



ANTOFAGASTA  
MINERALS

# EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

sobre las Cuencas del  
Río Choapa y Estero Pupío





ANTOFAGASTA  
MINERALS

# EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

sobre las Cuencas del  
Río Choapa y Estero Pupío



ANTOFAGASTA  
MINERALS



# ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE?

Hacia fines de este siglo, en la **zona central** de Chile **la temperatura se elevaría en hasta 3° o 4°C** y las **precipitaciones se reducirían en el orden de 30 a 40%**, de acuerdo a modelos climáticos sobre los que existe un amplio consenso.

Evitar el cambio climático es prácticamente imposible. Debemos, entonces, ampliar nuestras capacidades de adaptación a sus probables efectos.

Con esta convicción, Antofagasta Minerals solicitó al Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica un análisis de la variabilidad de las condiciones climáticas e hidrológicas en las

subcuencas altas del Río Choapa y Estero Pupío y una estimación de su vulnerabilidad futura en este nuevo contexto.

Para ello se realizó el estudio **“Análisis de la Vulnerabilidad Futura de las Cuencas del Río Choapa y Estero Pupío”**. El documento que aquí presentamos es una síntesis de esa investigación y sus resultados.



# CONDICIONES ACTUALES

En el área de estudio, existen tres tipos de clima dominantes; todos, con una **marcada estacionalidad de precipitaciones**.

## **En zonas altas de la cordillera**

(clima templado frío de altura), las temperaturas bajas facilitan la acumulación de nieve en invierno.

**En la zona media** (clima de estepa cálido), las precipitaciones son insuficientes para cubrir la demanda de evaporación, y los cielos son despejados y con gran insolación.

## **En la zona más cercana a la costa**

(clima de estepa con nubosidad), la presencia de nubes tipo estratos e influencia marina influyen en el incremento de la humedad relativa y nubosidad.

## **ZONA ALTA DEL RÍO CHOAPA**

**Caudales** de comportamiento nival con escurrimientos máximos en los meses de noviembre y diciembre.

## **Precipitaciones y temperaturas**

características de climas mediterráneos o templados con precipitaciones concentradas en invierno (mayo-agosto, alcanzando en promedio un total anual de 270 mm) y con temperaturas máximas anuales en los meses de verano y mínimas en invierno.

## **ESTERO PUPÍO**

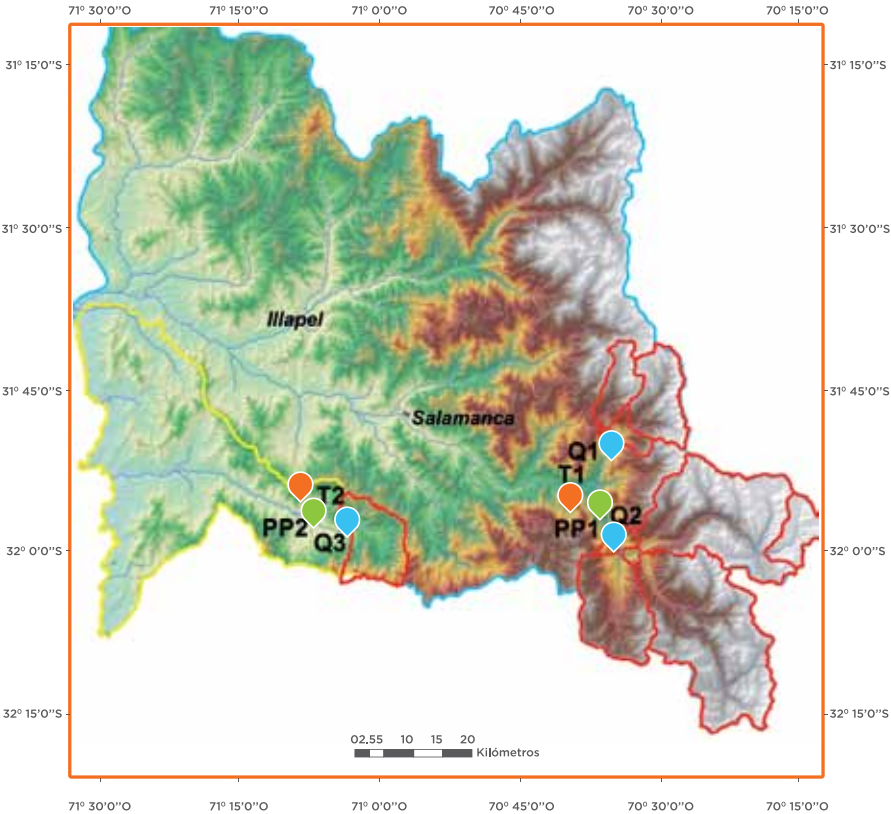
**Caudales** de régimen de escorrentía marcadamente pluvial. Responde a los eventos de precipitaciones con mayores escurrimientos en invierno.

