	s/i	P	P	P	P	s/i	N	-1	-1.2		s/i

¹ UP: Upeo, CP: Colorado en junta con Palos, PC: Palos en junta con Colorado, RT: Río Teno, LI: Licantén

² No existe tendencia significativa en el indicador Día Qmax aplicado a cualquiera de los rangos temporales. Valores de tendencia se muestran a modo de referencia

Tabla III-12: Tendencias en adelantamiento de primavera.

Estación ¹	Índices de Caudal				Índices de Precipitación					
	UP	CP	PC	RT	CU	PG	RT	EM	LO	SS
Día mayor al 50% volumen anual (días/déc.)	-1,1	-3,2	-4,4	-1,3						
Centro de masa anual de caudales, serie diaria (días/déc.)	-3,8	-3,2	-3,3	-2,4						
Centro de masa anual de caudales, serie mensual (días/déc.)	-3,6	-3,1	-3,1	-3,6						
Centro de masa anual de precipitaciones, serie diaria (días/déc.)					-0,3	-0,2	-1,7	+0,6	-1,2	+0,4
Centro de masa anual de precipitaciones, serie mensual (días/déc.)					-1,1	+0,3	-1,6	+1	-0,5	+1,3

¹ UP: Upeo, CP: Colorado en junta con Palos, PC: Palos en junta con Colorado, RT: Río Teno, CU: Curicó, PG: Potrero Grande, RT: Río Teno, EM: El Manzano, LO: Lontué, SS: Santa Susana.

Complementario al estudio de tendencias, se identificó la posición en el tiempo de las 10 mayores crecidas del registro para el periodo anual, pluvial y nival en todas las estaciones, a excepción de la estación Río Mataquito en Licantén (Figura III-7). En este análisis se consideró el registro continuo, por lo que se pueden identificar dos de estas grandes crecidas en un mismo año. La Figura III-8 muestra el histograma de la estación Río Mataquito en Licantén para el caudal máximo diario e instantáneo, considerando sólo una crecida por año. Al igual que los resultados de índices de eventos extremos climáticos (Tabla y **Tabla**), en la sección de discusión se comentaran estos resultados de manera de complementar las conclusiones obtenidas a partir de los otros análisis de tendencia desarrollados en este estudio.

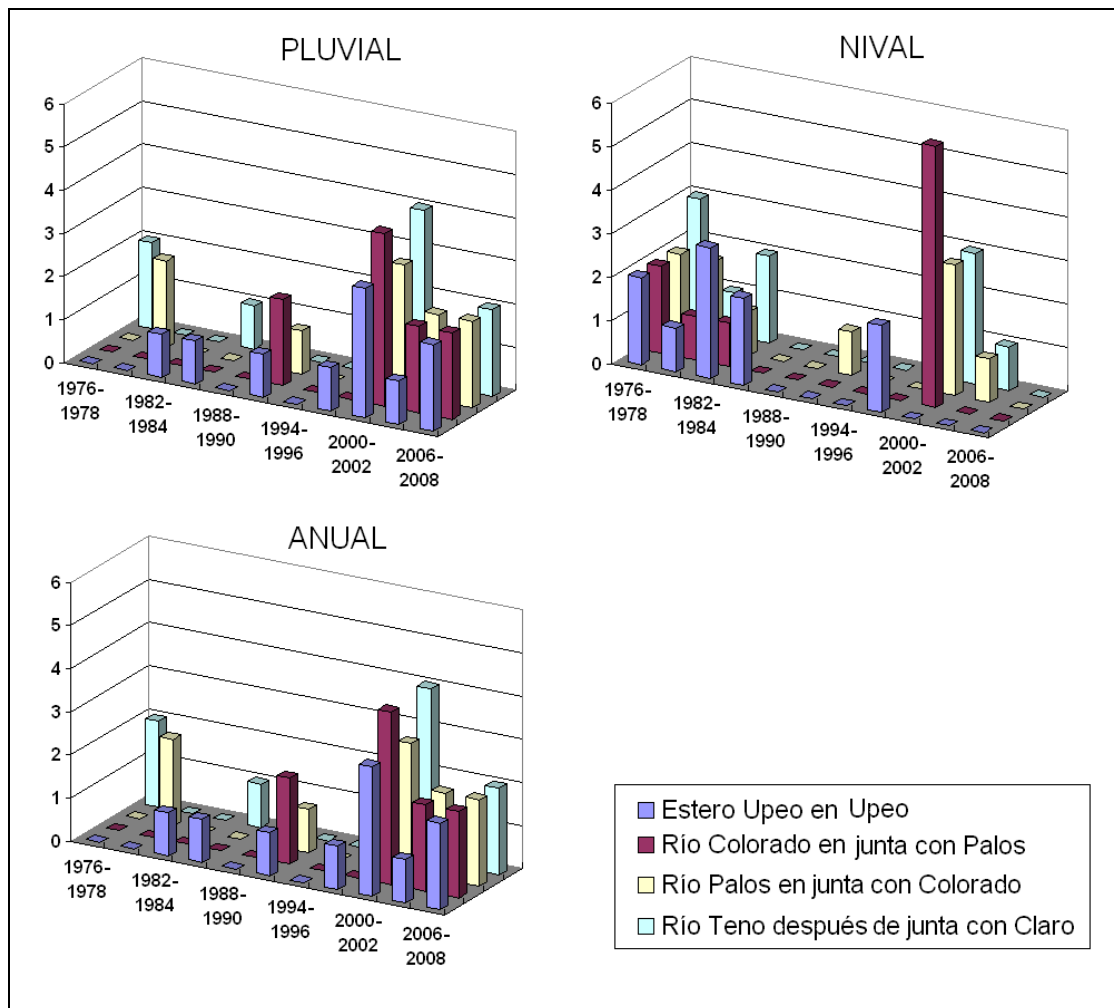


Figura III-7: Histograma de las 10 mayores crecidas máximas para todas las estaciones (periodo 1976-2008), a excepción de Río Mataquito en Licantén.

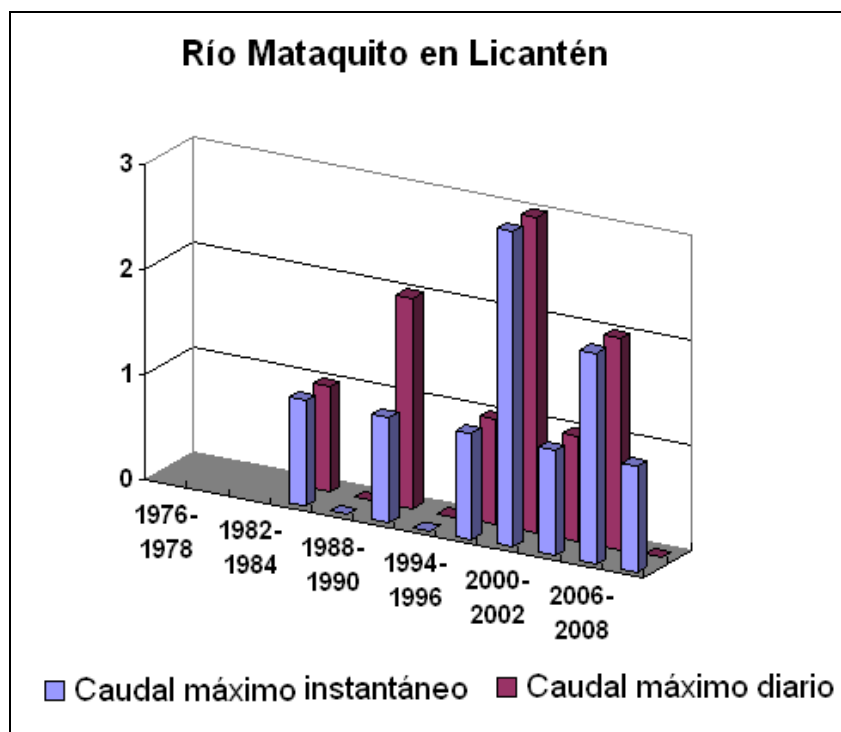


Figura III-8: Histograma de las 10 mayores crecidas máximas, estación Río Mataquito en Licantén (1987-2009).

Variables climáticas al momento de grandes crecidas

A continuación se desarrolla un análisis de la crecida máxima registrada en cada año, desde 1976 a 2008 (año hidrológico), considerando la crecida máxima anual, la crecida máxima del período pluvial (abril-septiembre) y la crecida máxima del período nival (octubre-marzo). El análisis considera un estudio de las variables climáticas al momento de las grandes crecidas.

Las variables climáticas estudiadas son la temperatura media, máxima y mínima diaria, y la precipitación diaria. Las estaciones meteorológicas utilizadas son las que se encuentran a mayor altura. De esta manera se usó la estación Potreo Grande para las temperaturas, y las estaciones Río Teno, Potrero Grande y El Manzano para las precipitaciones. En el caso de la estación Río Teno después de junta con Claro sólo se considera la estación de precipitaciones de Río Teno porque representa mejor la física del escurrimiento en relación a las otras estaciones de precipitación estudiadas.

El análisis consiste en comparar el valor de la variable climática, en los días de la crecida, con el valor del percentil 90 de la variable en el mes correspondiente. Para esto se toma en cuenta lo sucedido 2 días antes (t-2), 1 día antes (t-1) y el mismo día (t) de la crecida máxima. Del análisis se desprende que la temperatura mínima y las precipitaciones registran valores más elevados en el momento de las crecidas máximas. Por el contrario, no se registran valores elevados en las temperaturas máximas, a excepción de las crecidas de menor magnitud del periodo nival.

Las crecidas máximas del periodo anual y pluvial son muy similares, de hecho las 10 mayores crecidas anuales coinciden con las 10 mayores crecidas pluviales. En estas crecidas, tanto la temperatura mínima como la precipitación superan el percentil 90 la mayoría de las veces. En el periodo nival, las mayores crecidas también se asocian a eventos de precipitación y de superación del percentil 90 de la temperatura mínima, no así las crecidas de menor magnitud, las cuales se asocian a la superación del percentil 90 de la temperatura máxima.

