



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Agronómicas
Centro de Agricultura y Medio Ambiente



ATLAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ZONAS DE RÉGIMEN ÁRIDO Y SEMIÁRIDO

Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana
CHILE



Proyecto financiado por el Fondo de Protección Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente de Chile y con el soporte del Proyecto Vulnerabilidad y Adaptación a los Extremos Climáticos en las Américas VACEA, IRIACC-IDRC Canadá.



ATLAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ZONAS DE RÉGIMEN ÁRIDO Y SEMIÁRIDO

Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana (Chile)

Proyecto financiado por el Fondo de Protección Ambiental del Ministerio del Medio Ambiente de Chile y con el soporte del Proyecto Vulnerabilidad y Adaptación a los Extremos Climáticos en las Américas VACEA, IRIACC-IDRC Canadá.

EQUIPO EJECUTOR

Dr. Fernando Santibáñez Q.

Responsable Científico
Bioclimatología y Modelación de Impactos

Dra. Paula Santibáñez V.

Cartografía y Modelación Bioclimática
Modelación de Escenarios Climáticos

MS© Carolina Caroca T.

Geomática y Productos Cartográficos
Modelación de Escenarios Climáticos

PhD Pablo Morales P.

Economía de los Recursos Naturales

Paulina González M.

Ingeniería en Recursos Naturales
Análisis y Procesamiento de Información

Ninoska Gajardo A.

Ingeniería en Recursos Naturales
Análisis y Procesamiento de Información

Pablo Perry C.

Análisis y Procesamiento de Información
Fotografías Atlas

Cecilia Melillán F.

Coordinadora Proyecto

Centro AGRIMED

Facultad de Ciencias Agronómicas

Universidad de Chile

Santiago, Chile

2014

Asesor Economía Agraria:

MS Jorge González U.

Inia - Quilamapu

Se deja expreso reconocimiento a la colaboración de la Oficina Comunal de INDAP CHOAPA, por la facilitación de la logística de los procesos participativos que fueron necesarios durante la ejecución del diagnóstico.

ISBN: 978-956-19-0844-4

P.I.: 237.441

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra sin la autorización expresa de sus autores.

Diseño y Diagramación

Paulina Fuenzalida V.

Impreso en:

Imprenta GRÁFICA MARMOR

García de la Huerta 209, San Bernardo. Santiago, Chile.

Índice

▶ Introducción	6
▶ Capítulo 1: Los Climas de la Zona Semiárida de Chile	8
▶ Capítulo 2: Variabilidad y Tendencias Climáticas	18
▶ Capítulo 3: Generación de Escenarios Climáticos de Alta Resolución	32
▶ Capítulo 4: Cambio Climático y Ecosistemas	40
▶ Capítulo 5: Cambio Climático y Agricultura	52
▶ Capítulo 6: Cambio Climático y Recursos Hídricos	72
▶ Capítulo 7: Cambio Climático y Recursos Edáficos	82
▶ Capítulo 8: Vulnerabilidad del Sistema Agrícola	94
▶ Anexos	104



Introducción

→ Pocas dudas quedan que el clima mundial ha cambiado y seguirá cambiando cada vez más aceleradamente dentro de este siglo. La presencia humana se está haciendo sentir con fuerza en los océanos, en los continentes, en la atmósfera. Al parecer el tamaño que ha alcanzado la población humana, unos 7000 millones de personas, consumiendo diariamente 90 millones de barriles de petróleo, 11,5 km³ de agua dulce, 4,1 millones de toneladas de acero, 6,8 millones de m³ de madera, 18 millones de toneladas de carbón, y 726 mil toneladas de plástico, es más que suficiente para llevar al planeta a una situación crítica. Los océanos se han ido llenando de basura, las aguas continentales agotando y degradando en su calidad, y la atmósfera absorbiendo las casi 1000 toneladas por segundo de gases de efecto invernadero, lo que está provocando un calentamiento en torno de los 0,2°C cada 10 años. Junto con esto, los bosques del mundo, que son los grandes reguladores del clima, se siguen extinguiendo en las regiones tropicales, bajo la sierra y el fuego, a razón de 24 ha por minuto. Frente a toda esta febril actividad humana, el planeta nos está enviando señales inequívocas de estrés. La capacidad de neutralizar las externalidades negativas de este enorme consumo de recursos naturales pareciera haber sobrepasado el límite del planeta para neutralizar los efectos de las grandes cantidades de desechos líquidos, sólidos y gaseosos que van al ambiente. Recientemente la NOAA (Administración Nacional de

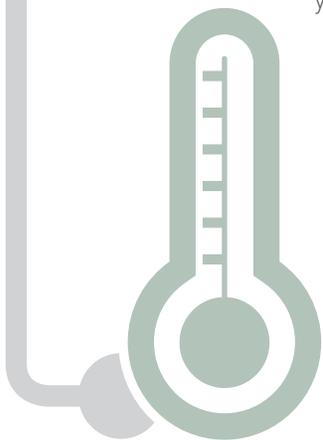
los Océanos y la Atmósfera de USA) informó que por primera vez, desde que hay registros, la atmósfera habría sobrepasado las 400 partes por millón de contenido de CO₂ en su observatorio Mauna Loa de Hawái. Según las leyes de la física, es imposible que una intervención de esta magnitud no tenga efectos en el comportamiento de la atmósfera, por lo que los cambios que sufrirá el escenario climático mundial serán uno de los grandes desafíos que enfrentará la humanidad en este siglo. Los cambios permanentes que podría sufrir el clima de las diferentes regiones del mundo, exigirán importantes acciones de adaptación para reducir los riesgos naturales, mantener la capacidad de producir alimentos, evitar la degradación de los ecosistemas, las extinciones de importantes especies, el agotamiento del agua dulce, la degradación de los suelos y un potencial desequilibrio biológico que afectaría a los ecosistemas naturales, agrícolas y a la salud humana.

El alza de la temperatura y aumento de la sequía en extensos territorios, forzarán a los sistemas biológicos del planeta a una adaptación que podría tener alto costo para la vida. Las especies que no lo consigan, desaparecerán, como ha ocurrido a través de la historia del planeta. Aquellas que lo consigan, lo harán desarrollando estrategias de adaptación que podrían reconfigurar los ecosistemas actuales. Sólo pensar en esto ya es algo complejo por cuanto surgen preguntas como: ¿En qué medida el desierto de Atacama

La huella humana en el planeta: la humanidad consume diariamente 90 millones de barriles de petróleo, 11,5 km³ de agua dulce, 4,1 millones de toneladas de acero, 6,8 millones de m³ de madera, 18 millones de toneladas de carbón, 726 mil toneladas de plástico, 24 ha de bosque tropical desaparecen en cada minuto, casi 1000 toneladas de gases de efecto invernadero se inyectan en cada segundo a la atmósfera.



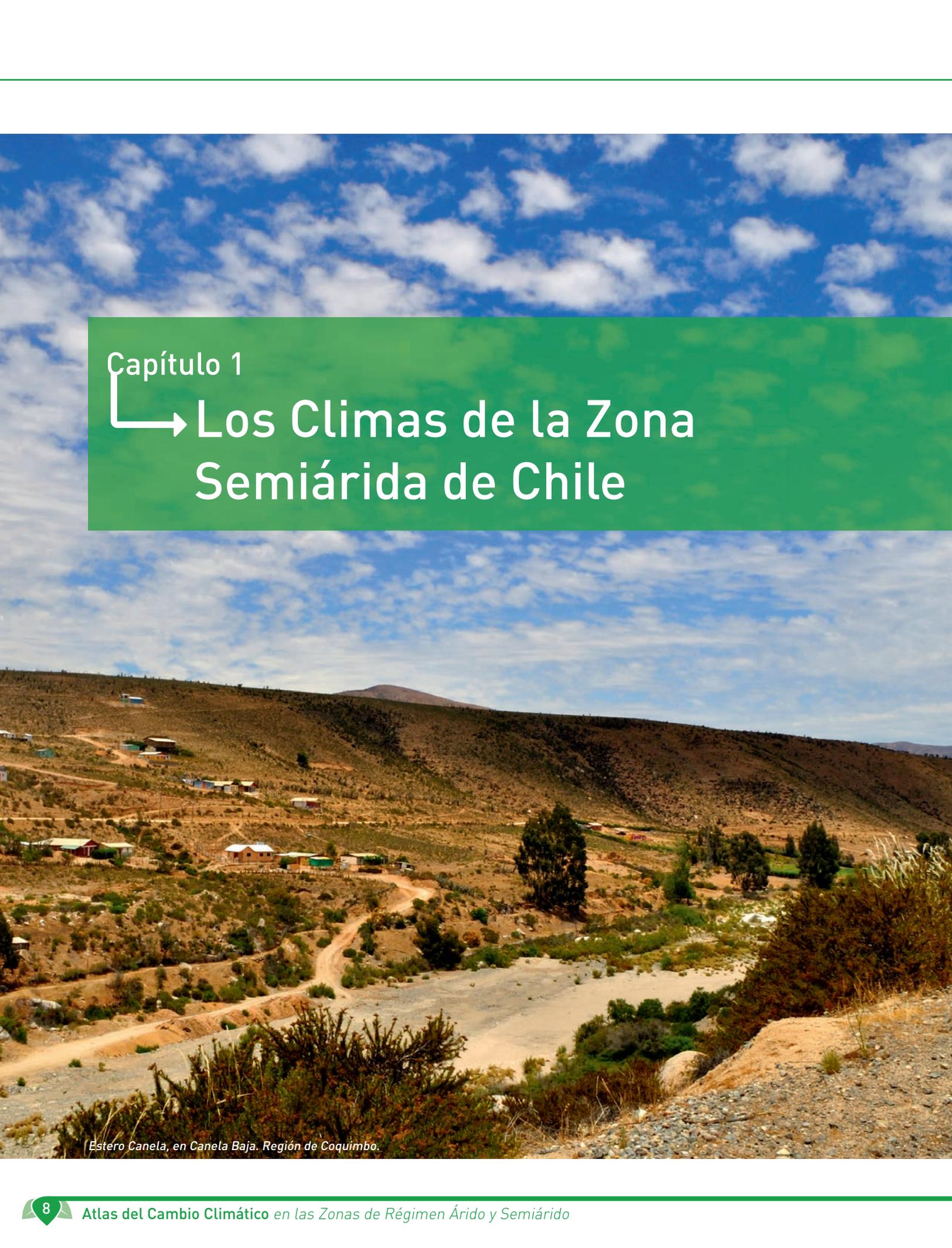
podría incorporar nuevas tierras hacia el sur?, ¿Cuánto podrían verse amenazados nuestros ecosistemas? ¿Cuáles podrían ser los problemas a que se enfrentará la producción de alimentos en distintas zonas del país? ¿Cuánto se verán afectados nuestros recursos hídricos?, ¿Cuáles son los extremos climáticos a los que nos enfrentaremos? Cada país tiene la tarea de proyectar la forma como este calentamiento podría afectar a sus actividades económicas y a la calidad de vida de sus habitantes, para luego diseñar las estrategias que le permitan resguardar dicha calidad de vida. Este Atlas es una contribución en la tarea de dar una dimensión espacio temporal a los desafíos y oportunidades que nos trae el cambio climático.