## **Temperatura y precipitación**

con estacionalidad similar a la del Choapa.



ÁREA DE ESTUDIO



- Red Hidrológica
- Ciudades
- Cuenca Estero Pupío
- Cuenca Río Choapa
- Subcuencas estudiadas
- Cuenas
- Estaciones - Precipitación
- Estaciones de Aforo
- Estaciones - Temperatura

Figura 1. Área de Estudio. Se destacan las subcuencas estudiadas y la ubicación de las estaciones utilizadas en la modelación.



ANTOFAGASTA  
MINERALS



# VARIABILIDAD Y TENDENCIA HISTÓRICA

El análisis de tendencias de cambio a partir de registros históricos, comparadas con las de otras cuencas al sur del país, demuestra una **alta variabilidad hidrológica y climática, fuertemente influenciada por el Fenómeno del Niño y de la Oscilación del Sur en la zona de las subcuencas del Río Choapa y Estero Pupío.**

Adicionalmente, se encuentran tendencias climáticas históricas para temperatura y precipitaciones.

## TEMPERATURA

La tendencia en todas las estaciones de monitoreo y escalas de tiempo consideradas en este estudio indica un alza en la temperatura, que es significativa en los meses de verano y a nivel anual para la zona más elevada.

## PRECIPITACIONES

Pese a que las tendencias predominantes indican una reducción en precipitaciones, ninguna de éstas es estadísticamente significativa, por lo que en estricto rigor no se puede indicar que haya algún cambio relevante en esta variable.

## CAUDALES

Se aprecian tendencias negativas significativas en la cuenca del Cuncumén (donde extraen sus recursos las faenas de Minera Los Pelambres) con respecto a los caudales anuales y los caudales mínimos.



# ESCENARIOS FUTUROS CON CAMBIO CLIMÁTICO

Proyecciones obtenidas utilizando 15 Modelos de Circulación Global (GCM) y dos escenarios de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), indican un **aumento progresivo de la temperatura y reducción de las precipitaciones** en el área de estudio.

## TEMPERATURA Aumento significativo

**0,8°C** promedio en período temprano (años 2010-2040).

**1,5°C** promedio en período medio (años 2040-2070).

**2,5°C** promedio en período tardío (años 2070-2100).

## PRECIPITACIONES Reducción progresiva

**12%** promedio en período temprano (años 2010-2040).

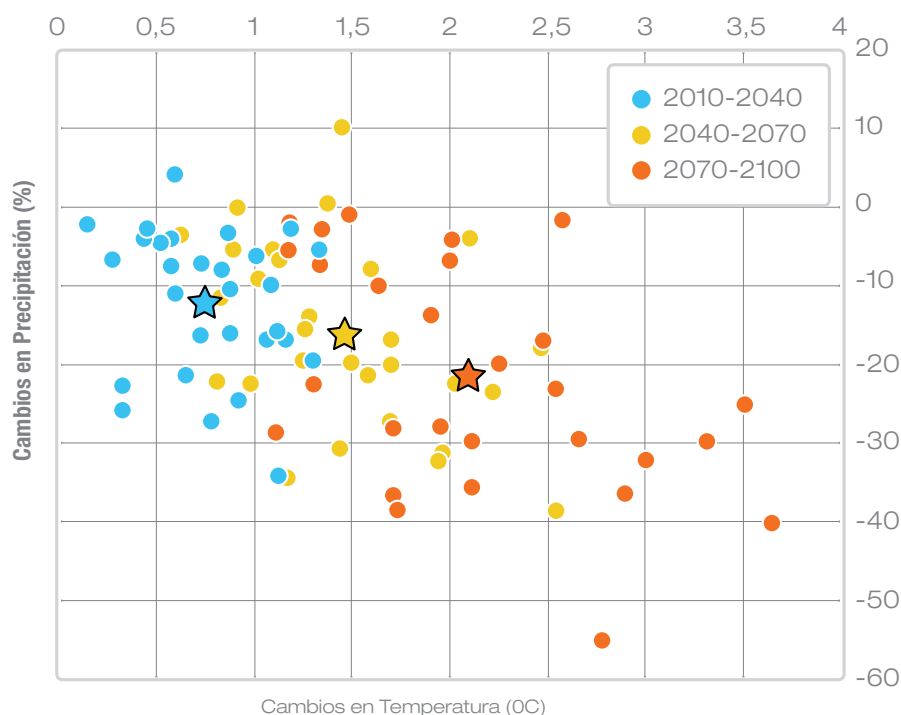
**16%** promedio en período medio (años 2040-2070).