Estos resultados se ilustran en la Figura III-9, Figura III-9 y Figura III-9, las que muestran si la crecida es afectada por las precipitaciones o por las temperaturas mínimas, en los periodos anual, pluvial y nival, respectivamente. Se considera como un efecto de las variables climáticas en la crecida si en alguno de los 3 días analizados, en cualquier estación meteorológica, la variable superó el valor del percentil 90. En el eje de la derecha se encuentra la magnitud de la crecida máxima, representada por la línea azul. Las barras muestran si la crecida se vio afectada por las variables meteorológicas (barra de color *celeste* si sólo la precipitación afectó la crecida, de color *naranja* si sólo la temperatura mínima afectó a la crecida y de color *morado* si ambas variables afectaron a la crecida). Así entonces la ausencia de la barra está asociada a casos en que ninguna de las dos variables afectó a la crecida. También se agrega el ranking de la crecida, una flecha sobre las 10 mayores crecidas y un asterisco en los años en que se registró el Fenómeno del Niño.

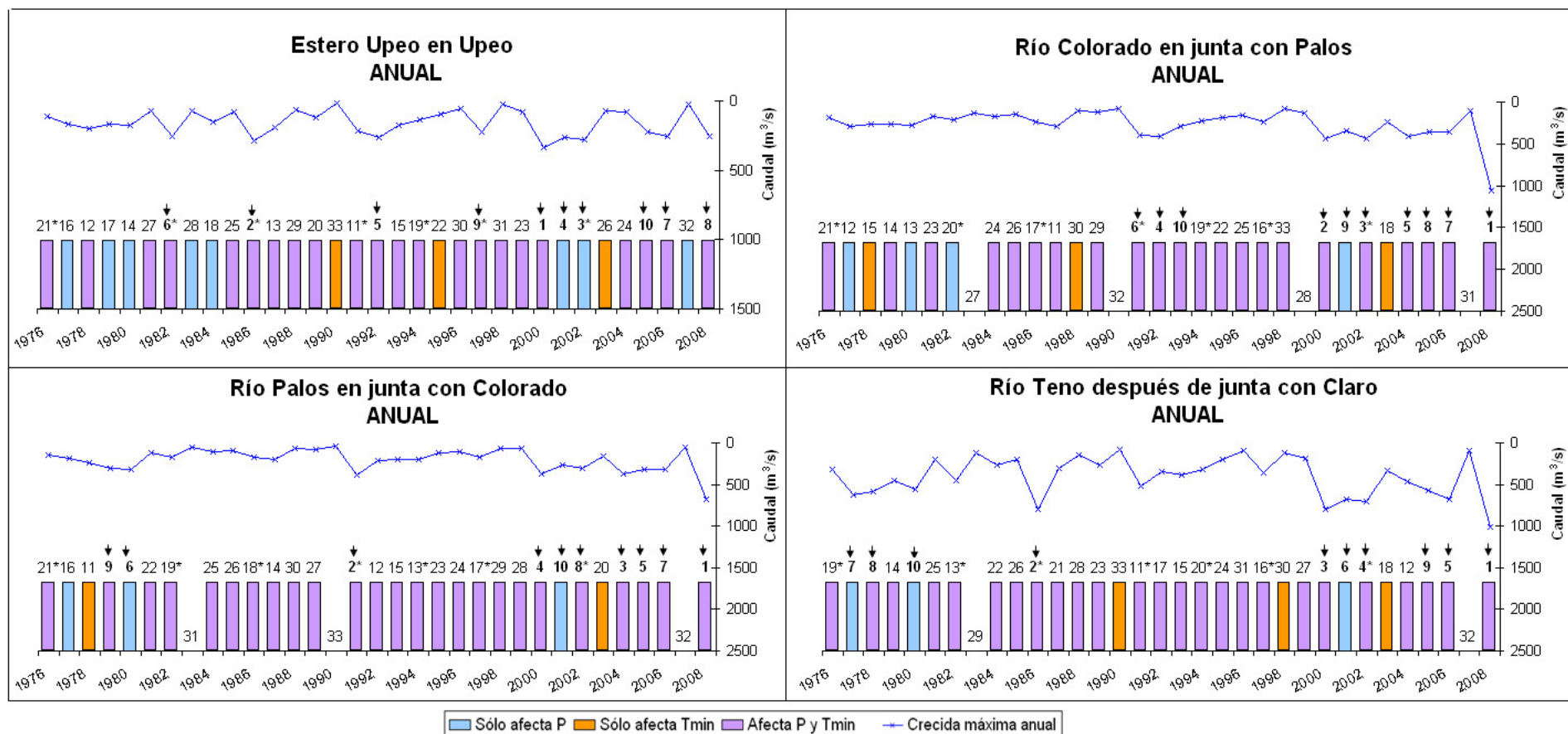


Figura III-9: Variables climáticas durante la crecida máxima anual. Sobre cada crecida aparece el ranking, las 10 mayores crecidas se marcan con una flecha. En los años en los cuales se registró la presencia del Fenómeno del Niño se agrega un asterisco.

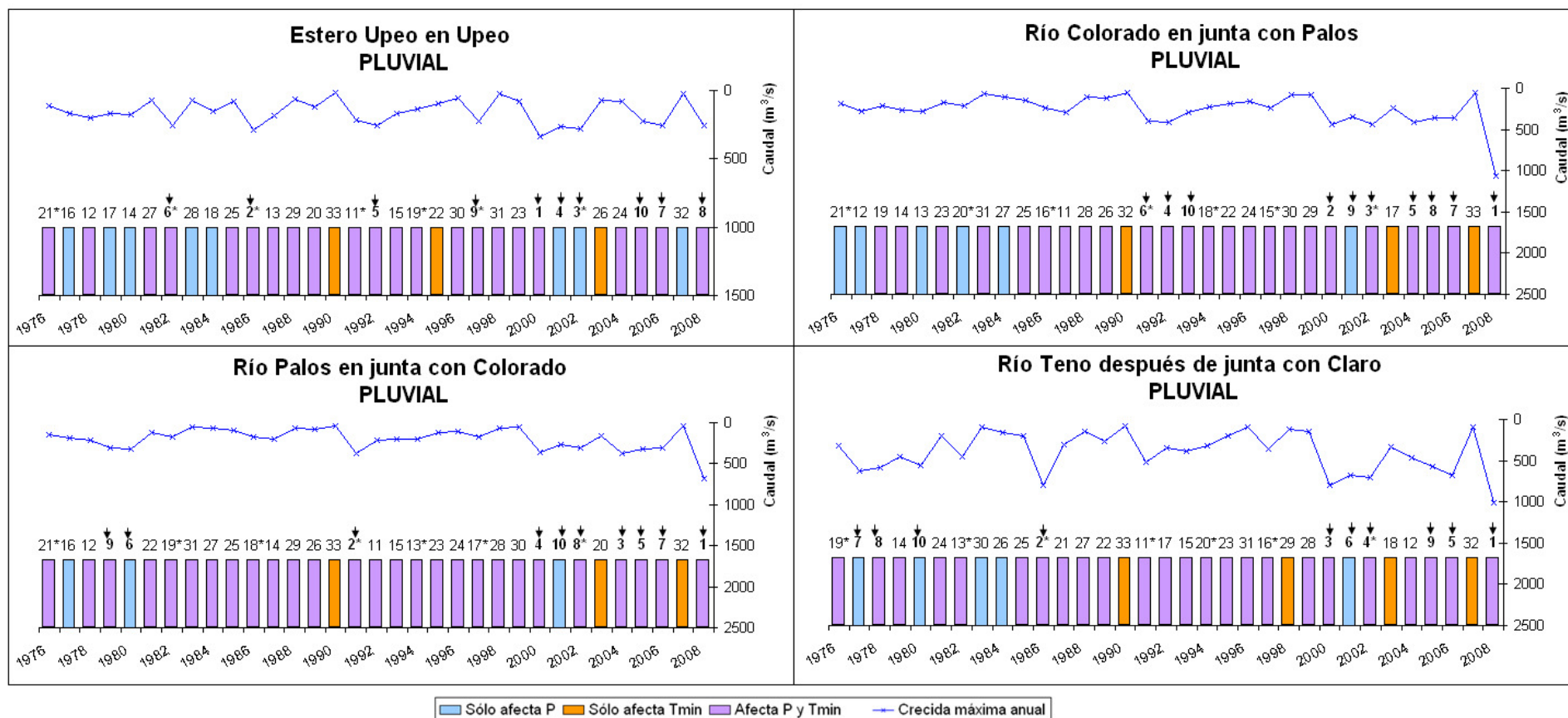


Figura III-10: Variables climáticas durante la crecida máxima pluvial. Sobre cada crecida aparece el ranking, las 10 mayores crecidas se marcan con una flecha. En los años en los cuales se registró la presencia del Fenómeno del Niño se agrega un asterisco.