La inteligencia humana, potente motor de creación, es a la vez una virtud y una peligrosa arma. Con ella el ser humano ha creado lo que ninguna especie pudo nunca, ha transformado su entorno, ha dominado a la naturaleza, ha subyugado al mundo viviente, con ella el ser humano está destruyendo su propio nido, olvidando que todo lo que existe en la naturaleza tiene una razón, un rol, una misión, cuya ausencia podría acabar con la propia existencia humana.



Musgos en el bosque esclerófilo de la Reserva Nacional Río Clarillo. Región Metropolitana.

A wide-angle photograph of a semi-arid landscape in Chile. The foreground shows a dry, sandy riverbed with sparse green shrubs. In the middle ground, a small settlement with several houses is situated on a hillside. The background features rolling hills under a bright blue sky with scattered white clouds. A green rectangular box is overlaid on the upper part of the image, containing white text.

Capítulo 1

↳ Los Climas de la Zona
Semiárida de Chile

Estero Canela, en Canela Baja. Región de Coquimbo.

Introducción

→ El territorio chileno se caracteriza por el gran número de condiciones climáticas que ocurren en breves distancias, como consecuencia de los gradientes inducidos por la distancia al mar, la altitud y la extensa presencia latitudinal del país (Santibáñez et al, 2008). Estos gradientes latitudinales son sorprendentemente suavizados por la intensa influencia que ejerce el Océano Pacífico a lo largo del territorio nacional, a diferencia de los fuertes gradientes longitudinales inducidos por la presencia de enormes elevaciones montañosas situadas a distancias relativamente reducidas del mar. A raíz de esta configuración fisiográfica se puede encontrar en el país desde un suave clima litoral hasta un intenso clima polar de altura, en una franja de sólo 180 km en promedio.

En este capítulo se presenta una descripción de las condiciones climáticas que definen a la zona de régimen árido y semiárido del país, conformada por los territorios subdesérticos situados entre las regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana. Básicamente se trata de una zona con una franja costera fresca, húmeda y nubosa, que contrasta enormemente con las condiciones climáticas de los valles interiores, donde las temperaturas y la radiación solar aumentan considerablemente.



→ Temperaturas Extremas y Precipitación

La zona de régimen semiárido de Chile se caracteriza, al igual que el resto del país, por una marcada influencia oceánica, por lo que en la franja costera el clima es considerablemente más fresco que en el interior. Como factores reguladores del clima destacan la influencia oceánica y la altitud provocada por la cordillera de Los Andes. A estos factores se suman además la presencia del Anticiclón del Pacífico Sur Oriental (APSO) y de la corriente marina de Humboldt, que contribuye a enfriar las aguas del océano.

El APSO es el factor responsable de la condición desértica del norte y de la aridez de la zona central, por cuanto bloquea la entrada de los frentes provenientes desde el suroeste que se generan en el frente circumpolar. Este bloqueo tiene una oscilación estacional, debido a que el APSO se desplaza hacia el sur en verano, trasladando la típica aridez del desierto varios cientos de kilómetros hacia el sur. Con la llegada del invierno el APSO retrocede hacia zonas más boreales, permitiendo el ingreso de los frentes hacia la zona

central. Además del bloqueo de los frentes provenientes del suroeste, el APSO genera un importante efecto de inversión térmica, cuyo techo se sitúa entre los 800 y 1200 m de altitud. El aire descendente se comprime y calienta durante el descenso, pero al encontrarse con la superficie fría del océano el calentamiento se detiene, enfriándose la atmósfera cercana a la superficie e invirtiéndose el perfil térmico. Es así como se forma una "capa de inversión", que corresponde a una masa de aire frío y pesado de un espesor medio de

unos 1000 m, que recibe la presión descendente del anticiclón situado sobre ella, bloqueando las dinámicas de convección y favoreciendo las condiciones de extrema estabilidad atmosférica propias de esta zona del país.

Por otro lado, el brusco enfriamiento que reciben las masas de aire provenientes desde el oeste al pasar por sobre las frías aguas de la corriente de Humboldt, provoca la condensación del vapor de agua, generando

neblinas densas mejor conocidas como “camanchacas”, que logran penetrar hasta unos 25 km hacia el interior del continente, empujadas por la brisa marina. Este vapor emanado desde la superficie del océano es retenido por la capa de inversión térmica, que obstaculiza su ascenso hacia la alta tropósfera. Es de especial relevancia la formación de estas neblinas en sectores elevados de la costa situados muy próximos al mar, pues en estos casos el relieve provoca un brusco ascenso de las masas

cargadas de vapor provenientes del océano, forzando la condensación del mismo durante el ascenso.

La frecuente formación de nubes costeras y neblinas favorece que el clima del litoral de la zona semiárida sea considerablemente más fresco y húmedo que en el interior.



Nubosidad costera en la Ruta 5 norte, al sur de Ovalle. Región de Coquimbo.

A raíz de esta condensación se forman nubes rasantes frecuentes en algunos sectores costeros altos, que favorecen la formación de comunidades vegetales sustentadas por el depósito de agua que la neblina hace sobre las hojas, humedeciendo el suelo superficial por simple goteo. Este fenómeno le da un carácter notablemente más húmedo a las zonas costeras en relación con su pluviometría real, favoreciendo incluso en casos particulares la sustentación de comunidades vegetales azonales, propias de climas más septentrionales, como es el caso de la vegetación del Parque Nacional Fray Jorge.

La temperatura máxima de enero en los sectores costeros bordea los 25°C, mientras que en los valles interiores puede superar fácilmente los 30°C. De la misma forma, la radiación solar va aumentando al disminuir la nubosidad y hacerse más seco el aire. Las temperaturas mínimas en tanto, van disminuyendo gradualmente desde la costa hacia el interior, siendo hasta 10°C más bajas a 100 km con respecto al borde costero.

La franja de marcada influencia marina que ingresa contiguamente adentro por unos 20 a 30 km y penetra por los valles de los ríos hasta unos 60 km, aporta un clima fresco, húmedo y con gran nubosidad al litoral de la zona semiárida, diferenciándolo del clima propio del interior, donde las temperaturas máximas y la radiación solar van aumentando gradualmente hacia la parte media y alta de los valles.



Bosque laurifolio relictó en el Parque Nacional Fray Jorge. Región de Coquímbo.



Embalse Culimo, valle del Quilimarí. Región de Coquímbo.



El clima húmedo de la costa favorece la formación de comunidades azonales como la vegetación presente en el Parque Nacional Fray Jorge (foto izquierda), que contrasta enormemente con las cálidas y secas condiciones climáticas propias del interior de la zona semiárida (foto derecha).

Los sectores interiores se caracterizan por una elevada frecuencia de días despejados (que incluso pueden superar los 300 por año), una cantidad de días grado que puede ser superior a 2000 al año, temperaturas máximas de enero por sobre los 30°C, déficit hídrico anual de unos 1000 a 1300 mm, radiación solar anual de alrededor de 140 Kcal/cm² y con hasta 180 días cálidos por año. Hacia la precordillera se produce un refrescamiento especialmente de las temperaturas mínimas, debido al descenso del aire frío desde las laderas y valles cordilleros durante la noche. Estos sectores presentan una temperatura máxima de enero bastante menor que en las zonas costeras y de interior, no superando los 23°C.



Monumento Natural el Morado. Región Metropolitana.

Casi todo el territorio posee un marcado ciclo diario de vientos. Durante el día las brisas penetran de mar a continente, atraídos por la activa convección generada como consecuencia del calentamiento de la parte interior del país. Durante la noche este ciclo se invierte, generándose una brisa de continente a mar, debido al mayor enfriamiento del continente interior, lo que a su vez invierte el gradiente de presiones y provoca que el viento sople en dirección contraria. La fuerte interacción océano continente hace que los climas chilenos sean, de Concepción al norte, algunos grados más frescos que lo correspondiente a su latitud.

En los sectores cordilleros por sobre los 3000 m de altitud la temperatura máxima de enero no supera los 23°C y las precipitaciones caen en forma sólida.

El territorio es frecuentemente cruzado por frentes o masas de aire que se originan en el frente polar y se desplazan desde el suroeste, ingresando al continente a la altura de Aysén. A su ingreso al continente estos frentes deben atravesar el cordón costero, con elevaciones de 500 a 1000 m.s.n.m. En sectores donde la costa es más alta, se produce a sotavento una "sombra de lluvia", es decir, los frentes en su remontada por la vertiente occidental (barlovento) tienden a depositar más agua, luego de lo cual deben descender por las laderas orientales de la costa, lo que los seca y calienta, provocando una marcada disminución de las lluvias detrás del cordón costero (efecto Foehn). Durante el invierno el territorio es cruzado por uno o dos frentes semanales. La mayor parte de los frentes se disipan en la Zona Central, mientras que los de mayor energía logran provocar precipitaciones de origen frontal hasta Copiapó por el norte. Estos frentes logran franquear el bloqueo anticiclónico entre mayo y septiembre, lo que le da un fuerte carácter invernal al régimen de precipitaciones (clima mediterráneo de la zona central).

El Clima de la Zona Semiárida de Chile

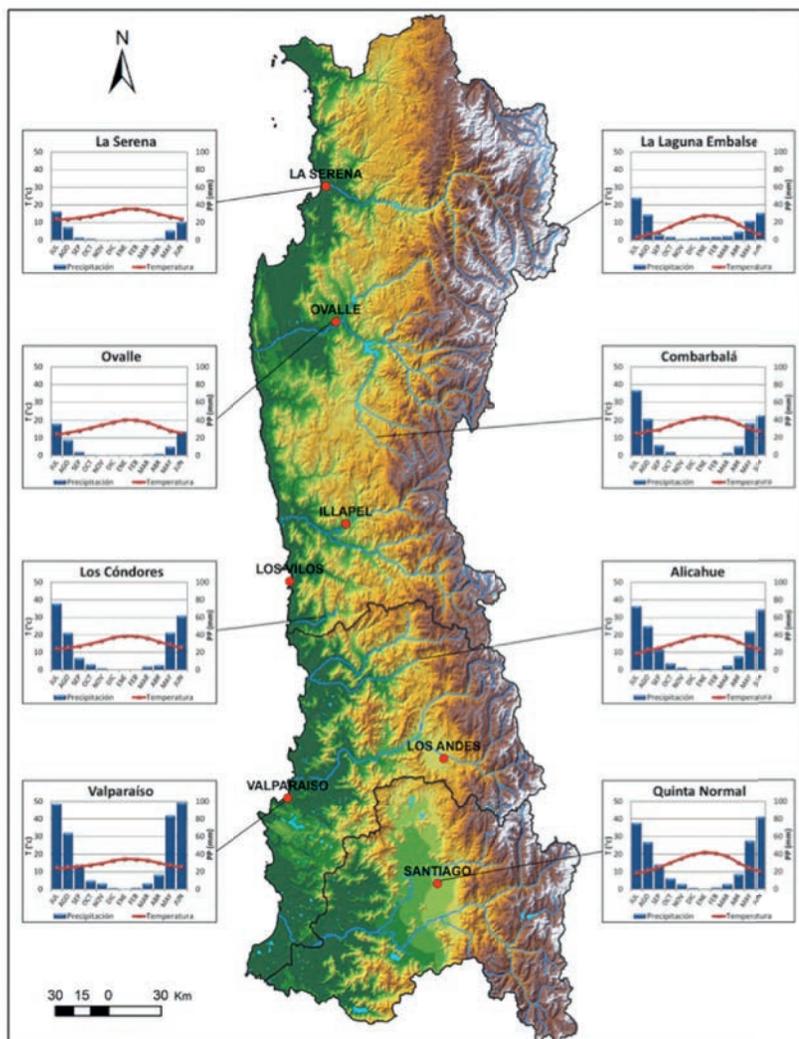


Figura 1.1. Diagramas ombrotérmicos de distintas estaciones de la zona de régimen semiárido de Chile.