**22%** en período tardío (años 2070-2100).



Información sobre **Modelos de Circulación Global (GCM)** en Anexo 3.

## CAMBIOS ESPERADOS EN TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN



**Figura 2. Proyección de cambios en temperatura y precipitación, tomando en cuenta todos los modelos GCM, escenarios de GEI y períodos de tiempo considerados.** Es posible apreciar, para el caso de las cuencas del Choapa y Pupío incrementos de temperatura en el rango de 0,2 a 3,7°C con respecto al período histórico (1965-2005). Las estrellas representan los valores medios para cada período.

# EFEECTO EN LOS CAUDALES

Un modelo hidrológico desarrollado utilizando la plataforma WEAP muestra que en todas las cuencas analizadas las condiciones podrían verse alteradas de manera significativa producto del cambio climático.

## REDUCCIÓN PROYECTADA

---

<b>Período Temprano</b> (2010-2040)	<b>14,0%</b>	promedio <b>anual</b>
	<b>32,5%</b>	promedio en <b>verano</b>

---

<b>Período Medio</b> (2040-2070)	<b>20,5%</b>	promedio <b>anual</b>
	<b>54,0%</b>	promedio en <b>verano</b>

---

<b>Período Tardío</b> (2070-2100)	<b>27,0%</b>	promedio <b>anual</b>
	<b>63,5%</b>	promedio en <b>verano</b>

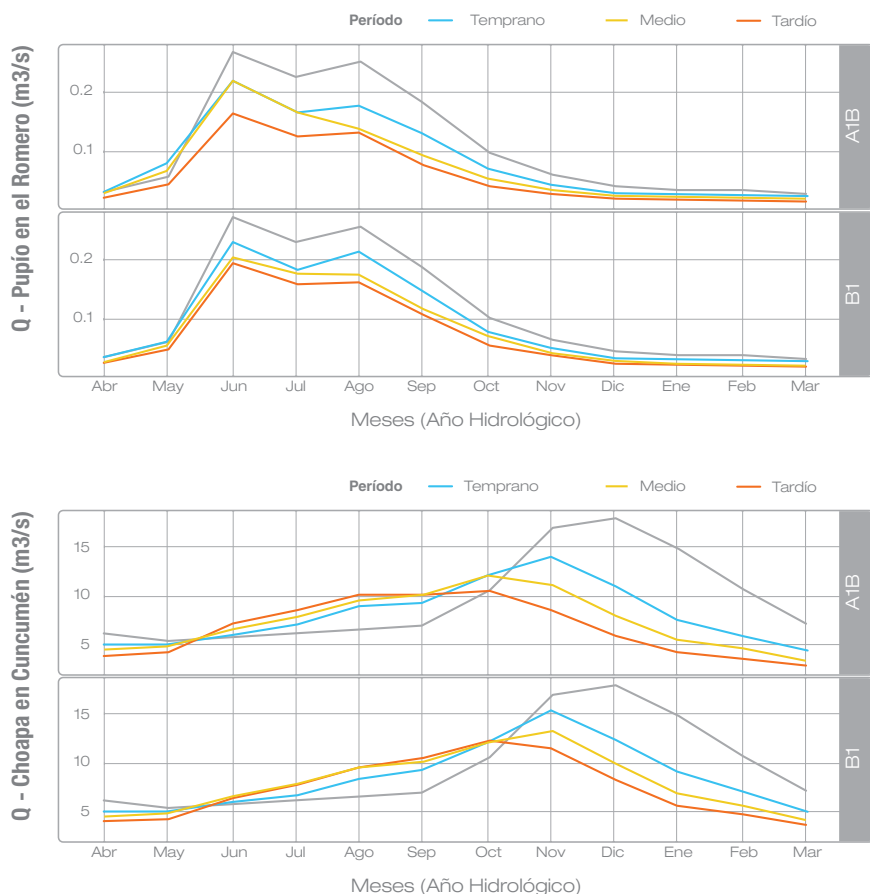
---



Información sobre **Aplicación del Modelo WEAP** en el área de estudio en Anexo 4.

## CAUDALES PROMEDIO MENSUALES

(promediados para todos los GCMs) de acuerdo a escenarios considerados (A1B y B1) y diferentes períodos de tiempo.