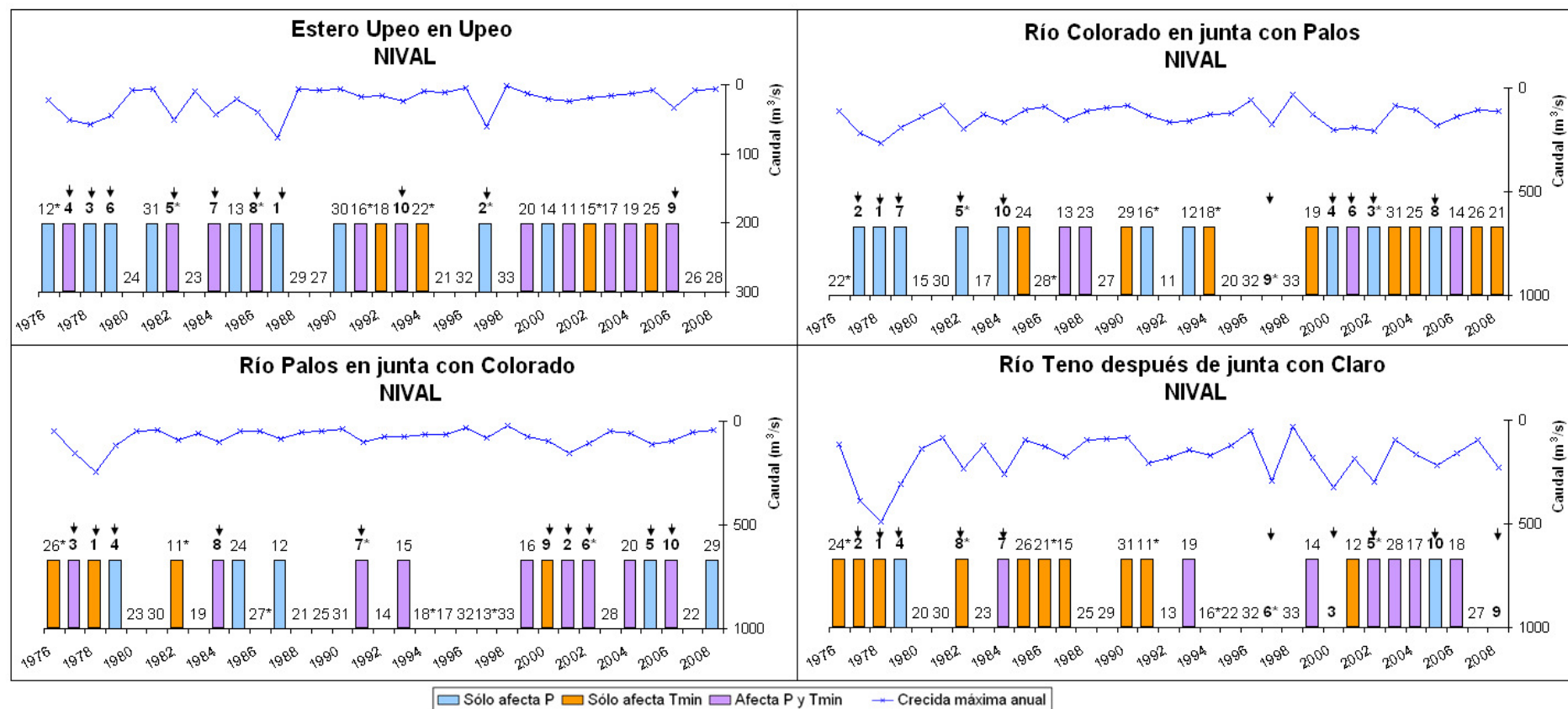


Figura III-11: Variables climáticas durante la crecida máxima nival. Sobre cada crecida aparece el ranking, las 10 mayores crecidas se marcan con una flecha. En los años en los cuales se registró la presencia del Fenómeno del Niño se agrega un asterisco.

Relación entre el escurrimiento y el clima

Los resultados arrojaron una disminución de los caudales en el periodo nival y un aumento de éstos en el periodo pluvial. La debilitación de las precipitaciones en magnitud y frecuencia junto con el aumento de la porción de la precipitación que cae en forma líquida, está provocando una caída del almacenamiento nival. Existe un aumento de los caudales particularmente en otoño, a pesar de que las variables climáticas medias no presentan tendencias significativas en ese periodo. Además, pareciera no haber nieve acumulada de un año al siguiente, por lo cual las grandes crecidas están siempre asociadas a eventos de lluvia. Conjuntamente, las temperaturas mínimas típicamente superan el percentil 90 al ocurrir grandes crecidas. La disminución en la mínima de las temperaturas mínimas y el aumento en la cantidad de noches frías no incidirían en los mayores caudales. Las temperaturas máximas en la época pluvial no están aumentando considerablemente y las precipitaciones están disminuyendo. El aumento detectado en la máxima de las temperaturas mínimas y en la cantidad de noches cálidas en Potrero Grande podrían explicar los altos caudales otoñales. Esto significa que el aumento de los caudales de otoño puede estar asociado a precipitaciones que caen de noche, las cuales son cada vez más cálidas.

Grandes crecidas

La mayores 10 crecidas anuales o pluviales (son las mismas) ocurren principalmente a partir del 2000 (Figura III-9 y Figura III-9). Esta situación se acentúa si se considerara más de un evento de crecida por año. Como ya se ha mencionado, el aumento en las temperaturas estaría provocando que las lluvias otoñales escurran en mayor proporción que en el pasado, aumentando la magnitud de las crecidas. Por otra parte, las mayores 10 crecidas nivales se concentran al inicio y al final del registro. El derretimiento del manto nival almacenado en los meses de lluvia es el origen de las crecidas en los primeros años. El debilitamiento del manto nival, producto de la disminución de precipitaciones en forma sólida, sería la causa de las crecidas de menor magnitud en los años posteriores. Las tendencias positivas en las temperaturas explicarían el aumento de las crecidas del último periodo, las cuales están más bien asociadas a eventos de precipitación líquida

durante la época de derretimiento. Con esto, las lluvias primaverales, cada vez menores en volumen, son mucho más pluviales, lo que está generando respuestas más rápidas y crecidas de mayor magnitud.

Impacto de la isoterma cero sobre la línea de nieve y la ocurrencia de eventos extremos

El efecto de las temperaturas sobre los eventos extremos puede explicarse también físicamente. La Figura III-9 compara dos imágenes de la cuenca del río Mataquito sin y con nieve distribuida sobre la cota de 1500 msnm (i.e. la cota de línea de nieve promedio en invierno).

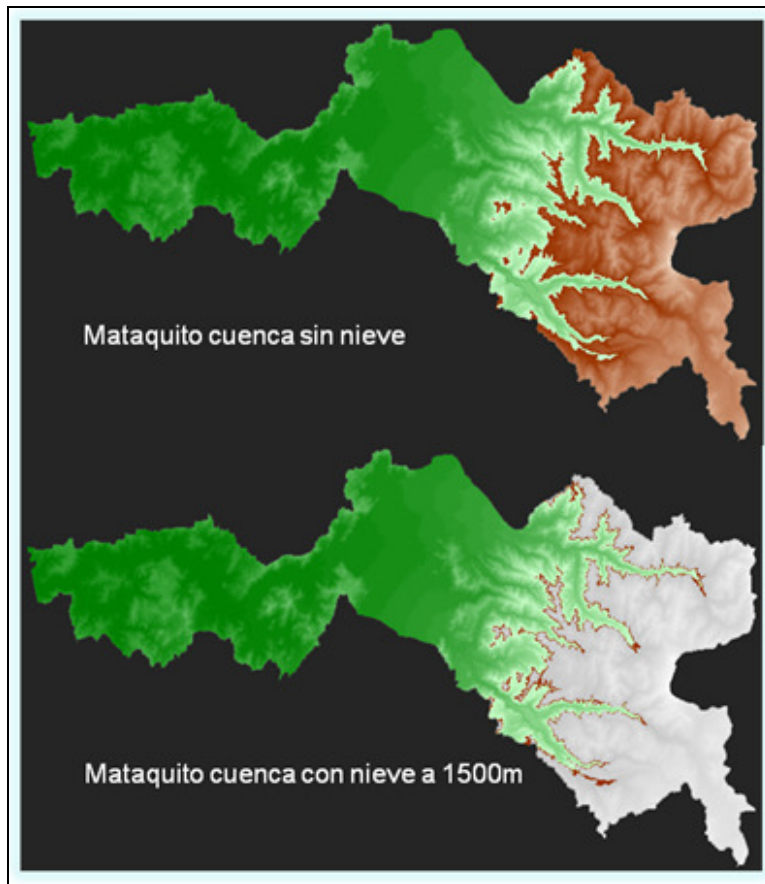


Figura III-12: Cuenca del río Mataquito con y sin nieve, por sobre los 1500 msnm.

La Figura III-9 muestra la curva hipsométrica, definida como el porcentaje de superficie de la cuenca que se encuentra por sobre los distintos niveles de altura. Se puede apreciar que el área por sobre los 1500 msnm corresponde al 35% de la cuenca, por lo que se

puede establecer que el escurrimiento proveniente de deshielos proviene típicamente del 35% de la superficie de la cuenca. La curva hipsométrica también muestra que en una diferencia de 200 metros de altura por sobre y debajo la cota 1500 se encuentra el 15% de la superficie de la cuenca. Esto significa que para un cambio menor en elevación de la isoterma cero, el aumento del área sujeta a precipitación pluvial en vez de nival puede ser muy relevante tanto para la generación de una crecida, como para la reducción del manto nival disponible para la época de deshielos.

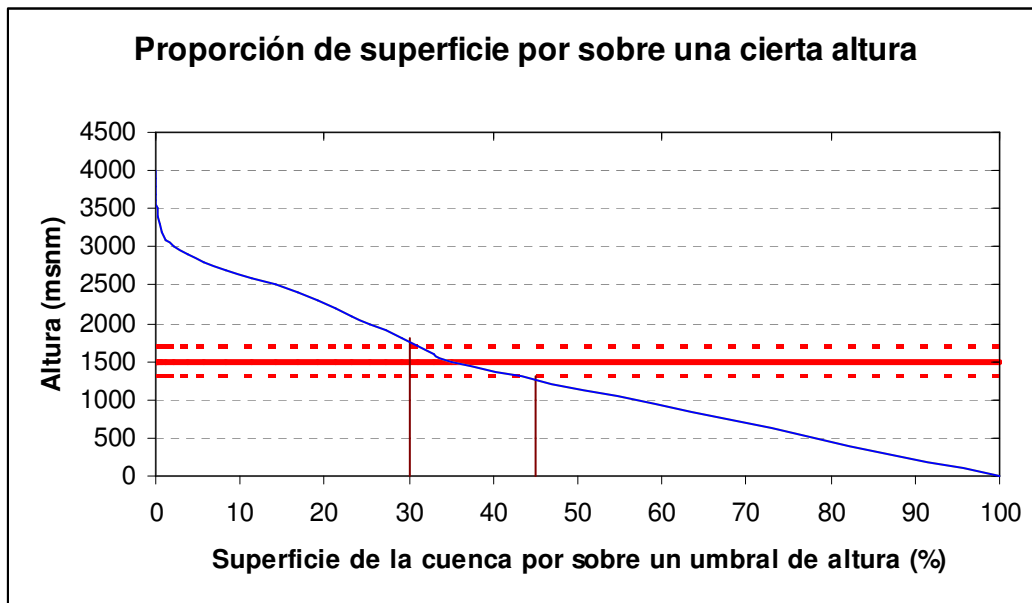


Figura III-13: Curva hipsométrica representando el área de la cuenca sobre una cierta altura.

A modo de ejemplo, se comparan dos eventos extremos ocurridos prácticamente en la misma fecha pero en distintos años. Se compara el evento del 23 de mayo del año 2008 con el evento del 27 de mayo del año 2002. La Tabla describe las principales características de los eventos: la precipitación acumulada dos días antes de la crecida, el caudal máximo registrado, la temperatura máxima promedio el día de la crecida y la cota estimada de línea de nieve. A pesar de que la precipitación registrada en los días previos a la crecida del 2008 es 19,7 mm menos que la registrada antes del evento del 2002, la crecida del 2008 es mucho mayor a la crecida del 2002, produciéndose al menos 881 m³/s de caudal extra.