A medida que se avanza hacia el sur la precipitación va aumentando, desde unos 80 mm en la Serena hasta unos 450 mm en la latitud de Valparaíso. Por el contrario, las temperaturas son más elevadas en la zona norte y van disminuyendo a medida que aumenta la latitud.



➔ Regímenes Térmicos

Las temperaturas a lo largo del país van disminuyendo gradualmente de norte a sur, lo mismo ocurre en la zona de régimen semiárido. A su vez, la marcada influencia marina se manifiesta con temperaturas más suaves en el litoral que en el interior. Es así como, de norte a sur, las temperaturas medias anuales en la costa van variando desde 14,5°C en La Serena, 14°C en Valparaíso a 13,9°C en San Antonio, mientras que por el interior aumentan significativamente, encontrándose temperaturas medias anuales de 15,8°C en Vicuña, 16°C en Ovalle, 16,2°C en Combarbalá, 15,9°C en Illapel, 15,9°C en Petorca, 15,7°C en San Felipe, 15,6°C en Colina, 15,5°C en Santiago (Quinta Normal) y 14,9°C en Melipilla.

En las figuras 1.2 y 1.3 se presentan perfiles longitudinales de relieve de los valles del Elqui, Choapa y Maipo, que muestran la variación de la temperatura máxima del mes más cálido y de la temperatura mínima del mes más frío, respectivamente. En los tres perfiles se puede apreciar cómo aumentan las temperaturas máximas en los sectores interiores, prolongándose hacia el interior de los valles precordilleranos. Efectivamente las máximas pueden llegar a sobrepasar con regularidad los 28°C, alcanzando extremos superiores a 32°C en los núcleos más cálidos que se forman en sectores bajos, detrás de la cordillera de la costa y en los fondos de valle, hacia la precordillera. Las temperaturas máximas en Vicuña alcanzan los 31°C, en Salamanca los 29°C y en Santiago los 30°C. Las zonas costeras presentan temperaturas máximas bastante más suavizadas, bordeando los 24°C en La Serena y Coquimbo, 20°C a la altura de Los Vilos, y unos 19°C en San Antonio.

Las temperaturas mínimas en tanto, se alcanzan por sobre los 6°C en el

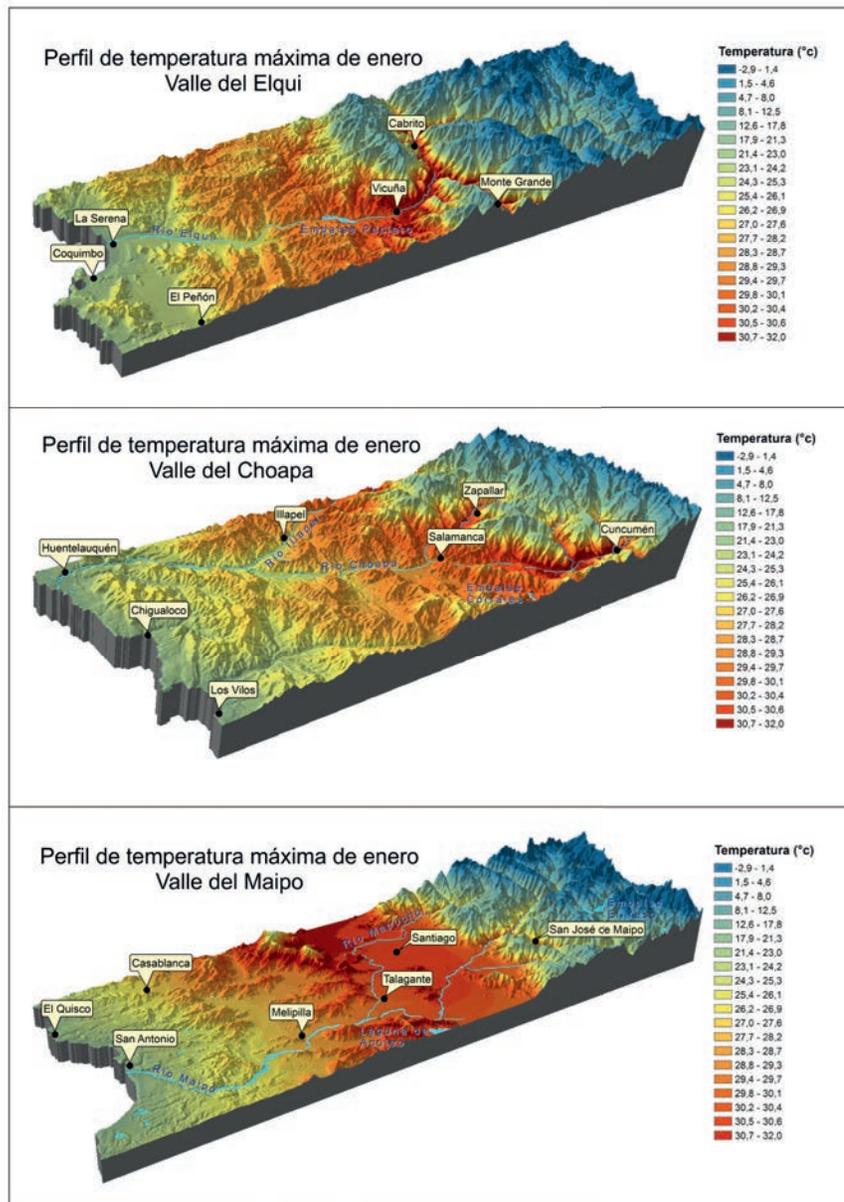


Figura 1.2. Perfiles de relieve con temperatura máxima de enero de los valles de los ríos Elqui, Choapa y Maipo.

litoral de la zona semiárida, disminuyendo progresivamente hacia el interior y los sectores cordilleranos, como puede apreciarse en el perfil de la figura 1.3. En la costa las temperaturas mínimas varían entre unos 7°C en La Serena hasta unos 6°C a la altura de San Antonio, mientras que hacia el interior pueden alcanzarse temperaturas bajo cero de manera muy frecuente. Como consecuencia de esto, la amplitud térmica diaria, a 100 km del litoral, puede superar en 10°C a la observada en la Costa a la misma latitud.

La calidez global del clima, medida a través de los días-grado, muestra similar tendencia, aunque en este caso el enfriamiento litoral es más notable. Por el litoral, la acumulación de temperatura supera los 1200 días-grado por año, llegando a 2000 días-grado en la región de Coquimbo. Hacia el interior, se registran aumentos de entre 300 y 500 días-grado respecto de la Costa. Al interior de la Región Metropolitana por ejemplo, la disponibilidad global de días grado varía frecuentemente entre 1500 y 2000 días-grado, aumentando gradualmente hacia el norte con valores cercanos a los 2100 días-grado al interior de la comuna de Petorca y sobre 2200 días-grados en los valles interiores desde Combarbalá hacia el norte. Frecuentemente las cuencas cerradas, más ventiladas y situadas detrás de cordones costeros altos, se transforman en núcleos particularmente cálidos, donde las temperaturas máximas promedio superan los 30°C en verano y los días-grado anuales bordean los 2000, como es el caso del sector de Polpaico/TilTil.

En la costa de la zona de régimen semiárido no existe un período frío o de receso vegetativo invernal bien definido (temperatura media inferior a 10°C), mientras que por el interior, a iguales latitudes, tiende a haber 1 a 3 meses de reposo vegetativo más que en la Costa.

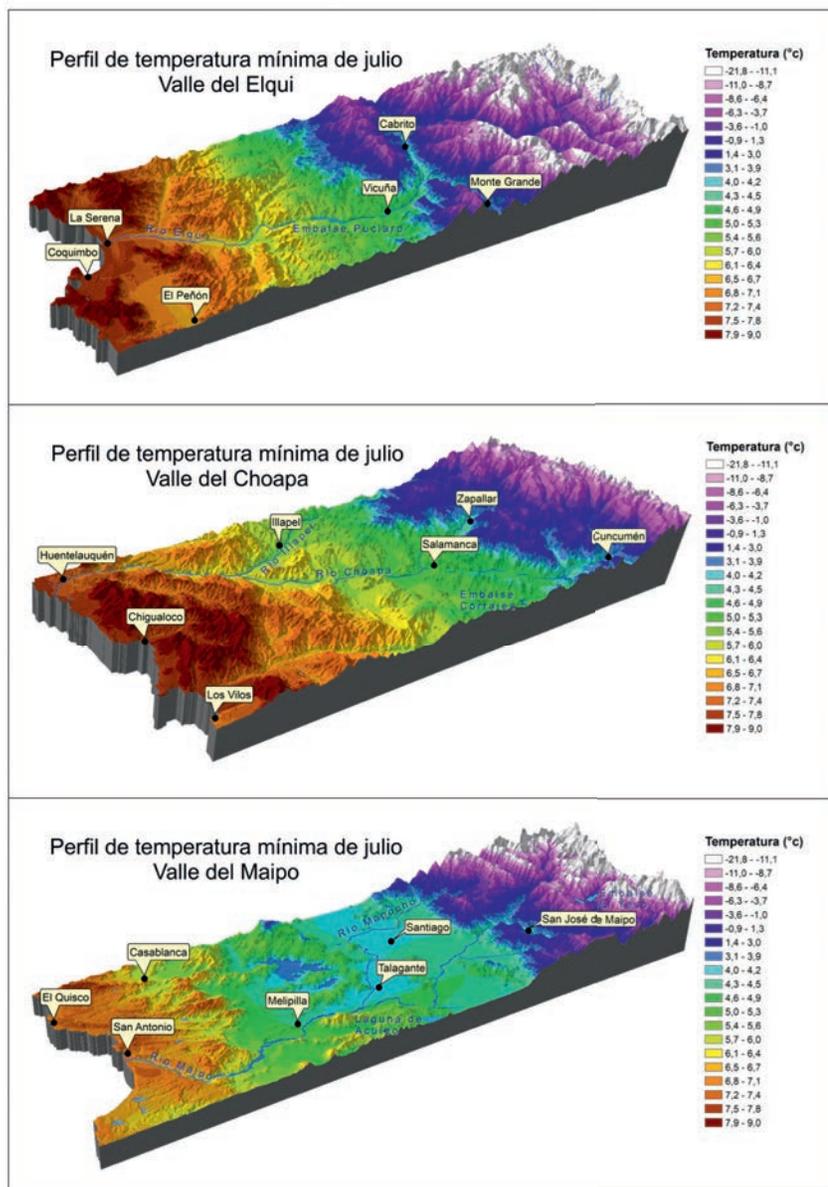


Figura 1.3. Perfiles de relieve con temperatura mínima de julio de los valles de los ríos Elqui, Choapa y Maipo.



→ Regímenes Hídricos

Un indicador muy usado para determinar el grado de aridez del clima, es el criterio adoptado por las Naciones Unidas (1997), que permite tipificar regímenes de humedad considerando el cociente anual de precipitación (PP) y evapotranspiración potencial (ETP), según la escala siguiente:

Tabla 1.1. Criterio de Naciones Unidas para la tipificación de regímenes de humedad.