**Figura 3. Efecto del cambio proyectado en temperatura y precipitaciones en la estacionalidad de los caudales en estas cuencas.** En la cuenca del Río Choapa queda en evidencia un adelantamiento de la ocurrencia de los caudales máximos, así como una fuerte disminución en los caudales de verano y otoño, donde se concentran los mayores y menores niveles del año, respectivamente.





ANTOFAGASTA  
MINERALS



# CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

## TEMPERATURA

Se espera que la región experimente **incrementos significativos de la temperatura** en el curso de este siglo, los que pueden encontrarse **entre los 1° y 4°C** promedio dependiendo del modelo de predicción y del escenario de emisiones.

## PRECIPITACIONES

Los modelos muestran en la región de estudio una marcada tendencia a la **reducción de precipitaciones**, llegando a valores de **40% promedio hacia fines de siglo**.

## CAUDALES

Estos escenarios climáticos tienen implicancias en la disponibilidad futura de recursos hídricos en diferentes puntos de la cuenca. Dependiendo del período dentro del siglo y de la época del año analizada, se presentan escenarios de **reducción de caudales** que van desde un **-12%** promedio (Choapa en Cuncumén, escenario B1, período temprano 2010-2040) a **-64%** promedio (caudal de verano en Cuncumén antes de Bocatomas, escenario A1B, período 2070-2100).

# ANEXOS

- 1** Actividades y variables contempladas en el estudio
- 2** Fenómeno del Niño
- 3** Modelos de Circulación Global (GCM)
- 4** Aplicación del Modelo Hidrológico WEAP en el área de estudio

## ANEXO 1:

# ACTIVIDADES Y VARIABLES CONTEMPLADAS EN EL ESTUDIO

- Caracterización estadística de las variables climáticas e hidrológicas, con énfasis en el análisis de las tendencias de cambio observadas y la variabilidad asociada a oscilaciones climáticas globales tales como el Fenómeno del Niño (EN) y la Oscilación del Sur (SOI).
- Descripción del modelo hidrológico para las cuencas altas de Choapa, Cuncumén y Pupío, desarrollado en la plataforma de modelación WEAP.
- Análisis sobre las proyecciones de las variables climatológicas futuras y de las condiciones hidrológicas derivadas de estos escenarios climáticos.

---

*Este estudio fue realizado gracias al trabajo conjunto de las Gerencias de Medio Ambiente y de Recursos Hídricos de Antofagasta Minerals, y las Gerencias de Medio Ambiente y de Transporte de Fluidos y Tranques (TFT) de Minera Los Pelambres. Algunas de las capacidades que permitieron al Centro de Cambio Global UC desarrollar este estudio, se deben al aporte del proyecto CORFO-INNOVA 09CN14-5704, "Fortalecimiento de las capacidades para hacer frente al cambio global en Chile".*

## ANEXO 2:

# FENÓMENO DEL NIÑO

**El Fenómeno del Niño** ha sido descrito como uno de los factores explicativos de la variabilidad climática observada en Chile central. Este fenómeno corresponde a una anomalía en la temperatura media observada en el Pacífico Ecuatorial como consecuencia de la alteración de patrones de circulación atmosférica y oceánica.

En este fenómeno se distinguen tres fases:

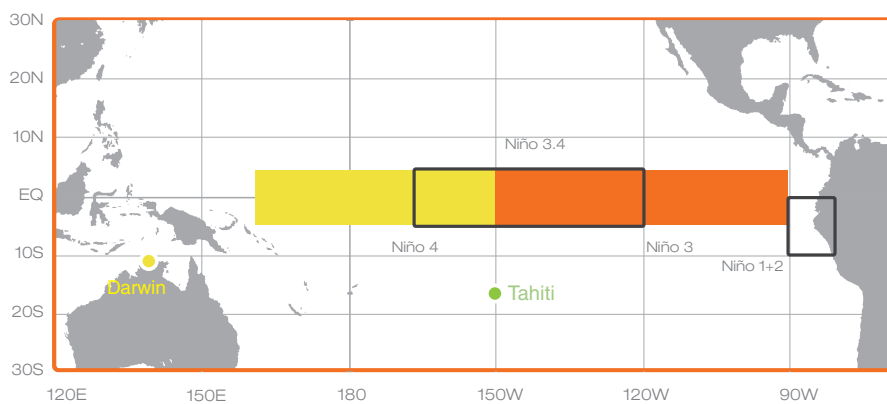
- **La Niña:** enfriamiento anómalo que coincide con un fortalecimiento de los vientos y anomalías positivas de presión.
- **El Niño:** calentamiento anormal producto de la reducción de los vientos y que tiene por contraparte anomalías negativas de presión en la zona del Pacífico Occidental.
- **Fase Neutral:** condiciones en las cuales la temperatura del Pacífico Ecuatorial se mantiene dentro de los rangos climatológicos normales.