Tabla III-13: Comparación de eventos extremos, año 2002 v/s año 2008.

	2002	2008
Precipitación 2 días previos (mm)	103.6	83.9
Caudal Máximo (m ³ /s)	931	2690
Tmax promedio (°C)	13,0	17,4
Cota estimada línea de nieve (m)	1700	2200

De la Tabla se puede observar que la temperatura máxima del 2008 fue 4,5° C mayor que la registrada el 2002 y la cota de nieve estuvo 500 m más elevada el año 2008 (Figura III-9). Por lo tanto, el área extra de lluvia escurrida v/s almacenada como nieve es de 615 km², lo que aproximadamente equivale a un caudal extra de 597 m³/s durante un día. El evento del año 2008 fue excepcionalmente superior a las crecidas registradas en los últimos 30 años. El fenómeno entonces puede explicarse no sólo por la cantidad de precipitación caída, sino también porque ocurrencia de elevadas temperaturas, las que derritieron la nieve que pudiese haber estado acumulada y además levantaron la isoterma cero por sobre los 2000 msnm. Este ejemplo expone de manera muy clara el importante efecto que puede llegar a tener la temperatura en la localización de línea de nieve, y en la ocurrencia de un evento extremo.

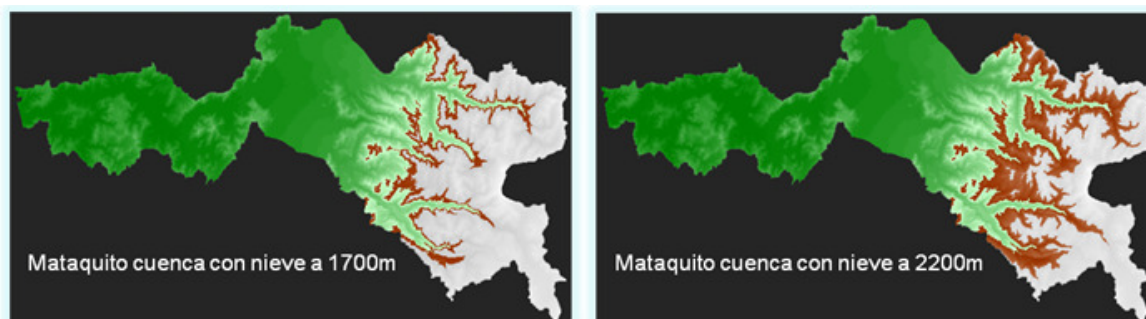


Figura III-14: Comparación de superficie nival en eventos extremos, año 2002 v/s año 2008. La imagen se construye a partir de las precipitaciones y temperaturas en Curicó, adoptando una tasa de lapso de 9°C/km.

Es importante destacar que la Figura III-9 se construyó a partir de los datos registrados en la estación Curicó (195 msnm), con una tasa de lapso de 9°C/km. Se eligió esta estación

porque tiene una mayor cantidad de datos. Las temperaturas estimadas se validaron parcialmente utilizando la estación de temperaturas más elevada en la zona ubicada a 445 msnm.

Dada la relevancia que tiene el comportamiento de la isoterma cero y el cambio de la línea de nieve en el escurrimiento, se hace muy necesario monitorear la zona ubicada a más de 1500 m de altura para así contar con una mejor caracterización de estas variables y una mejor estimación del comportamiento de la escorrentía.

Situación de Río Mataquito en Licantén

La estación Río Mataquito en Licantén no cuenta con la información diaria suficiente para la completa confiabilidad de las conclusiones. A pesar de esto, es posible argumentar que existe una relación estrecha entre lo que ocurre aguas arriba con lo que ocurre aguas abajo. Para esto se comparó la situación entre la estación Río Mataquito en Licantén y las estaciones Río Colorado en junta con Palos y Río Teno después de junta con Claro. Por un lado, se encontraron coeficientes de determinación superior a 0,8 entre las estaciones a nivel mensual, lo cual permitió el relleno a nivel mensual. Por otro lado, la fecha de la máxima crecida anual es la misma tanto aguas arriba y aguas abajo, excepto en tres años del registro. Sólo en dos de los años es efectivo que la fecha no coincide, en el año restante no hay información del mes de la crecida en una de las estaciones.

Finalmente, se calculó el periodo de retorno de la crecida máxima de cada año en todas las estaciones. La correlación de las series de periodo de retorno entre las estaciones aguas arriba con la estación Río Mataquito en Licantén existe pero no es muy alta (entre 0,4 y 0,55) y en eventos menores debiera disminuir. Es posible decir que la información de aguas arriba puede explicar el comportamiento aguas abajo en crecidas extremas pero no el comportamiento a lo largo del año. Se hace entonces necesario un modelo a base física capaz de representar correctamente el almacenamiento superficial y subsuperficial de la cuenca.

Conclusiones

Las principales conclusiones del análisis de tendencias hidroclimáticas durante el periodo 1976-2009 en la cuenca del río Mataquito, son las siguientes:

- Se detectan tendencias positivas en la media de las temperaturas, sobretudo en primavera, teniéndose periodos estivales cada vez más calurosos y secos. Los eventos extremos de temperatura son cada vez más extremos, con temperaturas máximas más altas y temperaturas mínimas más bajas.
- Se detectan tendencias negativas en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones, sobretudo en primavera. Los eventos extremos disminuyen de manera más fuerte en otoño que en invierno.
- Las 10 mayores crecidas experimentadas por los ríos y cursos de agua de la cuenca ocurren principalmente a partir del 2000, durante el periodo pluvial. Estos eventos se asocian a altas precipitaciones y altas temperaturas mínimas diarias. Las temperaturas máximas diarias no parecen ser un factor predominante explicatorio de las grandes crecidas, y están más relacionadas con crecidas de menor magnitud durante el periodo nival.
- Los caudales en el periodo pluvial han aumentado, principalmente en otoño. Existe un aumento de la precipitación líquida que cae en esta época, en desmedro de la precipitación nival. De este modo pareciera ser que la acumulación nival importante durante los meses de otoño y primavera ha ido disminuyendo. El aumento en la máxima de las temperaturas mínimas y en la cantidad de noches cálidas pueden ser las causantes de este aumento de la precipitación líquida.
- Debido a la menor acumulación del manto nival, se detecta una disminución de los caudales en la época estival. Las causas son la disminución en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas que elevan la isoterma cero, aumentando la proporción de lluvia que escurre, la cual antes se almacenaba como nieve. Mayores temperaturas en primavera y verano no son relevantes dada la merma del manto nival en esa época. A través de un histograma es posible notar que a partir del 2000 las crecidas nivales han aumentado en magnitud, situación que parece estar relacionada con la ocurrencia de una mayor proporción de precipitación que escurre en las tormentas de primavera, producto

del aumento en las temperaturas. En este histograma también se observan grandes crecidas al comienzo del registro, las cuales explican la tendencia negativa de los caudales nivales.

- Como una generalidad, los cambios observados en los hidrografa anuales parecen indicar que el régimen hidrológico típico de las zonas de altitud media estaría haciéndose cada vez más pluvial.

III.4 Análisis otras variables de cambio global

Cambios observados en la superficie agrícola y proyecciones futuras.

La provincia de Curicó se caracteriza por tener un sector agrícola en el que coexisten plantaciones frutales y viñas de gran desarrollo tecnológico con una agricultura más tradicional en que predominan algunos cultivos anuales. Análisis de los resultados de los censos agropecuarios practicados en 1965, 1976, 1997 y 2007 nos muestran un cambio significativo en la actividad agrícola de la región.

La superficie agrícola total mostró un marcado crecimiento entre 1965 y 1976, variando de 450.000 a 700.000 hectáreas aproximadamente. A nivel nacional, se reconoce el efecto positivo que significó la puesta en marcha del Decreto ley N°701 que significó un crecimiento muy significativo del área forestal. A nivel de esta provincia no es posible dimensionar este efecto ya que las estadísticas del 1965 agrupan indistintamente las plantaciones de los bosques naturales y matorrales, sin embargo es razonable suponer que la tendencia nacional también se viese reflejada a nivel de esta provincia. En los siguientes censos se observa una disminución importante en la superficie agrícola y se evidencia un cambio importante en el que los cultivos anuales pierden paulatinamente la presencia dominante, para dar paso a una mayor participación de frutales y viñas que hoy caracterizan la región. La Tabla III-14 presenta un resumen de la actividad agrícola de la provincia de Curicó.

Tabla III-14. Evolución de la superficie agrícola y forestal por tipo de cultivos

Año	Superficie Total	Cultivos Permanentes	Cultivos Anuales	Praderas Artificiales hasta 5 años	Praderas Naturales y Artificiales mayores de 5 años	Plantaciones Forestales, Bosques y Montes en Explotación	Bosques y Montes Naturales No explotados
1965	456765	10704	39382	21137	121863	96441	
1975	701760	20500	44777	21547	273478	43688	89262
1997	562055	66742		21521	165157	23485	120488
2007	484200	65609		32935	213912	27850	92998

En términos de la tendencia y proyecciones futuras se observa una disminución importante en la superficie agrícola entre 1976 y 2007. Esta tendencia, aparentemente lineal, obedece a problemas de productividad y de rentabilidad del sector agrícola que pierde competitividad frente a otros sectores en términos comparativos. Es muy posible que en los próximos años esta tendencia se siga manifestando, pero que se disminuya su magnitud y que se estabilice.

No obstante lo anterior, la superficie bajo riego aún tiene por crecer. Actualmente, la provincia de Curicó muestra una superficie regada de 84600 ha (INE, 2007), con una fuerte presencia de sistemas de riego superficial ya sea “Tendido” (37.000 ha) o “Surcos” (31.000 ha). En este sentido, existen dos tipos de escenarios posibles que plantearse frente al riego y al uso del agua desde el sector agrícola. En primer lugar es razonable suponer un incremento en la superficie regada y por consiguiente un mayor consumo de recursos hídricos en la región. Por otra parte, se espera un mayor desarrollo de los sistemas de riego tecnificados (Por ejemplo, aspersión, goteo, cinta y microjet) que sustituyan a los sistemas tradicionales y que ocupen una parte importante de la expansión de la superficie bajo riego. Este potencial aumento de la eficiencia, particularmente al

reemplazar los sistemas existentes podría potencialmente hacer cambiar la demanda de agua desde el sector agrícola en su conjunto.