PP/ETP	Régimen
< 0,05	Híper-árido
0,05 - 0,20	Árido
0,20 - 0,50	Semi-árido
0,50 - 0,65	Sub - húmedo seco
0,65 - 1	Sub - húmedo húmedo
> 1	Húmedo

La aplicación de este criterio define las siguientes zonas en Chile:

Tabla 1.2. Zonas de Chile de acuerdo a regímenes de humedad.

Zona	Extensión geográfica
Híper - árida	Coquimbo al norte
Árida	Coquimbo a Aconcagua y zona altiplánica
Semi - árida	Aconcagua al Maule y sector de pampas australes en zonas orientales de Aysén y Magallanes
Sub - húmeda	Maule a Biobío
Húmeda	Del Biobío al Toltén
Híper - húmeda	Del Toltén al sur

La zona de régimen árido y semiárido tratada en este atlas comprende las regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana, por lo que en estricto rigor forman parte de ella las zonas hiper-árida, árida y semi-árida definidas por el criterio de las Naciones Unidas. A continuación una breve descripción de cada una de ellas.

→ Zona Híper - Árida (Arica a Coquimbo)

La precipitación anual de la zona hiper-árida es de entre 30 y 100 mm, con un período seco que se extiende por 11 o 12 meses. Las demandas atmosféricas elevadas de agua, asociadas a una mínima cantidad de precipitaciones y a una intensa ra-

diación solar, generan niveles elevados de déficit hídrico especialmente durante el período primaveral y estival, superando los 1200 mm al año. El índice de humedad invernal se mantiene por debajo de 0,2, es decir, la precipitación durante la estación



húmeda no alcanza a cubrir el 20% de las demandas creadas por la evapotranspiración potencial. No existe excedente invernal de precipitación, por lo que el escurrimiento superficial es extremadamente escaso y errático.

→ Zona Árida (Coquimbo a Aconcagua)

La precipitación anual varía desde 100 mm en Coquimbo a 300 mm en Aconcagua. El período seco se extiende por 8 a 11 meses y el déficit

hídrico anual se mantiene entre 1000 y 1200 mm. El índice de humedad invernal pasa de valores algo inferiores a 0,5 a algo superiores a 1, lo que

evidencia la existencia de una corta estación húmeda de 1 o 2 meses. El régimen térmico acumula anualmente de 1600 a 1700 días grado.

→ Zona Semiárida (Aconcagua a Región del Maule)

Se extiende entre el río Aconcagua y la Región del Maule, excluyendo la cordillera de Los Andes en esta última región. Incluye además una importante superficie pampeana en Magallanes y algunos sectores transandinos de Aysén. El período seco se reduce a 7 u 8 meses y el déficit hídrico anual se mantiene entre 800 y 1000 mm. El período húmedo varía entre 2 y 4 meses. El índice de humedad invernal se mantiene entre 1 y 3, lo que revela la existencia de un invierno breve pero con humedad suficiente. El excedente invernal de precipitaciones varía entre algunas decenas de milímetros y sobre los 300 mm anuales. El régimen térmico acumula anualmente 1200 a 1600 días-grado.

la importante disminución de precipitaciones al norte de la ciudad de Santiago, más específicamente en el sector de Tiltil y Polpaico, generado por el efecto de sombra de lluvia

o efecto Foehn, que se produce por el bloqueo de los frentes por parte de la cordillera de las costa, que alcanza altitudes importantes en esa latitud (Cerro El Roble).

En la figura 1.4 se presenta un perfil longitudinal en relieve con la precipitación de los valles del Elqui, Choapa y Maipo. En general las precipitaciones van aumentando hacia el sur, con un régimen más lluvioso en las zonas costeras que en el interior, con la excepción de la región de Coquimbo, donde en la costa tiende a llover menos que en el interior. La precipitación costera varía desde unos 80 mm en La Serena, 230 mm en Los Vilos y alrededor de 490 mm en San Antonio. Por el interior, el régimen de precipitaciones en tanto sólo presenta registros de unos 102 mm al interior del valle del Elqui (Vicuña), 200 mm en el sector de Illapel hasta cerca de 350 mm en la capital metropolitana. En el perfil del valle del Maipo se puede apreciar

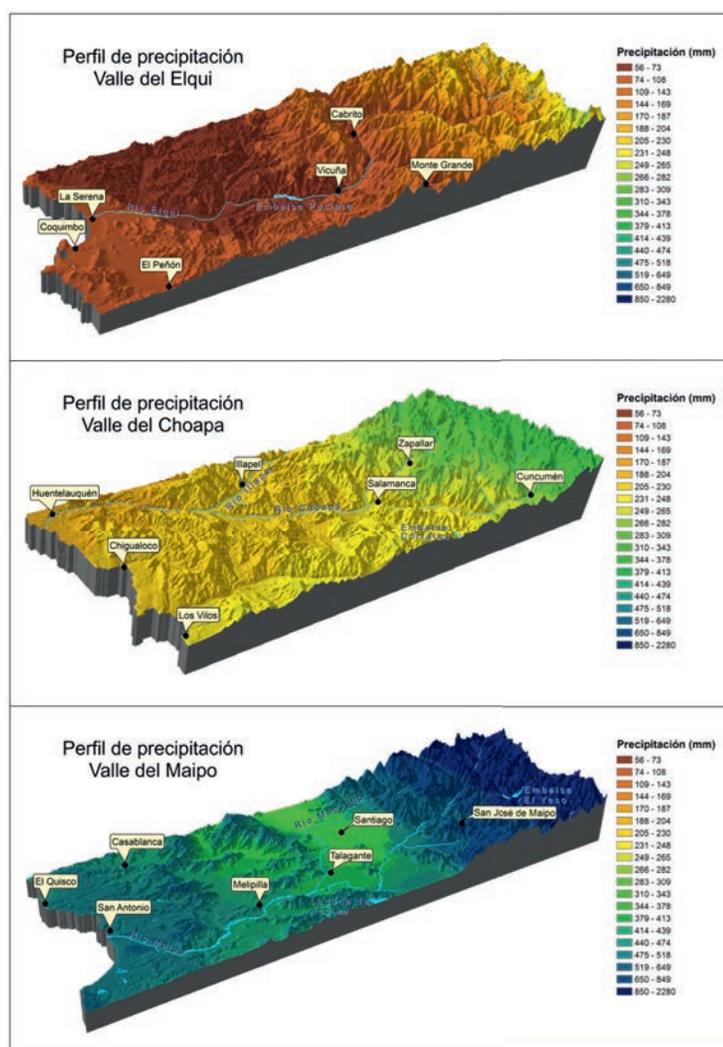


Figura 1.4. Perfiles de relieve con la precipitación de los valles de los ríos Elqui, Choapa y Maipo.

→ Comentario Final

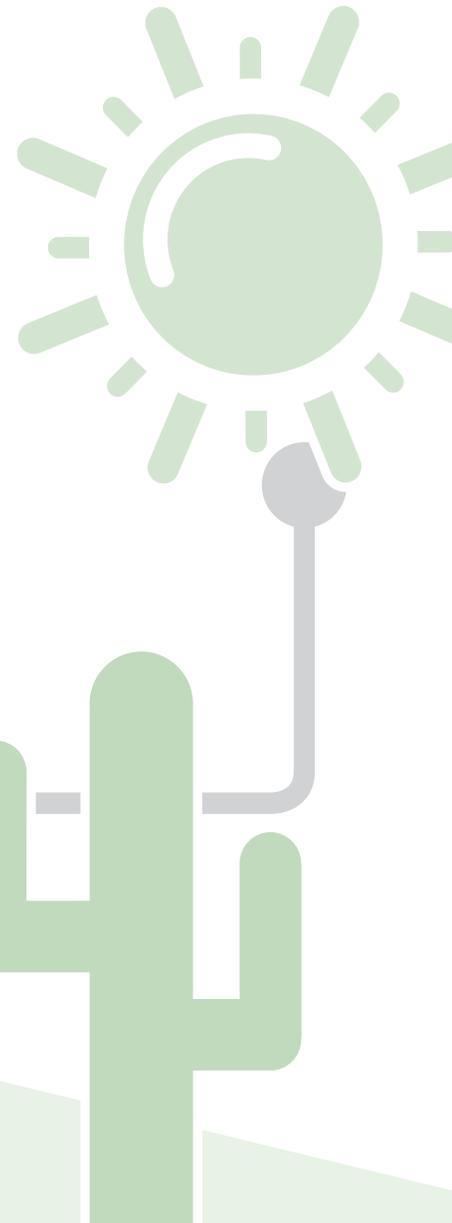
El clima de la zona árida y semiárida de Chile presenta fuertes gradientes de aridez y de temperatura, en función de las combinaciones de latitud, altitud y distancia al borde marino. La aridez de esta zona se caracteriza por una prolongada estación estival seca, por una fuerte concentración invernal de las lluvias y por una extrema variabilidad interanual de las precipitaciones. Los regímenes térmicos presentan una marcada influencia marina en la costa, con veranos frescos e inviernos templados. Esta condición va adquiriendo gradualmente rasgos de continentalidad hacia el interior,

donde los veranos se van haciendo cálidos y los inviernos más fríos. La influencia marina se hace sentir en la costa igualmente por los nublados frecuentes y la elevada humedad del aire, lo que reduce fuertemente las demandas evaporativas. Por lo anterior, la vegetación costera tiene rasgos menos xerofíticos que las comunidades vegetales interiores.

Siendo la zona un borde de desierto, su clima está sujeto a una transición gradual hacia el desierto absoluto, cuyo límite se sitúa al norte de la región.

→ Referencias Bibliográficas

- ♦ INDAP – PRODECOP, AGRIMED Universidad de Chile, 2001. Compendio de información ambiental, socioeconómica y silvoagropecuaria de la IV Región de Coquimbo. La Serena, Chile.
- ♦ Santibáñez, F. y J. Uribe. 1990. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. 66 p.
- ♦ Santibáñez, F., P. Roa y P. Santibáñez. 2008. El medio físico. EN: Biodiversidad en Chile. J. Rovira, J. Ugalde y M. Stutzin (Eds). CONAMA, Santiago de Chile.
- ♦ United Nations Environment Programme. 1997. World Atlas of Desertification. Second Edition. Middleton N. and Thomas D. (Eds). 182p.



Puente Tilama en el valle del Quilimarí. Región de Coquimbo.