Normalmente, el umbral que se usa para declarar que se está en presencia del Fenómeno del Niño (o fase cálida) es de anomalías superiores a  $0,5^{\circ}\text{C}$ , mientras que para la Niña (o fase fría) la anomalía debe ser más fría que  $-0,5^{\circ}\text{C}$ .





## REGIONES DE MONITOREO DEL FENÓMENO DEL NIÑO



**Figura 4. Representación de las 4 Regiones El Niño.** La zona más importante, donde se sitúan boyas para la medición continua de las condiciones oceanográficas, corresponde a la comprendida entre las latitudes 5° N y 5° S y longitudes 90° W y 170° W. Se distinguen cuatro grandes zonas (1,2,3,4) y una que es considerada como intermedia (3.4), la cual muestra las mayores asociaciones con el régimen climático de Chile.

Fuente: NOAA.



ANTOFAGASTA  
MINERALS



## ANEXO 3:

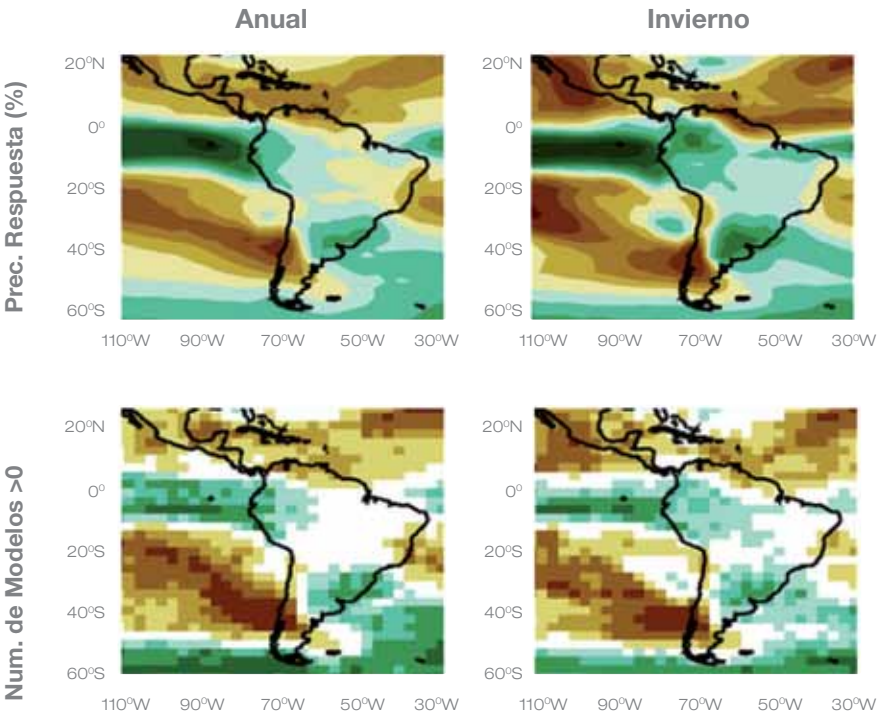
# MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL (GCM)

Los **Modelos de Circulación Global** proporcionan estimaciones cuantitativas sobre los cambios climáticos futuros, a escala continental y más allá de ésta. Su verosimilitud está dada porque se basan en principios físicos aceptados y por su capacidad 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 variables como la temperatura, que para otras como las precipitaciones.

Los modelos son unánimes en cuanto a la proyección que hacen del calentamiento considerable del clima por el aumento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI). La magnitud de este calentamiento está en correspondencia con las observaciones de cambios en diversas variables geofísicas así como también el resultado de cambios climáticos observados y reconstrucciones de climas pasados. Sin embargo, la consistencia en las proyecciones futuras de cambios en precipitación es considerablemente menor.