Los cambios de uso del suelo y cambios de cobertura vegetal observados en la composición del territorio nos llevan a formular preguntas que tiene que ver con el aumento de la demanda de agua en esta zona y su capacidad para influir en el ciclo hidrológico en la cuenca y de esta forma complementar el análisis hidroclimático anterior.

En primer lugar nos interesa saber si existen cambios significativos en la demanda de agua de la cuenca a consecuencia de la actividad agrícola. La hipótesis de trabajo para explicar cambios en el funcionamiento de la cuenca es que: “Mayor (menor) demanda desde el sector agrícola y forestal implica menor (mayor) disponibilidad del recurso a nivel de cuenca”.

Para ello se propuso analizar los cambios o tendencias que podrían verse en tres componentes fundamentales de la demanda de agua agrícola:

- i) Tasa de evapotranspiración a consecuencia de cambios climáticos
- ii) Cambios en la demanda de agua a consecuencia de variaciones importantes en la superficie
- iii) Cambios tecnológicos en el riego.

Impactos en la tasa de evapotranspiración

El flujo de vapor de agua desde la superficie a la atmósfera es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico. Su magnitud puede ser explicada en función del gradiente de concentración de vapor y de la energía disponible para promover el cambio de fase entre líquida y sólida. Mediante la combinación de la teoría del balance de radiación, teoría de la capa límite y propiedades aerodinámicas de los cultivos es posible derivar un método de estimación de la evapotranspiración de un cultivo, conocido como la ecuación de Penman-Monteith. Esta ecuación (7) fue utilizada para la estimación de la variación de la tasa de evapotranspiración de la zona bajo estudio.

$$\lambda E = \left(\Delta(R_N - G) + \rho c_p \frac{(e_s - e)}{r_h} \right) / \left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_h} \right) \right) \quad (7)$$

En esta ecuación,

- Δ es la tasa de cambio de la presión de vapor sobre el cambio de temperatura entre la superficie evaporante y el aire (Pa/K).
- R_N corresponde a la radiación Neta ($J \text{ m}^2/\text{día}$),
- G corresponde al flujo de calor al interior del perfil de suelo ($J \text{ m}^2/\text{día}$).
- ρ es la densidad del aire (kg/m^3).
- c_p corresponde al calor específico del aire a presión constante ($J/ \text{kg K}$).
- e_s y e corresponden a las presiones de vapor de saturación y real del aire y su diferencia representa el déficit de presión de vapor (Pa).
- r_h es la resistencia aerodinámica al flujo de calor sensible (días/m).
- γ es la constante psicrométrica (Pa/ K).
- r_c es la resistencia de la cubierta vegetal (días/ m).

Metodología

Se recopilaron datos meteorológicos diarios de la estación de Curicó, entregados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Las variables contempladas fueron, Temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$), temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%),

precipitaciones (mm). Debido a la ausencia de registros de viento se determinó un valor fijo equivalente a 2 m/s que es característico de las zonas mediterráneas de Chile. La radiación solar global fue estimada mediante la ecuación propuesta por Bristow y Campbell que estima su magnitud en función de la radiación potencial y la amplitud térmica observada.

Los valores de las variables meteorológicas fueron ingresados a la ecuación de Penman Monteith para estimar la tasa de evapotranspiración de referencia, que corresponde a la demanda de agua de una cierta localidad sobre un cultivo bajo, denso y en activo crecimiento usado como referencia. La Figura III-15 muestra un ejemplo de variación anual de la evapotranspiración sobre la base de datos meteorológicos de la estación de Curicó en 1961.

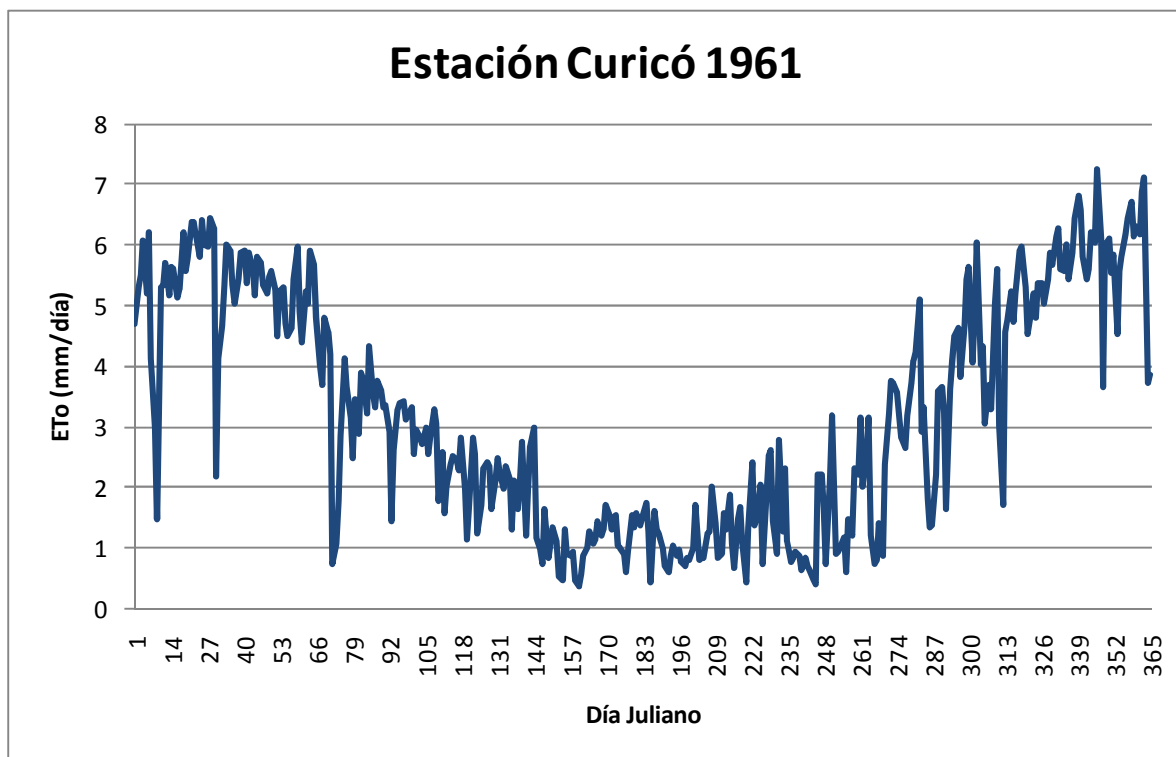


Figura III-15. Tasa de evapotranspiración diaria en la estación de Curicó a lo largo del año (días Julianos o correlativos desde el 1 de Enero)

La Figura III-16 muestra la suma de la evapotranspiración de referencia anual para el período 1975-2009 (35 años). Los valores muestran un rango de variación entre 1050 y 1230 mm/año. La tendencia observada, si bien es positiva, no tiene significancia estadística, por lo tanto se puede concluir que en el período reciente no se han observado cambios en las tasas de evapotranspiración que sean responsables de los cambios en la demanda de agua desde el sector agrícola o forestal.

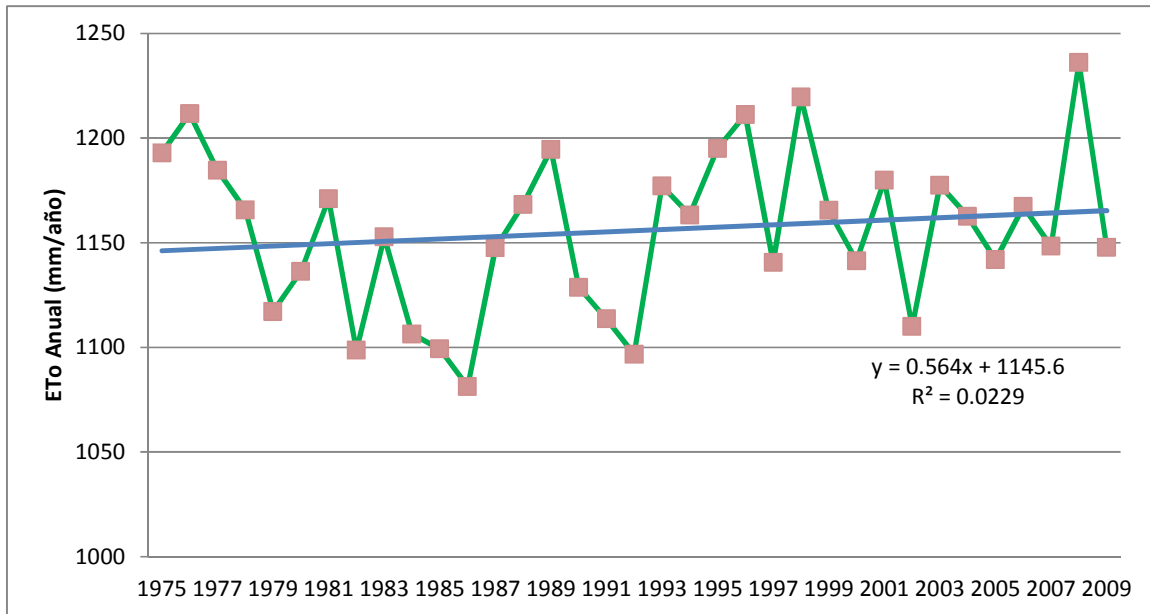


Figura III-16. Evapotranspiración de referencia anual para el período 1975-2009 en la provincia de Curicó.

Cambios en la superficie agrícola

Tal como se discutió anteriormente, en los últimos 40 años se ha observado cambios importantes en la superficie y distribución de cultivos agrícolas. Las Figuras III-17 (a,b,c) muestran la evolución observada para distintos grupos de cultivos.

Mientras la superficie destinada a cultivos anuales, frutales y plantaciones experimentó un crecimiento apreciable entre 1965 y 1976, a partir de 1997 se ha verificado una disminución importante, que los lleva a situarse en torno a las 65.000 ha en la provincia. Las praderas naturales, destinadas a la producción animal, han oscilado fuertemente en los últimos años alcanzando un valor cercano a las 200.000 hectáreas en la provincia actualmente. Por último la superficie destinada a bosques (naturales y plantaciones)

mostró un aumento importante hasta 1997 y luego ha experimentado una declinación que la lleva a ubicarse en torno a las 120.000 hectáreas.