Capítulo 2



Variabilidad y Tendencias Climáticas

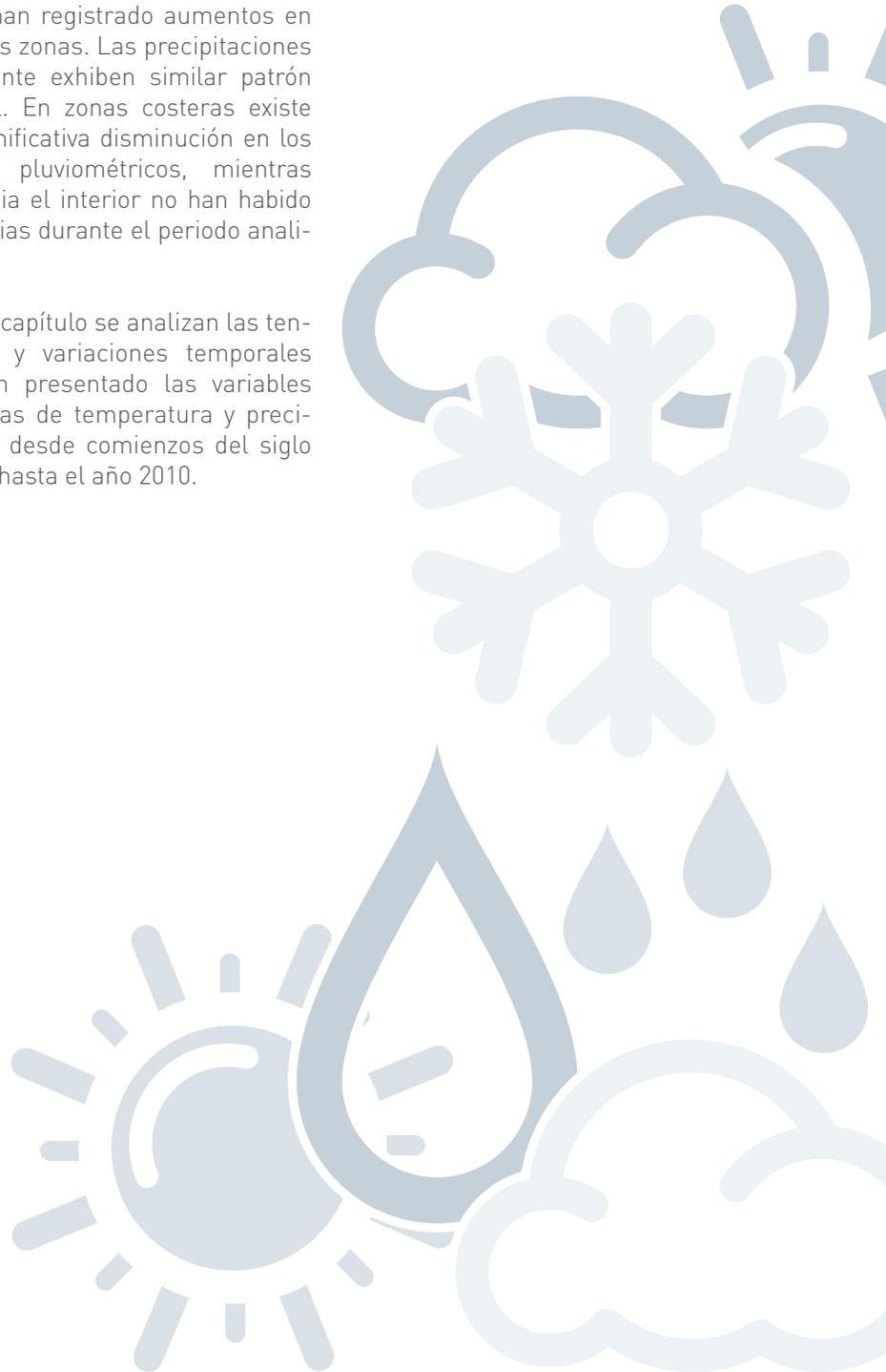
Introducción

→ La variabilidad climática parece estar aumentando en todo el país, haciéndose más frecuentes los eventos climáticos extremos de sequía, olas de calor y frío, y eventos de heladas. En el siglo XX, la temperatura cambió más rápido que en los siglos precedentes, tendencia que ha mostrado una aceleración en décadas recientes. Si bien existen ciertos fenómenos climáticos naturales que inducen variabilidad temporal, éstos no imponen tendencias en el largo plazo. Fenómenos tales como Oscilación decadal del Pacífico (PDO) y el ciclo de El Niño y La Niña, ejercen fuertes efectos en el régimen de precipitaciones y en el balance de masa de los glaciares, pero estos fenómenos naturales tienen cierta periodicidad que no ha presentado tendencia marcada en los últimos 100 años. Sin embargo, se han registrado importantes cambios en las precipitaciones y en el espesor de los glaciares desde comienzos del siglo pasado. A lo largo de toda la cordillera de Los Andes se ha observado una regresión de los glaciares, los que han retrocedido en hasta 300 metros en el último siglo (Rivera et al., 2000).

En la zona semiárida de Chile existen patrones espaciales definidos con respecto a los cambios en las variables climáticas. Los datos históricos indican que las temperaturas máximas están aumentando en valles interiores y zonas precordilleranas, mientras que en la costa ha habido una disminución de éstas. Sin embargo las temperaturas mí-

nimas han registrado aumentos en todas las zonas. Las precipitaciones igualmente exhiben similar patrón espacial. En zonas costeras existe una significativa disminución en los montos pluviométricos, mientras que hacia el interior no han habido tendencias durante el periodo analizado.

En este capítulo se analizan las tendencias y variaciones temporales que han presentado las variables climáticas de temperatura y precipitación desde comienzos del siglo pasado hasta el año 2010.



→ Información Histórica para determinar Tendencias Climáticas

El análisis de la variabilidad de las precipitaciones se efectuó para cinco estaciones representativas de la zona semiárida de Chile: dos estaciones con influencia marina, correspondientes a La Serena y Valparaíso y tres estaciones en valles interiores, correspondientes a

Ovalle, San Felipe y Quinta Normal. Estas estaciones cuentan con datos climáticos desde comienzos del siglo XX, lo que permite analizar las posibles tendencias climáticas que han habido en el tiempo. Para analizar la variabilidad que han registrado las temperaturas se analizaron

las variables de temperaturas máximas y mínimas diarias, mediante el cálculo de días cálidos (Temperaturas > 25°C), número de días con estrés térmico (Temperaturas > 29°C), número de días con heladas anuales (Temperaturas mínimas bajo 0°C) e índice de aridez.

→ 1. Tendencias en el Régimen de Precipitaciones.

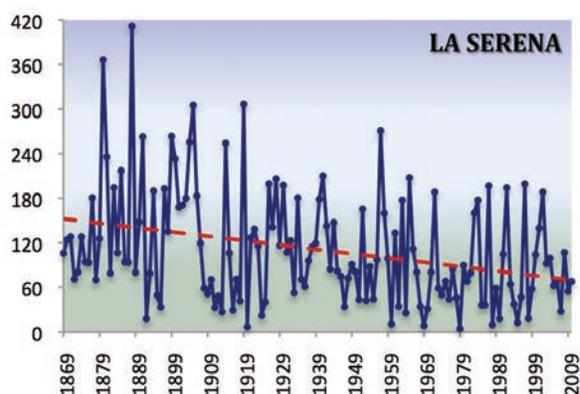


Figura 2.1. Serie histórica de precipitación anual de La Serena. Período 1869 – 2010.

Fuente: DMC.

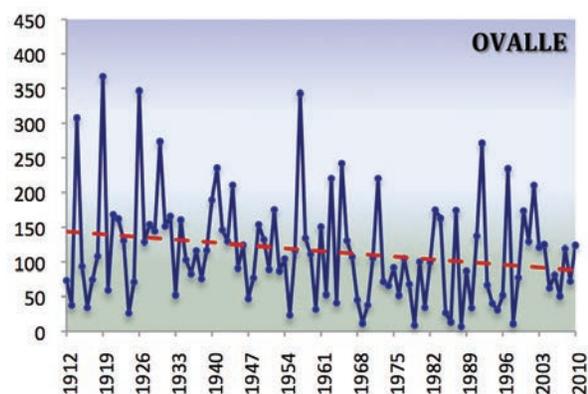


Figura 2.2. Serie histórica de precipitación anual de Ovalle. Período 1912 – 2010.

Fuente: DMC.

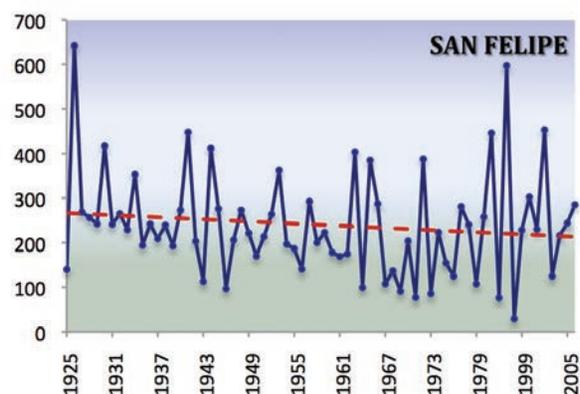


Figura 2.3. Serie histórica de precipitación anual de San Felipe. Período 1925 – 2006.

Fuente: DMC.

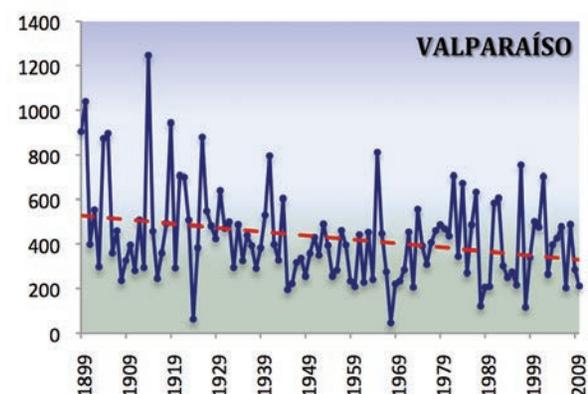


Figura 2.4. Serie histórica de precipitación anual de Valparaíso. Período 1899 – 2010.

Fuente: DMC.

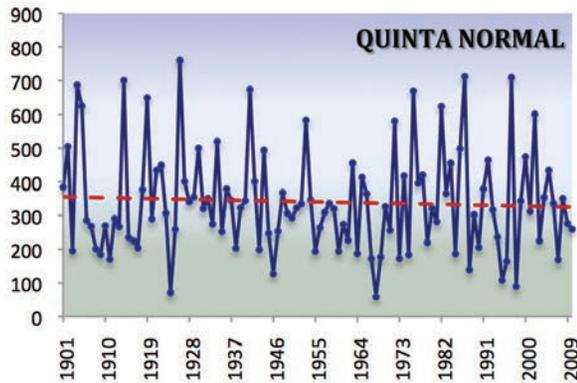


Figura 2.5. Serie histórica de precipitación anual de Quinta Normal. Período 1901 - 2010. Fuente: DMC.



La Serena y Valparaíso, ambas localidades costeras, muestran tendencias hacia la disminución de las precipitaciones anuales. Similar tendencia se aprecia en valles con influencia marina, como es el caso de Ovalle, mientras que en las estaciones interiores de San Felipe y Quinta Normal no se aprecia una tendencia clara. (p valor > 0,05; tabla 2.1).

Tabla 2.1. Parámetros estadísticos de la precipitación por período.

Precipitaciones				
Estación	Período	Media	Desviación típica	P valor*
La Serena	1912 - 1960	109,3	68,5	0,015
	1961 - 2010	81,4	59	
Ovalle	1912 - 1960	133,3	82,2	0,022
	1961 - 2010	98,5	68	
Valparaíso	1912 - 1960	477,7	232,9	0,017
	1961 - 2010	378,5	171,1	
Quinta Normal	1912 - 1960	351,7	154,3	0,43
	1961 - 2010	328,8	153,8	
San Felipe	1912 - 1960	242,8	83,6	0,35
	1961 - 2010	225,8	132,5	

*Test U de Mann-Whitney para datos de precipitación.