# PRECIPITACIONES PROYECTADAS PARA SUDAMÉRICA

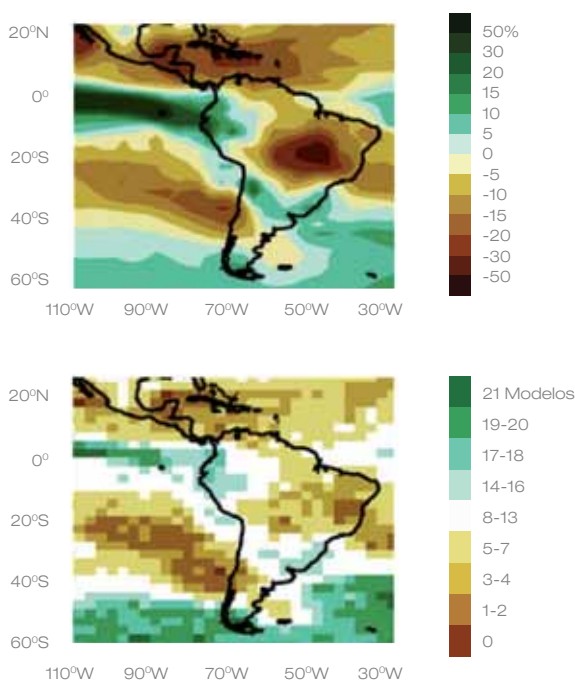
Los aumentos de precipitación se dan de manera robusta en la región alrededor de Ecuador, del Río de la Plata y en el extremo austral del continente.



**Figura 5. Promedios de cambios proyectados en precipitación para Sudamérica y el número de modelos que proyectan en el continente un aumento en los niveles de precipitación para finales de siglo con respecto a la situación histórica. Se pueden apreciar aquellas zonas donde la gran mayoría de los modelos proyectan aumentos de precipitación (zonas de color verde) y las zonas donde la mayoría de los modelos proyectan disminuciones de precipitación (zonas de color café).**

Por otra parte, se evidencian reducciones de precipitación de manera robusta en gran parte del territorio chileno y del occidente argentino, del extremo norte del continente y del Amazonas para algunos meses del año.

### Verano



Fuente: Cuarto Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC 2007).

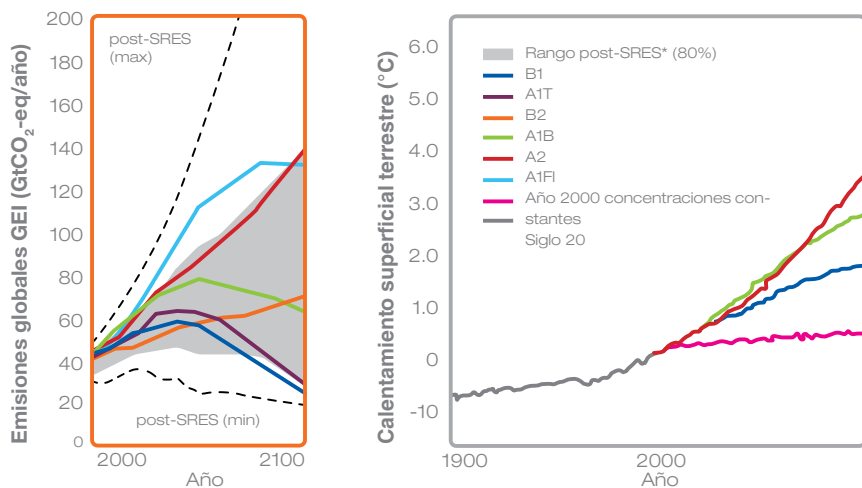




Los distintos **escenarios de emisión de GEI** son elementos a considerar en la proyección de clima a futuro. En este estudio se utilizaron los escenarios denominados A1B y B1, los cuales representan dos condiciones contrastantes.

El **escenario A1B** representa un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido, bajo crecimiento poblacional y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. En este escenario, la gente persigue la riqueza personal en lugar de la calidad ambiental.

El **escenario B1** representa un mundo convergente con la misma población mundial y línea evolutiva a la que pertenece el escenario A1B, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de la información, con reducciones en la intensidad material y la introducción de tecnologías limpias y eficientes en el uso de recursos.



**Figura 6. Aumento de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (Gigatoneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por año), y el aumento en la temperatura superficial terrestre (°C) para diversos escenarios de emisión.**

\* Post-SRES posterior al Reporte Especial de Reportes de Emisión (Special Report on Emmissions Scenarios).

Fuente: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007.

## ANEXO 4:

# APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO WEAP EN EL ÁREA DE ESTUDIO

**El modelo WEAP** (*Water Evaluation And Planning System*), desarrollado por el *Stockholm Environment Institute-SEI*, es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos. WEAP apoya la planificación de los recursos al incorporar la modelación de la oferta de agua mediante un módulo hidrológico basado en relaciones físicas de los componentes del ciclo hidrológico, a escala de subcuenca, con la demanda hídrica caracterizada por el sistema de distribución, infraestructura y nodos de demanda de agua.