La Tabla III-15 presenta los detalles de variación de la superficie para los principales grupos de cultivos, mostrando los valores reportados en el último Censo agropecuario y su cambio en relación a lo registrado en el censo de 1997.

Tabla III-15. Superficie de cultivos en la provincia de Curicó y variación con respecto a censo de 1997.

Cultivo	Hectáreas Censo 2007	Delta (2007-1997)
Trigo-Avena -Cebada	1703.10	-9441.10
Maíz	5497.57	350.97
Arroz	0.00	-107.70
Frejol	458.80	-1692.40
Papa	394.11	-496.19
Maravilla	72.70	23.70
Remolacha	4179.40	616.60
Tomate	1733.30	-2205.00
Arveja	4.00	-162.90
Melón-Sandía	0.00	
Uva-Kiwi	712.51	-1924.59
Vino	14756.11	5422.61
Manzano-Peral	1152.90	-11544.10
Almendo-Cerezo	1298.13	-1246.97
Naranja-Limonero	0.00	-41.40
Palto	7.60	-16.30
Nogal-Pistacho	111.00	107.20
Alfalfa-Pasto (Todo Forrajera)	6891.51	-2895.39
Pino-Eucalipto(todo Forestal)	46087.70	15158.00

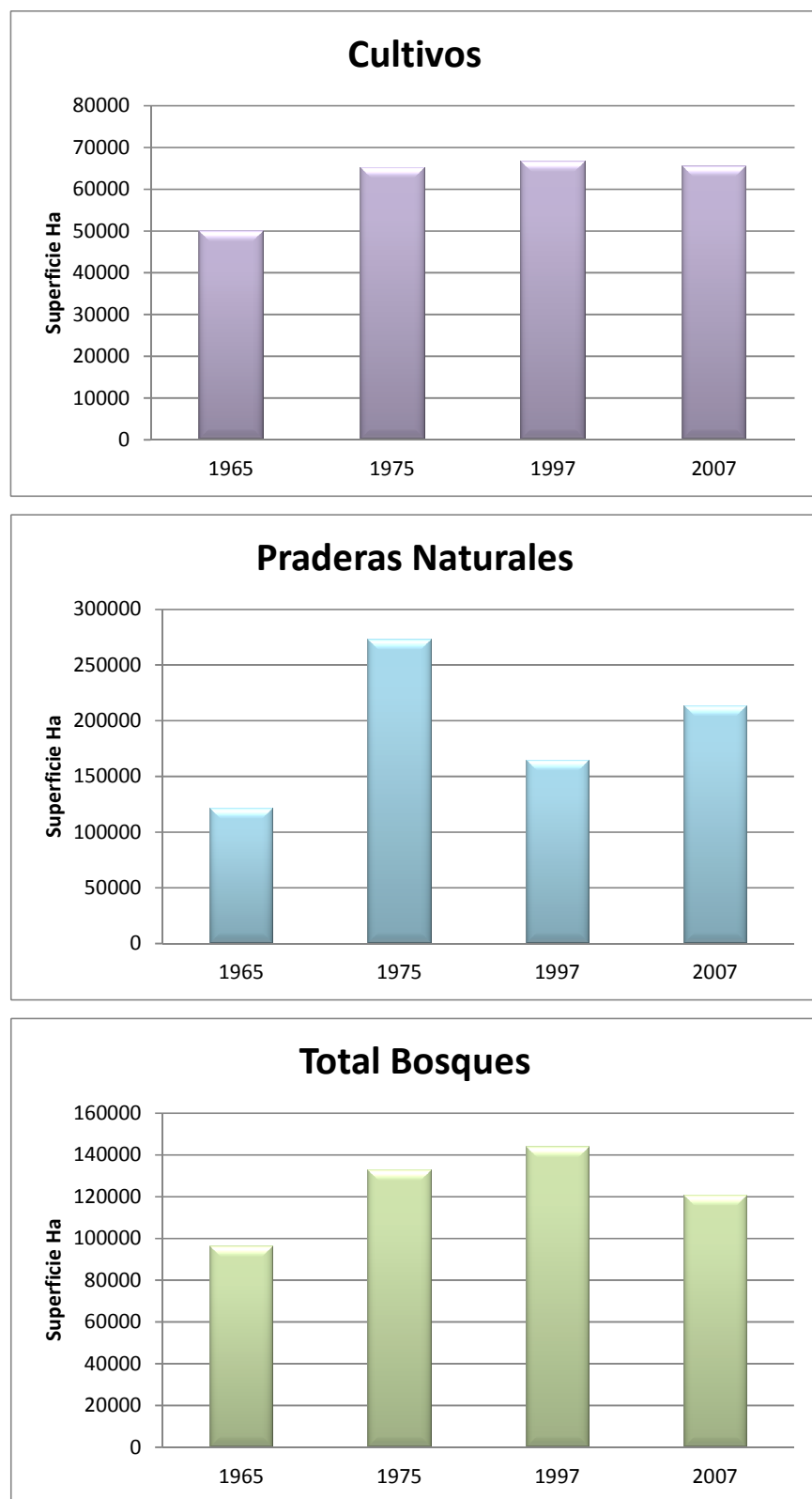


Figura III-17. Variación de la superficie de cultivos agrícolas en la provincia de Curicó
(a: Cultivos; b) Praderas c) Bosques y plantaciones).

Los resultados muestran que la superficie de plantaciones y de cultivos no ha variado en forma muy importante en los últimos años en lo que se refiere a la creación de nuevos y mayores sectores de demanda de agua de riego.

Cambios tecnológicos

Como se mencionó anteriormente la superficie bajo riego en la provincia de Curicó se estima en 85.000 hectáreas. De ellas, cerca de 68.000 hectáreas se riegan con sistemas poco tecnificados con eficiencias que fluctúan entre el 15 y 45 %. Existe un número relativamente pequeño pero creciente de regantes que emplean tecnologías avanzadas (tales como riego por goteo y microaspersión) que ostentan eficiencias de aplicación de agua relativamente altas y que, por consiguiente, tienen menores demandas de agua por unidad de superficie totalizando cerca de 14.000 hectáreas.

En términos comparativos (resultados del censo de 1997 y del 2007), los sistemas de riego gravitacional han mostrado una reducción del 9%, el sistema de riego de aspersión muestra un incremento del 34% y el sistema de riego tecnificado de goteo, cinta y microaspersión muestra un impresionante crecimiento del 1046%.

A partir de los análisis practicados es posible arribar a las siguientes conclusiones

- No hay cambios significativos en la demanda ambiental de agua, a juzgar por la variación de la evapotranspiración de referencia
- Hay reducción de la superficie total agrícola (forestal)
- Hay una tendencia al aumento de la eficiencia de riego

La suma de estas tres condiciones debiera traducirse en un menor uso de agua a nivel sectorial y por consiguiente un mayor flujo de retorno aguas debajo de la zona agrícola.

Cambios de uso del suelo en la zona alta de la cuenca del Mataquito

Los cambios de suelo en la zona media y baja de la cuenca, tienen una influencia mayor en la demanda de agua ya que pueden potencialmente afectar las tasas de evaporación y necesidades de riego. En la zona alta, los cambios de uso del suelo pueden tener un efecto sobre el escurrimiento (afectando principalmente la infiltración y evaporación). Para incorporar en términos cualitativos este efecto, se procedió a analizar las coberturas derivadas de imágenes satelitales.

Se seleccionaron imágenes LANDSAT 5 (1989) y LANDSAT 7 (1999 y 2008) para realizar este trabajo. La resolución promedio de estas imágenes es de 30 metros, lo que se considera resolución media.

Para cada imagen, se identificaron 8 coberturas mediante fotointerpretación, las cuales corresponden a los siguientes tipos: urbano, agua, bosque, matorral, suelo, agrícola y desconocido. Posteriormente, para suavizar las formas y eliminar ruido, se aplicó un filtro de mediana de 5x5. La Figura III-18 muestra un ejemplo de esta clasificación para la imagen de 1989

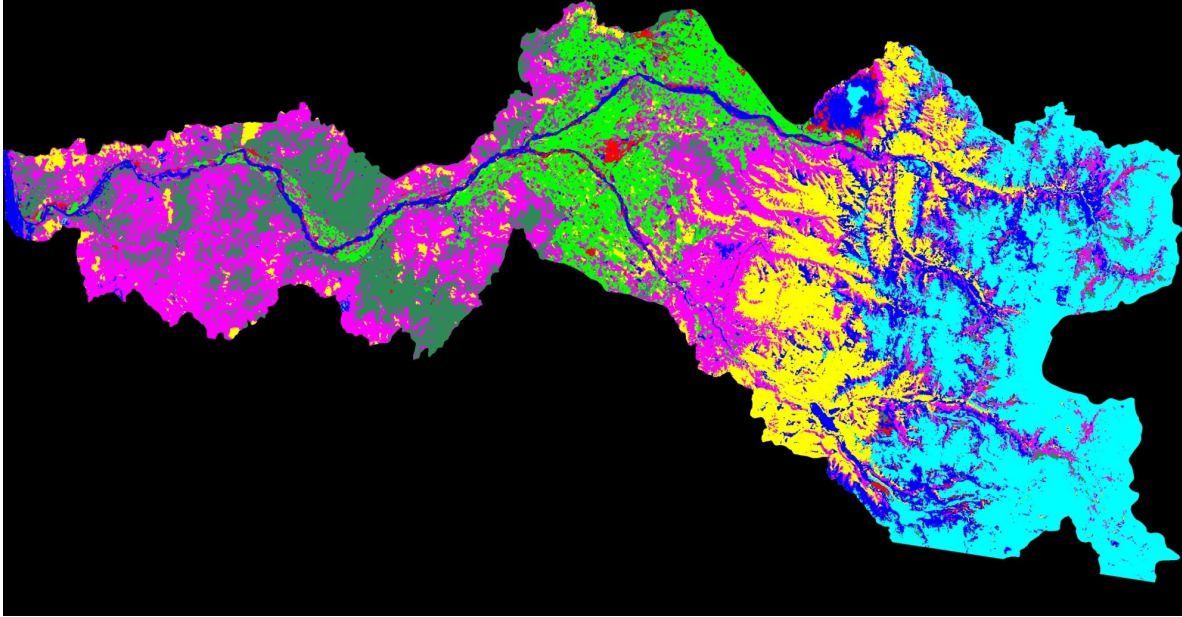


Figura III-18. Resultados de la clasificación por tipo de suelo en la imagen Landsat de 1989.