La mayor variación en las precipitaciones se presenta en la localidad de Ovalle, con una disminución de un 26,1% entre el período 1960-2010 con respecto al periodo 1900-1960. En el caso de La Serena, el régimen pluviométrico registra una disminución de un 25,5%, mientras que en Valparaíso la disminución es de 20,8% para iguales períodos (Tabla 2.1).



→ 2. Tendencias en el Régimen de Concentración de las Precipitaciones

Uno de los cambios que puede sufrir el régimen de precipitaciones es la disminución del número de lluvias, paralelamente con un aumento en la intensidad de las lluvias. Al ocurrir esto, la cantidad anual de lluvia se concentra en menos eventos y en determinados meses. Para evaluar la tendencia en la concentración de las precipitaciones se usó el Índice de Concentración de Precipitaciones (ICP) (Lobo et al, 2005; Pizarro et al, 2006), calculado mediante la siguiente ecuación:

$$ICP = 100 \cdot \frac{\sum (pp_{\text{mensual}})^2}{PP^2}$$

Donde pp corresponde a la precipitación mensual (mm) y PP precipitación anual (mm)

Las estaciones localizadas en zonas costeras (La Serena y Valparaíso) muestran una tendencia histórica hacia el aumento en la concentración de las precipitaciones (p valor $\leq 0,05$), es decir llueve de manera menos homogénea durante el año, concentrándose la precipitación en un periodo más corto del año en relación a comienzos de siglo.

Irregular Altamente estacional Estacional Moderadamente estacional Uniforme

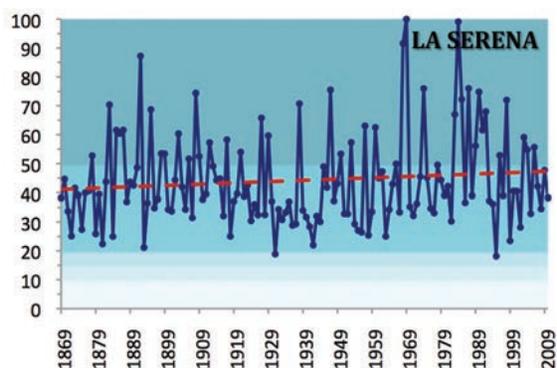


Figura 2.6. Serie histórica del índice de concentración de precipitaciones de La Serena. Período 1869 – 2010.

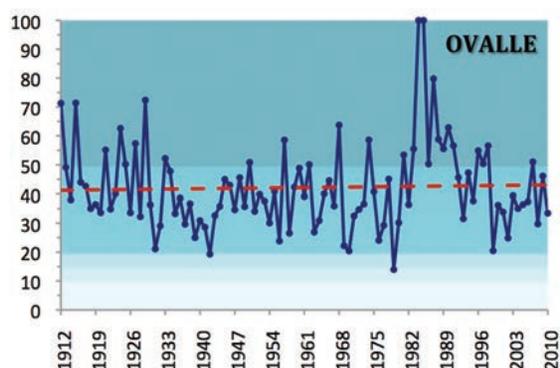


Figura 2.7. Serie histórica del índice de concentración de precipitaciones de Ovalle. Período 1912 – 2010.

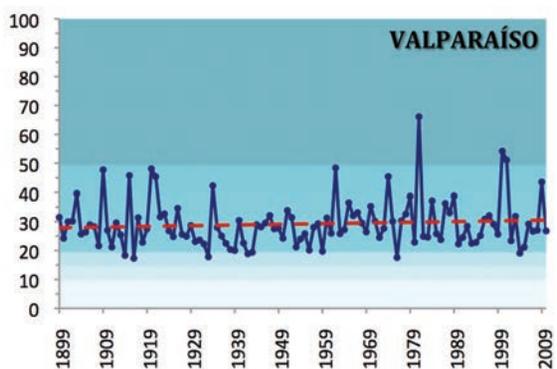


Figura 2.8. Serie histórica del índice de concentración de precipitaciones de Valparaíso. Período 1899 – 2010.

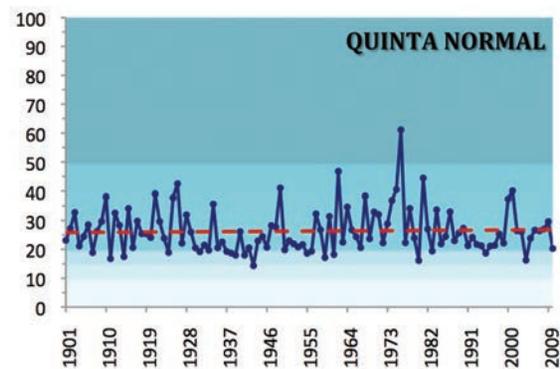


Figura 2.9. Serie histórica del índice de concentración de precipitaciones de Quinta Normal. Período 1901 – 2010.

Tabla 2.2. Parámetros estadísticos del Índice de Concentración de Precipitaciones por período.

Índice de Concentración de Precipitaciones				
	Período	Media	Desviación típica	P valor*
La Serena	1912 - 1960	40,1	13,5	0,01
	1961 - 2010	48,3	18,8	
Ovalle	1912 - 1960	40,7	12,4	0,484
	1961 - 2010	43,5	17,5	
Valparaíso	1912 - 1960	27,3	7,1	0,05
	1961 - 2010	31,1	9,5	
Quinta Normal	1912 - 1960	24,9	6,7	0,066
	1961 - 2010	27,6	8,6	

La tendencia hacia la disminución de las precipitaciones, es acompañada por la tendencia a la disminución del número anual de días de lluvia ($P_p > 0,1$ mm). A pesar de la tendencia observada en los gráficos, ésta sólo es significativa en la localidad de Valparaíso, según la prueba estadística de dispersión de datos realizada mediante el Test no paramétrico U de Mann-Whitney (p valor $< 0,05$).

*Test U de Mann-Whitney para el Índice de Concentración de Precipitaciones

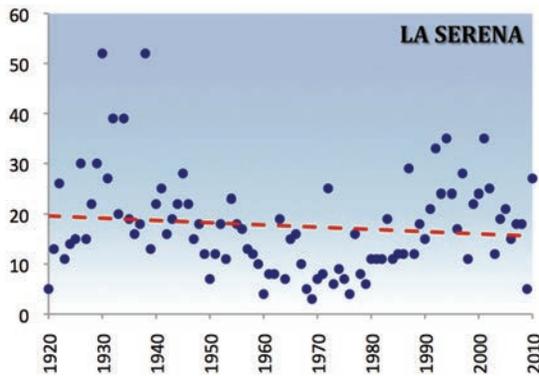


Figura 2.10. Serie histórica del número de días de lluvia de La Serena. Período 1920 - 2010.

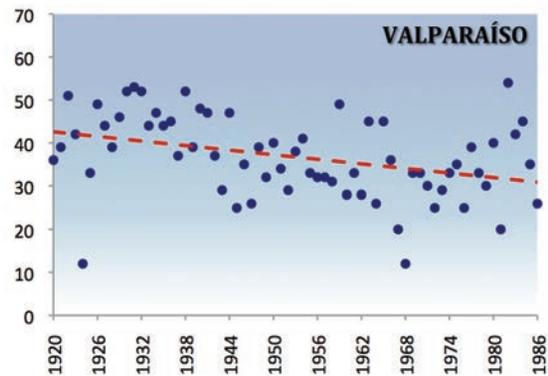


Figura 2.11. Serie histórica del número de días de lluvia de Valparaíso. Período 1920 - 1986.

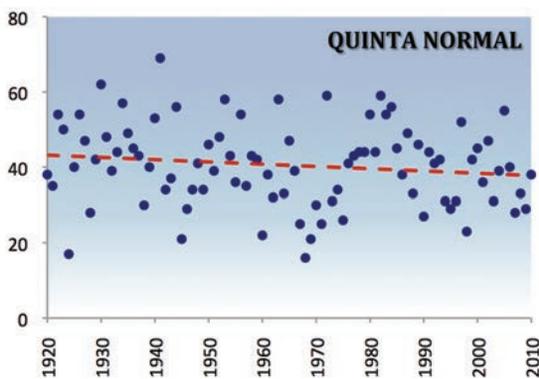


Figura 2.12. Serie histórica del número de días de lluvia de Quinta Normal. Período 1920 - 2010.



Tabla 2.3. Parámetros estadísticos del N° de días de lluvia por período.

N° de Días de Lluvia				
	Período	Media	Desviación típica	P valor*
La Serena	1912 - 1960	19,2	10,6	0,177
	1961 - 2010	16,1	8,5	
Valparaíso	1912 - 1960	40,2	9,3	0,002
	1961 - 2010	33,4	8,7	
Quinta Normal	1912 - 1960	42,2	11,1	0,176
	1961 - 2010	38,8	10,6	

*Resultados Test U de Mann-Whitney para el N° de días de lluvia.

La disminución de las precipitaciones, podría estar asociada al mayor bloqueo que el anticiclón del Pacífico estaría ejerciendo sobre los frentes que traen precipitaciones desde el sur. Es muy probable que los frentes con menos energía no estén logrando flanquear la resistencia que les impone el anticiclón, lo que hace caer el número de frentes que llegan a la zona central con capacidad de generar lluvias.

→ 3. Tendencias en el Régimen de Temperaturas.

Las temperaturas máximas del mes más cálido presentan una disminución significativa en las estaciones costeras (La Serena y Valparaíso) y un aumento en zonas interiores (Quinta Normal y Cerrillos), mientras que en zonas intermedias, y en valles interiores con influencia marina (Ovalle) no existe tendencia estadísticamente significativa. Situación similar se observa en el número de días cálidos (T máxima superior a 25°C). El número de días cálidos se ha desplomado casi a cero en las localidades costeras en los últimos 30 años, particularmente en la costa de Valparaíso. Por el contrario, las temperaturas mínimas no muestran una tendencia tan clara como las máximas, siendo la estación de Valparaíso la única que exhibe una clara alza en ellas.

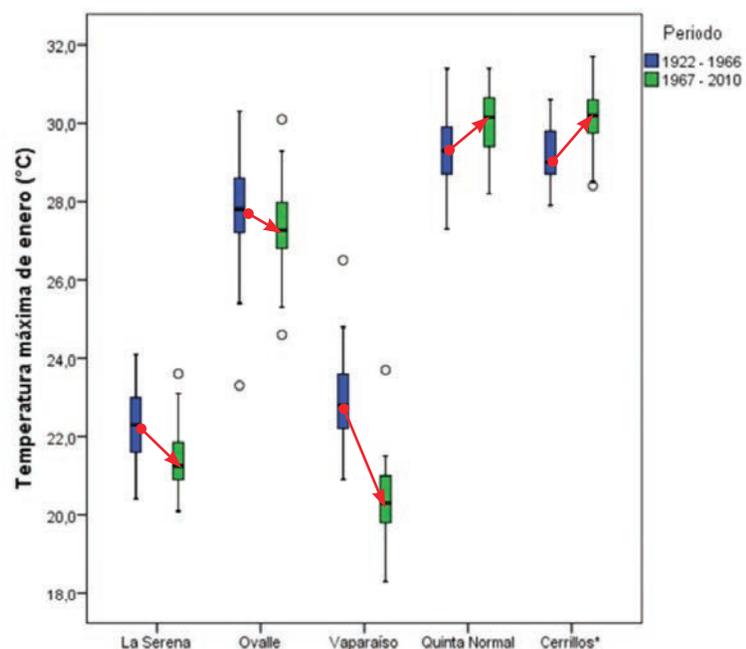


Figura 2.13. Temperaturas máximas del mes más cálido (Enero). Período 1922 - 2010. (P valor < 0,05 para las localidades de: La Serena, Valparaíso, Quinta Normal y Cerrillos. P valor > 0,05 en Ovalle. Test de U de Mann-Whitney).