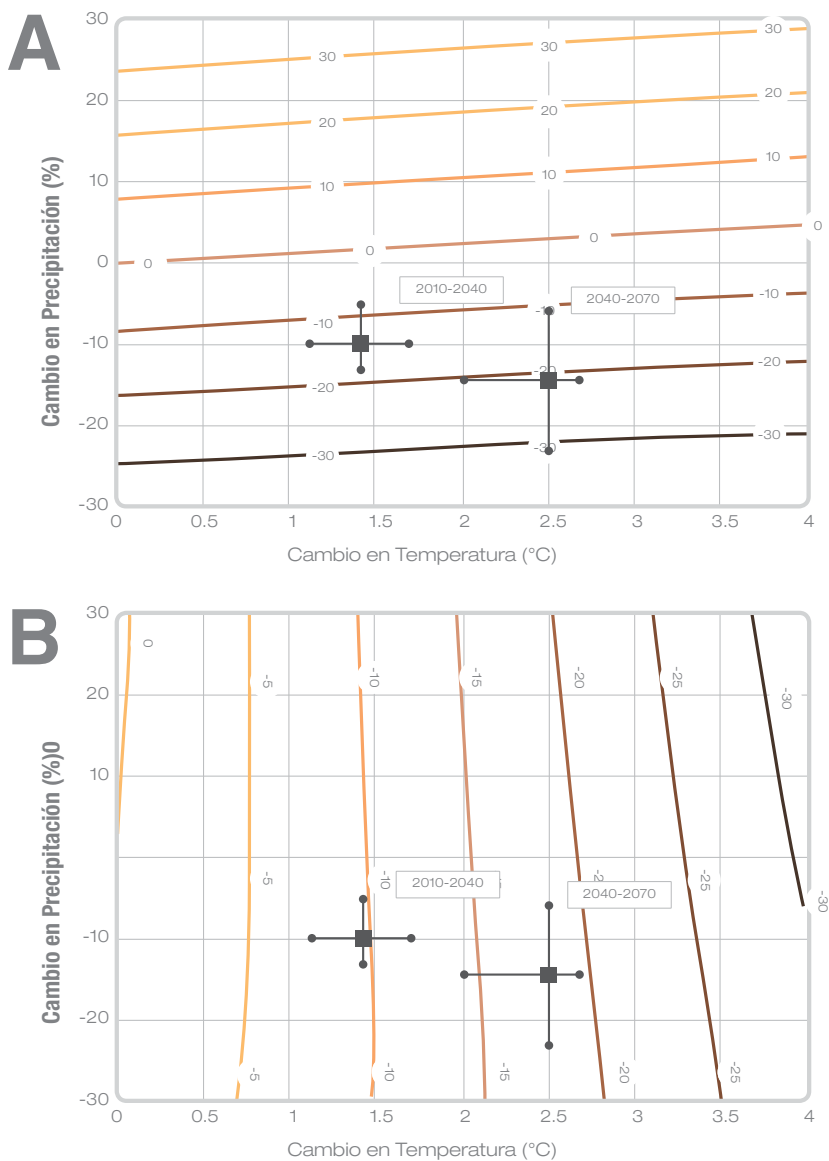
Este modelo se utilizó para estudiar las probables condiciones hidrológicas futuras en base a dos posibles métodos de análisis. El primero se basa en utilizar en el modelo hidrológico de manera directa los escenarios climáticos provenientes de los GCMs, los que son ajustados vía un procedimiento de bajada de escala o *downscaling*. El segundo consiste en perturbar la serie de condiciones climáticas históricas con una secuencia de cambios discretos en las variables principales: temperatura y precipitación.



Utilizando la metodología en base a *downscaling* se aprecia que para todos los puntos de control existe una importante reducción en los caudales anuales consistente para todos los modelos, creciendo en magnitud a medida que se avanza hacia el futuro. Es de especial relevancia, dadas las proyecciones de cambio en temperatura, el cambio en la estacionalidad de los caudales, traducido en un adelantamiento de la ocurrencia de los caudales máximos, así como una fuerte disminución en los caudales de verano y otoño.

Los resultados del análisis de sensibilidad muestran la fuerte sensibilidad del sistema del Choapa Alto a la temperatura, especialmente en los meses de verano y otoño, donde el efecto de la temperatura sobre la estacionalidad de los caudales es relevante.