Resultados

El énfasis de la clasificación, fue colocado en las zonas de bosques, cobertura asociada principalmente al a cuenca del rio Mataquito, por lo que las inconsistencias de clasificación en otras clases (urbana principalmente), fueron ignoradas.

A continuación se presentan los resultados de clasificación (índice de Kappa) para cada imagen analizada

-Imágen 1: 17/03/1989

Overall Accuracy = 98.1421 %

Kappa Coefficient = 0.9781

-Imágen 2: 26/12/1999

Overall Accuracy = 89.5254 %

Kappa Coefficient = 0.8785

-Imágen 3: 16/01/2005

Overall Accuracy = (51815/53055) 97.6628%

Kappa Coefficient = 0.9726

La Tabla III-16 señala el área (ha) para cada tipo de cobertura a través del tiempo. Se puede observar que las coberturas que presentan las mayores disminuciones en el periodo analizado son las correspondientes a agua y bosque, mientras que las categorías asignadas a desconocido y agrícola presentan aumento el área de cobertura través del tiempo.

Tabla III-16: Variabilidad temporal para cada cobertura a través del tiempo (hectáreas).

Cobertura	17/03/1989 (has)	26/12/1999 (has)	16/01/2005 (has)
Urbano	11.000	68.000	48.000
Agua	73.000	66.000	65.000
Bosque	92.000	86.000	78.000
Desconocido	140.000	103.000	104.000
Pradera-Matorral	171.000	109.000	174.000
Suelo	74.000	100.000	60.000
Agrícola	64.000	88.000	85.000

Este análisis indica que la cobertura asociada a bosques ha sufrido una importante disminución en la cuenca. Se sugiere que este análisis sea refinado para determinar las zonas específicas de mayores cambios y que los resultados sean integrados a un modelo hidrológico para determinar la magnitud de los impactos que este cambio de uso de suelo puede tener sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del Mataquito.

Conclusiones con respecto a tendencias de otras variables de cambio global

De acuerdo a lo analizado en este estudio, en relación a las variables adicionales que inciden sobre el cambio global, se puede concluir lo siguiente.

- a) Los cambios de uso del suelo, en particular la deforestación, han sido marcados en la última década, en particular en la parte alta de la cuenca del Mataquito.

- b) La demanda de agua en el sector medio de la cuenca no ha crecido sustancialmente ni por la vía de mayor intensidad de demanda de agua de la atmósfera (la evapotranspiración de referencia no ha mostrado tendencias apreciables en el tiempo), ni tampoco por la vía de un cambio en la superficie cultivada total. Si bien es cierto que la superficie bajo riego puede haber aumentado, el incremento en la demanda se ve compensado parcialmente por el aumento de riego tecnificado con mayores eficiencias de aplicación.
- c) Una reducción en la superficie con cobertura de bosques puede tener un efecto significativo sobre la respuesta del escurrimiento de la cuenca frente a precipitaciones intensas. Se configura así un cuadro de conjugación de factores (meteorológicos, hidrológicos y del territorio) que puede potencialmente influir en la magnitud de eventos extremos de caudales del río Mataquito.

IV. CONCLUSIONES GENERALES: PROPUESTA DE PRÓXIMOS PASOS A SEGUIR PARA LA EMPRESA

El Cambio Global presenta nuevos desafíos en la gestión de los recursos hídricos y recursos naturales en el mundo. Una de las manifestaciones del Cambio Global corresponde al Cambio Climático producto del aumento de la concentración de gases de efecto invernadero. En Chile los efectos del cambio climático se traducirían en reducciones en los niveles de precipitación (especialmente en la zona centro sur del país) y aumentos en los niveles de temperatura. Adicionalmente a estos mecanismos de cambio se espera que en el futuro existan otros agentes de cambio global asociados por ejemplo a los cambios en la frontera agrícola, cambios en el uso del suelo y la urbanización.

En el caso particular de la empresa Arauco, los escenarios futuros de cambio climático y cambio global podrían implicar cambios en la disponibilidad de caudales en las cuencas estratégicas para la empresa así como también potenciales impactos en términos e

eventos extremos. Se proyectan también probables impactos potenciales en términos de la productividad forestal y de los sistemas naturales en los que la empresa mantiene su patrimonio.

Para explorar estos efectos se ha realizado un estudio integral en la cuenca del Río Mataquito donde se ubica la planta de celulosa de Licantel. Los escenarios climáticos futuros para esta cuenca muestran aumentos de temperatura que fluctúan entre 0.5-1°C a principios del siglo XXI hasta aumentos del orden de 2-2.5°C a finales de siglo. Por otra parte se proyectan reducciones promedio de precipitación en torno a un 10-15% en el primero periodo hasta en torno a un 20-30% a finales de siglo. Estos cambios tendrían importantes consecuencias en la disponibilidad de agua en esta cuenca en particular.

Como complemento a este análisis de escenarios futuros se ha llevado a cabo un análisis de las tendencias de variables hidrometeorológicas. Este análisis muestra que en la cuenca del río Mataquito se ha evidenciado en el pasado que:

- Las temperaturas han aumentado en forma estadísticamente significativa. Esta señal se ha observado especialmente en los meses de primavera para la temperatura media. Asimismo destaca una tendencia a observar rangos de temperatura cada vez mayores (Incremento de las temperaturas máximas y disminución de las mínimas)
- Disminuye la magnitud y frecuencia de precipitaciones en la época de primavera.
- Existen cambios en temporalidad de caudales y una ocurrencia de eventos extremos más frecuentes. En particular, se observa que estos eventos extremos se asocian a altos valores de precipitaciones y temperaturas mínimas anormalmente altas (noches más cálidas).
- Por último se puede apreciar una disminución de acumulación de nieve (particularmente en otoño) que repercutiría en el ritmo y magnitud de la descarga de caudales.

Estos cambios serían concordantes con la señal de cambio climático que se proyectan hacia el futuro. Sin embargo, es importante destacar que hay una conjugación de factores

(meteorológicos, hidrológicos y del territorio) que hay que considerar en estos análisis. Se llevó a cabo en este trabajo un análisis simple de las tendencias históricas de otras variables de cambio global, como por ejemplo cambios en la demanda de agua para el sector agrícola o cambios en la cobertura y uso del suelo. Pese a que no se cuantifica en este trabajo el efecto que estos tendrían sobre la hidrología de la cuenca se evidencia que también son factores relevantes de cambio que pueden actuar de manera sinérgica con otros cambios climáticos.

A pesar de que existen diferencias importantes entre las cuencas que ocupa la zona central de Chile, a nivel regional debiese tenerse presente que existen dos tipos de amenazas relacionadas al cambio global y que se expresarían en dos períodos distintos:

- (i) en el futuro cercano, se proyecta una tendencia de cambio global que al combinar aumentos de temperatura, cambios incipientes de precipitaciones y mayor deforestación puede incidir en un incremento de eventos extremos tales como inundaciones y grandes crecidas;
- (ii) en el largo plazo, por otra parte, el mayor aumento de temperatura y reducción dramática de precipitaciones lleva a proyectar mayor frecuencia de sequías y problemas asociados a los cambios en la disponibilidad de agua y estacionalidad de los caudales.

En ambas situaciones y en conformidad con los resultados de este trabajo preliminar, se sugiere a la empresa desarrollar estrategias de largo plazo para enfrentar los desafíos del cambio global. Existen en términos generales dos potenciales caminos a seguir (no necesariamente excluyentes):

- Se puede por una parte extender el análisis realizado en la cuenca del Río Mataquito para incluir herramientas más sofisticadas que sirvan para el diseño de medidas de adaptación robustas. Algunas de estas herramientas pueden estar dedicadas a proceso de recopilación de información o a la modelación de procesos

físicos (modelos hidrológicos o hidráulicos por ejemplo) y de toma decisiones (modelos de gestión de recursos hídricos).

- Por otra parte se podría también desarrollar este trabajo preliminar en otras cuencas estratégicas para la empresa.

V. REFERENCIAS

- Aselmann, I., and P. J. Crutzen. 1989. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions, *J. Atmos. Chem.*, 8, 307– 358.
- Alexander L.V., Zhang X., Peterson T.C., Caesar J., Gleason B., Tank A.M.G.K., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Kumar K.R., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D.B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J.L. (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research* 111, Doi:10.1029/2005JD006290.
- Aguilera M.A. (2007). Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos, en la región del Maule. Memoria para optar al título de Ingeniero Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Talca.
- Bae D., Jung I., Chang H. (2008). Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins. *Hydrological Processes* 22, 2644–2656.
- Bambach, N. 2010. Impacto Del Cambio Climático en la distribución de especies y comunidades arbóreas nativas características Del bosque y matorral esclerófilo de Chile. Tesis. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Boisier, J. P., Aceituno P. (2006). Changes in surface and upper-air temperature along the arid coast of northern Chile. Paper presented at 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Am. Meteorol. Soc., Foz de Iguazu, Brazil.

- Boisvenue, C.; Running, S.W. 2006. Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12: 862-882.
- Bown, F., Rivera A. (2007). Climate changes and recent glacier behavior in the Chilean Lake District. *Global and Planetary Change* 59, 79– 86, Doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.015.
- Burkett, V. y Kusler, J. 2000. Climate Change: Potential impacts and interactions in wetlands of the United States. *Journal of the American Water Resources Association* Volume 36, Issue 2, 313–320.
- Cao M., K. Gregson, S.Marshall, 1998 Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change, *Atmospheric Environment*, Volume 32, Issue 19, 1 October 3293-3299
- CEPAL. 2009. “Economía del Cambio Climático en Chile: Síntesis”
- CONAMA, 2009. Estudio de Vulnerabilidad de la Biodiversidad Terrestre en la Ecoregión Mediterránea, a Nivel de Ecosistemas y Especies, y Medidas de Adaptación Frente a Escenarios de Cambio Climático.
- Davidson, E. A. and Janssens, I. A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440, 165–173.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2008). Informe técnico: Análisis crecida río Mataquito y tributarios 22 y 23 de mayo de 2008. DGA región del Maule, Ministerio de Obras Públicas de Chile.