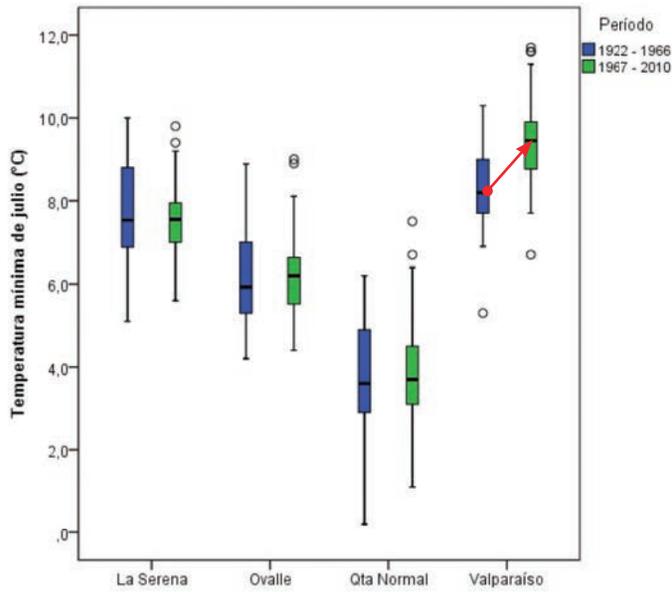


Figura 2.14. Temperaturas mínimas del mes más frío (Julio). Período 1922 – 2010. [P valor < 0,05 Valparaíso, La Serena, Ovalle, Quinta Normal y Cerrillos. P valor > 0,05 en Ovalle. Test de U de Mann-Whitney].

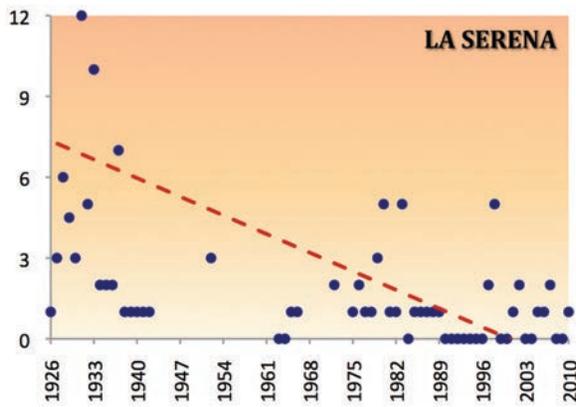
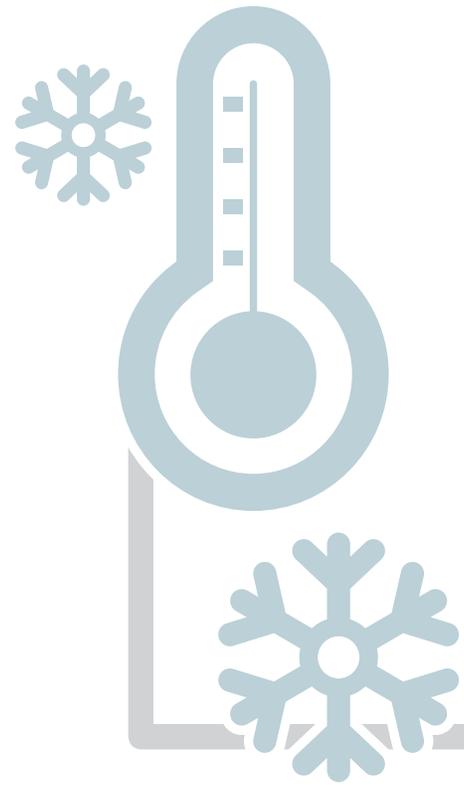


Figura 2.15. Serie histórica del número de días cálidos ($T > 25^{\circ}\text{C}$) de La Serena. Período 1926 – 2010. [P valor < 0,05].

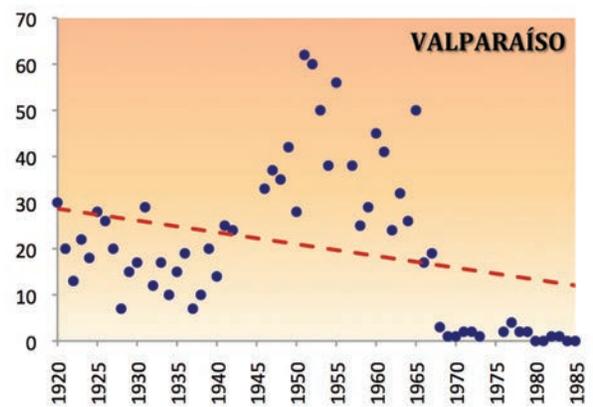


Figura 2.16. Serie histórica del número de días cálidos ($T > 25^{\circ}\text{C}$) de Valparaíso. Período 1920 – 1985. [P valor < 0,05].

➔ Número de Días con Estrés Térmico

Se entiende por estrés térmico a las condiciones adversas que las elevadas temperaturas crean para el crecimiento y reproducción de plantas y animales. Las plantas tienen un umbral superior de tolerancia a las altas temperaturas, a partir del cual su crecimiento y producción se ven

fuertemente reducidos por exceso de calor. Las especies tienen diferentes umbrales de estrés, pero en general se puede citar a la temperatura de 29°C como un valor común, sobre el cual la generalidad de las plantas cultivadas, comienzan a sufrir de estrés térmico.

En general, se observa un aumento en el número de días con temperaturas estresantes ($T > 29^{\circ}\text{C}$) en las localidades interiores y precordillera, no así en las localidades con mayor influencia marina.

En zonas costeras los veranos muestran temperaturas máximas cada vez más frescas, sin embargo las temperaturas mínimas han experimentado aumentos, existiendo inviernos cada vez más cálidos. Globalmente esto puede ser favorable para la agricultura, que puede encontrar una zona de refugio frente a las altas temperaturas que podría traer el cambio climático en las regiones más interiores de los valles.

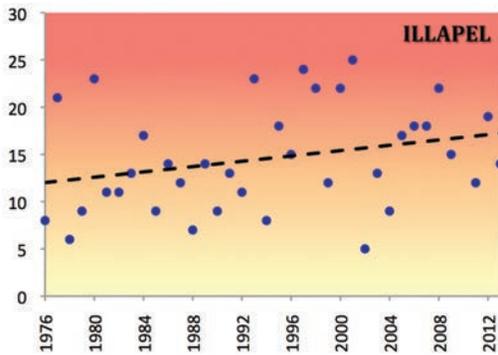


Figura 2.17. Serie histórica del número de días de estrés térmico por año ($T > 29^{\circ}\text{C}$) de Illapel, Región de Coquimbo. Período 1976 - 2013.

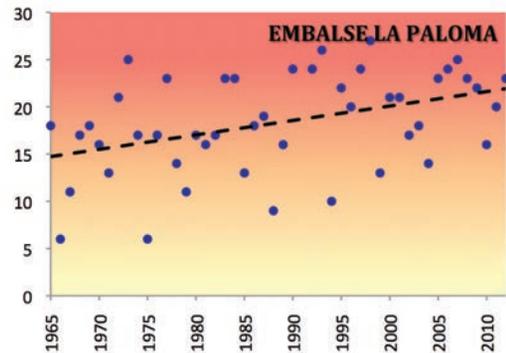


Figura 2.18. Serie histórica del número de días de estrés térmico por año ($T > 29^{\circ}\text{C}$) del embalse La Paloma, Región de Coquimbo. Período 1965 - 2012.

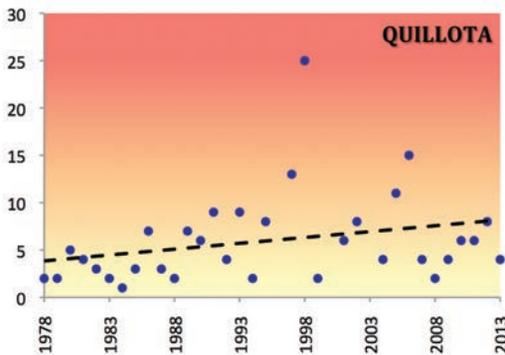


Figura 2.19. Serie histórica del número de días de estrés térmico por año ($T > 29^{\circ}\text{C}$) de Quillota, Región de Valparaíso. Período 1978 - 2013.

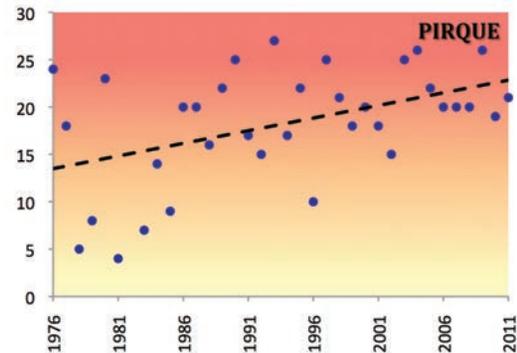


Figura 2.20. Serie histórica del número de días de estrés térmico por año ($T > 29^{\circ}\text{C}$) de Pirque, Región Metropolitana. Período 1976 - 2011.

➔ Régimen de Heladas

Importantes cambios parecen estar registrándose en el régimen de heladas. Mientras el número de heladas anuales va disminuyendo en zonas interiores y precordillera, en zonas con influencia marina, parece estar aumentando. Esto podría estar asociado a la dinámica del

anticiclón, el cual frecuentemente está incursionando hacia al sur, a la vez que acercándose a la costa, trayendo aire frío, de origen polar. Esta sería la causa del aumento en la frecuencia de heladas de origen polar que se ha apreciado en los últimos años.



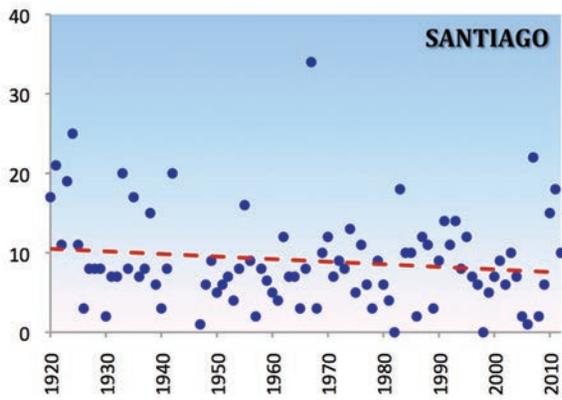


Figura 2.21. Serie histórica del número de días con heladas por año de Santiago, Región Metropolitana. Período 1920 – 2012. (P valor > 0,05, test U de Mann-Whitney, no hay significancia estadística).