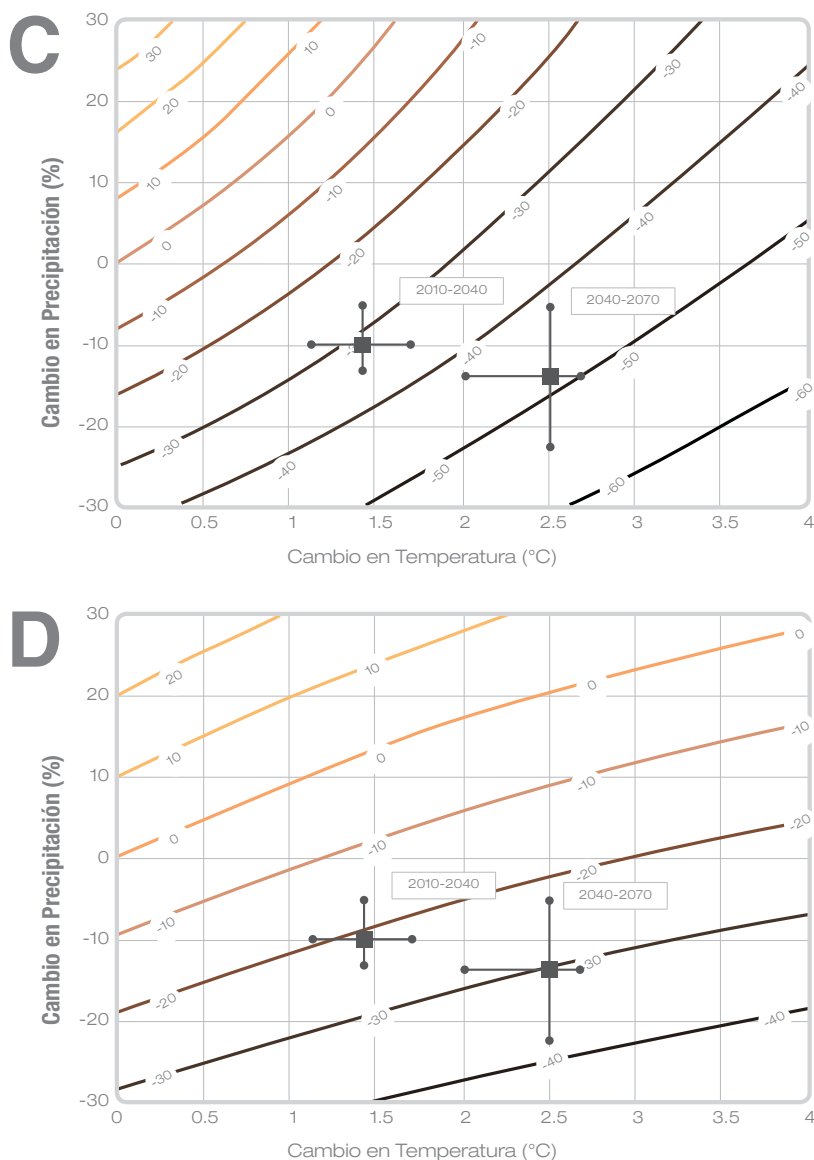
## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LOS CAUDALES DE CHOAPA EN CUNCUMÉN



**Figura 7. Caudales modelados para la estación Choapa en Cuncumén:**

**A.** Caudales totales anuales **B.** Cambio en el centroide en días.





**Figura 8. Caudales modelados para la estación Choapa en Cuncumén:**

**C.** Caudal de Verano (dic-feb) **D.** Caudal de Otoño (mar-may).

Las figuras anteriores muestran como el centroide(\*) del hidrograma se adelanta en torno a 10 días con respecto a la situación actual, lo cual se explica tanto por una mayor tasa de derretimiento en altura como por una menor área efectiva de acumulación de nieve en el invierno.

Se espera para este sistema, y en base a los cambios proyectados en el clima (cruces en figuras), una reducción en torno al 10 y 20% para un período temprano en los caudales anuales, siendo superiores al 30% en los caudales de verano y otoño.

En contraste, el sistema Pupío se muestra más insensible a la temperatura en los caudales de verano y otoño, dada su naturaleza pluvial, relevando el rol de la temperatura a efectos indirectos sobre los caudales, tales como un aumento de la evaporación de la cuenca. Asimismo, el cambio en las estacionalidad es marginal, dadas las condiciones antes mencionadas, con cambios en el centroide que no son relevantes.

---

(\*) El centroide de una variable, ya sean precipitaciones o caudales, es aquel punto en el cual se encuentra el centro de masa de la serie anual de dicha variable. Es definida como el momento del año donde ha ocurrido el 50% del total anual observado. Una disminución en este valor representa un adelantamiento de caudales o precipitación.





ANTOFAGASTA  
MINERALS

Av. Apoquindo 4001  
Piso 18, Las Condes  
Santiago, Chile  
Tel: (+ 56-2) 2798 7000  
Fax: (+ 56-2) 2798 7445

[www.aminerals.cl](http://www.aminerals.cl)

Junio 2013