- Eswaran, H., E. Van den Berg, P. Reich, and J. Kimble. 1995. Global soil carbon resources, in *Soils and Global Change*, edited by R. Lal et al., pp. 27– 43, CRC Press, Boca Raton, Fla.
- Falvey M., Garreaud R.D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research* 114, Doi:10.1029/2008JD010519
- Fiala T, Ouarda T.B.M.J., Hladny J. (2010). Evolution of low flows in the Czech Republic. *Journal of Hydrology* 393, 206–218.
- Giese, B. S., Urizar S. C., Fučkar N. S. (2002). Southern Hemisphere Origins of the 1976. Climate Shift, *Geophys. Res. Lett.*, 29(2), 1014, doi:10.1029/2001GL013268.
- Helsel D.R., Hirsch, R.M. (1992). *Statistical methods in water resources*. Elsevier, Amsterdam.
- Huber, A., A Iroumé and J. Bathurst. 2008. Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrol. Process.* 22, 142–148
- Jacques-Coper M., Garreaud R. (2009). Caracterización del salto climático de mediados de los 1970s en Sudamérica. Primer Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Kendall M.G. (1975). *Rank correlation methods*, 4th Ed., Charles Griffin, London.
- Kimmins, J.P. 2004. *Forest Ecology*. Prentice Hall

- Kioutsioukis I., Melas D., Zerefos C. (2010) Statistical assessment of changes in climate extremes over Greece (1955-2002). [*International Journal of Climatology*](#). 30, 1723–1737.
- Klein Tank A.M.G., Können G.P. (2003). Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe 1946–1999. *Journal of Climate*, 16, 3665–3680.
- Lupikasza E. (2010). Spatial and temporal variability of extreme precipitation in Poland in the period 1951–2006. [*International Journal of Climatology*](#). 30, 991-1007.
- Mann H.B. (1945). Non-parametric test against trend. *Econometrica*, 13: 245-249.
- McCuen R., Beighley R. (2003). Seasonal flow frequency analysis. *Journal of Hydrology* 279, 43-56.
- McPhee, J, Rubio-Alvarez, E. Meza, R., Ayala, A. Vargas, X. and S. Vicuna. 2010. An approach to estimating hydropower impacts of climate change from a regional perspective. Watershed 2010 management conference, Innovations in watershed management under land use and climate change, Madison, Wisconsin, August 23-27.
- Melo, O., Vargas, X., Vicuna, S., Meza, F. and J. McPhee. 2010. Climate change economic impacts on supply of water for the M&I sector in the Metropolitan region of Chile. Watershed 2010 management conference, Innovations in watershed management under land use and climate change, Madison, Wisconsin, August 23-27.
- Pal I., Al-Tabbaa A. (2009) Trends in seasonal precipitation extremes - An indicator of climate change in Kerala, India. *Journal of Hydrology*. 367(1-2), 62-69.

- Pizarro R, A Benítez, C Farías, C Jordan, F Santibáñez, C Sangüesa, J Flores, E Martínez, L Román. 2005. Influencia de las masas boscosas en el régimen hídrico de una cuenca semiárida. *Bosque* 26(1):77-91.
- Pizarro R, Tapia M, Román L, Jordán C, Farías C. 2006. Coeficientes de escorrentía instantáneos para la cuenca del río Tutuvén, VII Región del Maule, Chile. *BOSQUE* 27(2): 83-91,
- Quintana J., Aceituno P. (2006). Trends and interdecadal variability of rainfall in Chile. 8 ICSHMO, Foz de Iguazu, Brasil.
- Regonda S.K., Rajagopalan B., Clark M., Pitlick J. (2005). Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the Western United States. *Journal of Climate* 18(2), 372–384.
- Rosenblüth, B., Fuenzalida, H.A. and Aceituno, P. (1997). Recent temperature variations in southern South America. *International Journal of Climatology*, 17, 67-85.
- Stewart I.T., Cayan D.R., Dettinger M.D. (2004). Changes in snowmelt runoff timing in western North America under a ‘business as usual’ climate change scenario. *Climatic Change* 62, 217–232.
- Stewart I.T., Cayan D.R., Dettinger M.D. (2005). Changes toward earlier streamflow timing across Western North America. *Journal of Climate* 18(8), 1136–1155.
- Taschetto A., England M. (2009). An analysis of late twentieth century trends in Australian rainfall. [*International Journal of Climatology*](#) 29, 791-807.
- Trenberth, K. E., Stepaniak D. P. (2001), Indices of El Niño evolution, *J. Clim.*, 14, 1697– 1701, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2.

- Vicuna S., Dracup J.A. (2007). The evolution of climate change impact studies on hydrology and water resources in California. *Climatic Change* 82, 327–350.
- Vicuna, S., Garreaud, R. McPhee, J, 2010, “Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile”, *Climatic Change*, doi: 10.1007/s10584-010-9888-4.
- Vicuna, S., Garreaud, R., McPhee, J., Meza, F. and G. Donoso. 2010b. Vulnerability and adaptation to climate change in an irrigated agricultural basin in semi arid Chile. Watershed 2010 management conference, Innovations in watershed management under land use and climate change, Madison, Wisconsin, August 23-27.
- Villarroel C., Rosenbluth B, Aceituno P. (2006). Climate change along the extratropical west coast of South America (Chile): daily max/min temperatures. 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil.
- Yenigun K., Gümüş V., Bulut H. (2008). Trends in streamflow of the Euphrates basin, Turkey. *Water Management*. 161(4), 189 –198.

VI. ANEXOS

VI.1 Test de Mann-Kendall

El test de Mann-Kendall es un test no paramétrico que se utiliza en la detección de tendencias estadísticamente significativas, sin importar que sean o no lineales. La hipótesis nula del test H_0 plantea que no existe una tendencia significativa. Una de las ventajas del uso de este test es que se basa en el signo de la diferencia entre un valor y el siguiente, y no en los valores propiamente tal, de modo que los outliers no distorsionan el resultado. Además es posible utilizarlo sin la necesidad de que la serie cumpla con alguna distribución en particular y tampoco es un inconveniente que la serie esté incompleta.

El test se basa en la comparación entre valores consecutivos cronológicamente usando el estadístico S definido de la siguiente manera:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Donde n es el número de datos y x_j , x_k son datos consecutivos del tiempo j y k , respectivamente, para $j > k$. Los datos (x_1, x_2, \dots, x_n) son independientes e idénticamente distribuidos.

Un valor positivo de S representa una tendencia al alza y por el contrario, un valor negativo representa una tendencia a la baja. Un valor cercano a cero muestra la no existencia de una tendencia importante.

En la detección de tendencias significativas para $n > 10$ se usa el test estadístico de la distribución Z mediante la obtención de la varianza de S , $\text{Var}(S)$.

$$Var(S) = \frac{1}{18} \cdot \left[n \cdot (n-1) \cdot (2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p \cdot (t_p-1) \cdot (2t_p+5) \right] \quad (3)$$

Donde g es el número de agrupaciones de igual signo y t_p es el número de datos en el grupo p^{th} . De esta manera,

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VarS}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VarS}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Si $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ se rechaza la hipótesis nula H_0 , es decir, se detecta una tendencia significativa estadísticamente. Un valor positivo de Z indica una tendencia al alza mientras un valor negativo indica una tendencia a la baja.

VI.2 Relleno de series de caudales

Para el caso de los caudales se utilizó un procedimiento similar, pero considerándose un valor de $R^2 > 0,7$. El criterio de relleno se relajó dada la menor correlación observada entre los registros, lo que se explica por los efectos de la escala espacial en la propagación de los caudales. El coeficiente de determinación fue menor a 0,7 en algunos casos y no fue posible hacer el correspondiente relleno. Los registros faltantes pueden eventualmente afectar los caudales promedios mensuales en el caso en que el mes cuente con muchos días sin valores de caudal medido o estimado. Por tal motivo, y siguiendo el criterio propuesto por Falvey y Garraud (2009), se consideró un valor aceptable del caudal promedio mensual cuando el mes en cuestión cuenta con al menos el 80% de los datos diarios luego del relleno. Por otra parte, se considera una estación fluviométrica aceptable si el registro cuenta con al menos el 70% de los años con datos válidos medidos o rellenados (nótese que los registros originales cuentan en promedio con sólo el 40% de los caudales). Así por ejemplo la estación Río Teno después de junta con Claro tiene un 55% de los años rellenados, aún así, esta estación se analiza como la mejor aproximación

de la zona norte de la cuenca ya que las otras estaciones del norte tienen menos datos medidos. Para definir la regresión lineal a utilizar en el relleno, se consideraron todos los años del registro, eliminándose los valores atípicos que no se ajustaban a la relación lineal inicialmente establecida. A partir de esta regresión se completaron los caudales faltantes, determinándose un umbral arbitrario que delimita los caudales factibles de ser usado para el relleno. Los caudales fuera de este límite no se utilizaron en este proceso. Para el relleno de datos del sector sur de la cuenca se consideraron relaciones entre distintas estaciones dependiendo de la estación a completar. Así entonces, se establecieron relaciones lineales entre las estaciones Río Colorado en junta con Palos, Río Palos en junta con Colorado y Estero Upeo en Upeo. Para cada mes se determinó la estación de referencia a partir del mayor coeficiente de correlación entre las 3 regresiones lineales. Siguiendo la metodología descrita se rellenaron 260 datos de caudales diarios en la estación Estero Upeo en Upeo, 971 en la estación Río Colorado en junta con Palos y 714 en la estación Río Palos en junta con Colorado. Por otra parte, y dada la falta de buenos registros de caudales en la zona norte de la cuenca, sólo se consideró la estación de Río Teno después de junta con Claro para este estudio. De los caudales faltantes en esta estación, se rellenaron 111 datos con información de la estación Río Teno bajo Quebrada Infiernillo. Esta última estación tampoco se utilizó en el análisis de tendencias debido a lo corto del registro (1991-2009) y la cantidad considerable de meses con menos del 80% de los caudales diarios medidos.

Debido a los efectos de escala espacial, los caudales diarios medidos en la estación de Mataquito en Licantén se correlacionan pobremente con los caudales de las otras estaciones localizadas aguas arriba. Sin embargo, la correlación de los caudales mensuales con los registrados en las estaciones de Río Teno después de junta con Claro y Río Colorado en junta con Palos si es significativa ($R^2 > 0,8$). Esto permitió rellenar los caudales mensuales utilizando estas estaciones.