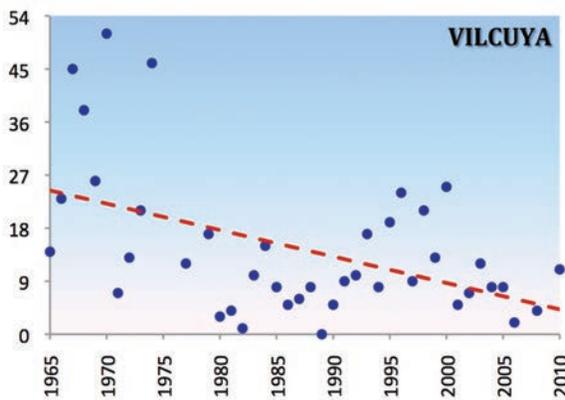


Figura 2.22. Serie histórica del número de días con heladas por año de la estación Vilcuya (sector interior de precordillera), Región de Valparaíso. Período 1965 – 2010. (P valor < 0,05, test Mann Kendall).

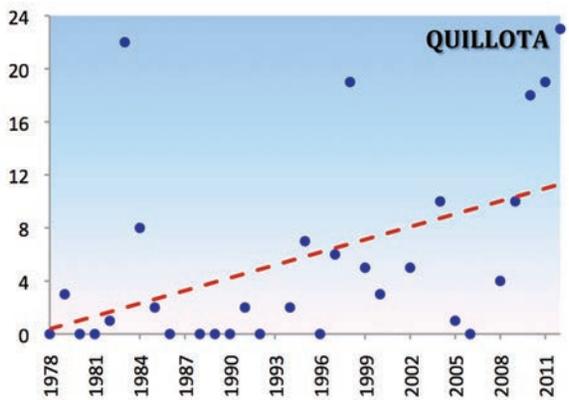
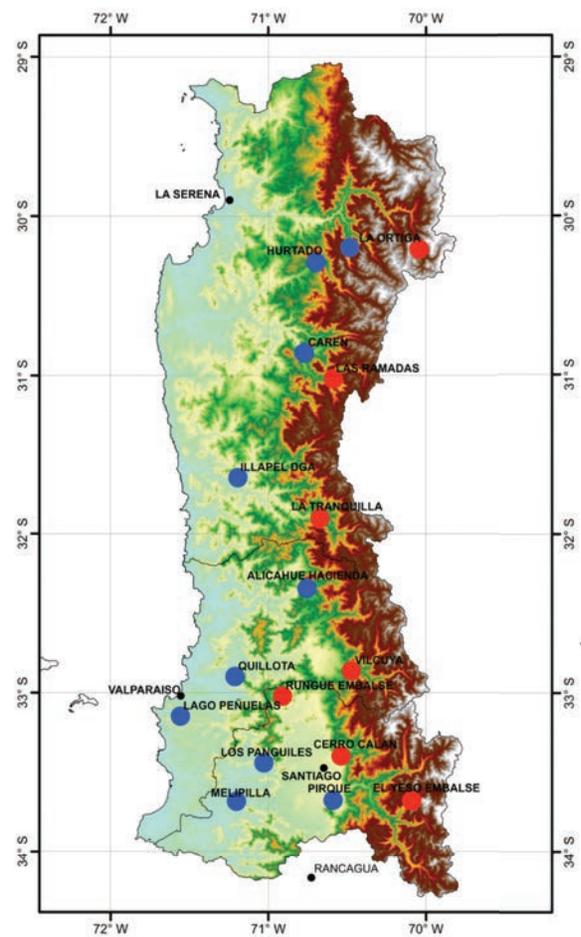


Figura 2.23. Serie histórica del número de días con heladas por año de la estación Quillota (Sector con influencia costera), Región de Valparaíso. Período 1978 – 2012. (P valor < 0,05, test Mann Kendall).

El aumento en la frecuencia, intensidad y tipo de heladas en las zonas interiores puede tener grandes consecuencias económicas en la agricultura regional, tal como se ha venido observando en los últimos años. Por el contrario, en precordillera y cordillera el número de heladas va en disminución, lo cual puede ser un indicador del calentamiento que se espera para las zonas de altura, y que afectaría a las reservas de nieve.



Tendencia Heladas
 ● Disminución (Red)
 ● Aumento (Blue)

Elevación (m)
 High : 6526
 Low : 0

Figura 2.24. Tendencias en el régimen de heladas. Colores rojos muestran las estaciones con tendencias hacia la disminución en el número de heladas y los azules las tendencias hacia un aumento.

→ Régimen de Aridez

El grado de aridez de un clima, no sólo depende de la precipitación, sino del balance entre precipitaciones y tasas de evaporación. Si bien existen datos de precipitación de larga data, los de evaporación son relativamente recientes, razón por la que en un gran número de estudios bioclimáticos, se han usado índices termopluviométricos que proporcionan una medida indirecta de aridez. Lo anterior supone una relación directa entre la temperatu-

ra y la tasa de evaporación. Uno de los índices más extensamente usados en el mundo en estudios fitogeográficos, es el índice de De Martonne (Di Castri y Hajek, 1976). El índice de Aridez De Martonne tiene la expresión siguiente:

$$IA = \frac{P}{T+10}$$

Donde: P es la precipitación anual (mm) y T es la temperatura media anual (°C)

El índice de aridez ha mostrado una tendencia hacia el aumento desde comienzos de siglo. En el caso de La Serena y Ovalle existe un cambio desde un régimen árido a uno hiperárido (p valor < 0,05), mientras que en Valparaíso y Quinta Normal, aun cuando se observa un aumento de la aridez, ésta ha variado dentro de la clase semiárido.

Subhúmedo
 Húmedo
 Semiárido
 Árido
 Hiperárido

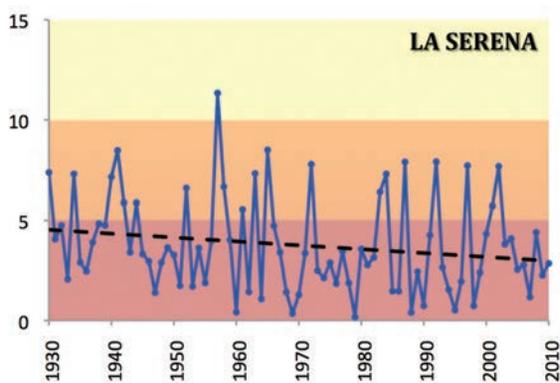


Figura 2.25. Serie histórica del índice de aridez de De Martonne de La Serena. Período 1930 – 2010.

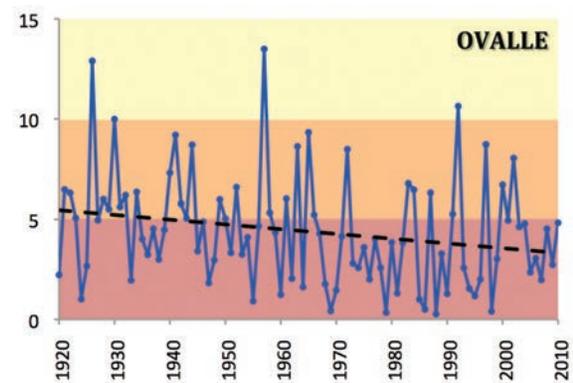


Figura 2.26. Serie histórica del índice de aridez de De Martonne de Ovalle. Período 1920 – 2010.

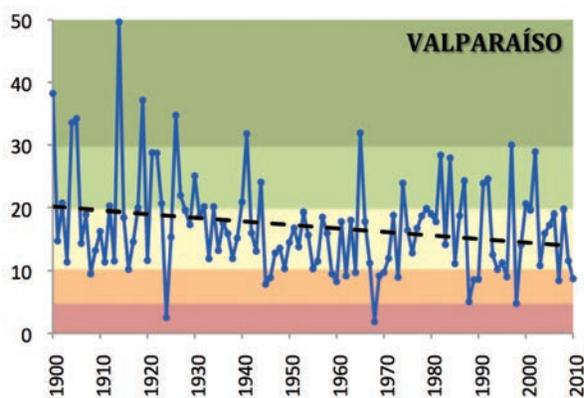


Figura 2.27. Serie histórica del índice de aridez de De Martonne de Valparaíso. Período 1900 – 2010.

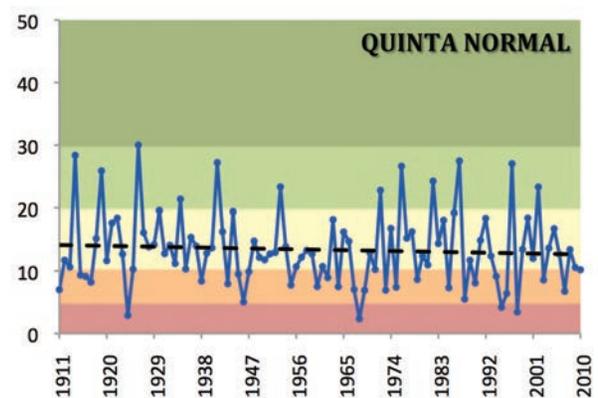


Figura 2.28. Serie histórica del índice de aridez de De Martonne de Quinta Normal. Período 1911 – 2010.

El avance del desierto en el país es consecuencia, por una parte, de la acción antrópica por medio de la sobreexplotación agrícola, sobrepastoreo y deforestación, entre otros (Safriel, 2009), y por otra parte, ella también responde a una reducción de las precipitaciones (Santibáñez F y P Santibáñez, 2007). Según cálculos hechos en el Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED), estas últimas estarían disminuyendo a una tasa anual de 1 mm por año en La Serena, > 4 mm por año en Temuco y hasta 10 mm por año en Valdivia. Esto está provocando un “avance del desierto” en torno a 1 km por año, lo que claramente es una amenaza al patrimonio natural de Chile, con grandes consecuencias potenciales sobre el mundo biológico, la sociedad y la economía del país.



La aridización del régimen pluviométrico, junto a un aumento de la temperatura del orden de 0,5° a 0,6°C produjo una caída en los rendimientos de los cereales que hizo desaparecer casi por completo su cultivo en casi la totalidad de la región de Coquimbo. Similar tendencia sufrieron el anís y el comino, otrora, cultivos tradicionales de la región. Las praderas naturales igualmente han visto reducida su productividad, afectando a la crianza de cabras, la más importante fuente de sustento de las comunidades agrícolas de esta región.

→ Comentarios Finales

La disminución de las precipitaciones ha sido más intensa en zonas costeras y con influencia oceánica que en zonas interiores, lo que sería una consecuencia del aumento en la actividad anticiclónica en el Océano Pacífico, afectando mayormente a sectores litorales. Este aumento de actividad anticiclónica estaría dificultando el paso de los frentes provenientes desde el suroeste, lo que contribuiría a disminuir el número de días de lluvia cada año.

Las tendencias en el régimen de aridez, muestran un avance del límite del desierto hacia el sur. Esto puede tener un importante potencial de impacto negativo sobre los ecosistemas áridos y semiáridos, los cuales enfrentan una situación creciente de déficit hídrico.

Con respecto a las temperaturas, es notable la fuerte regulación marítima del clima en regiones costeras, donde se aprecia una disminución en las temperaturas máximas. Esta condición se va extinguiendo hacia el interior, de modo que el valle central, la precordillera y la cordillera han experimentado un elevado calentamiento desde comienzos del siglo XX. Este hecho implica una acentuación en las próximas décadas de los gradientes térmicos entre la costa y el interior, lo cual sugiere una posible aceleración de los sistemas de vientos locales, lo que puede representar una adversidad para la agricultura de zonas costeras, al igual que un aumento en la evapotranspiración y los requerimientos hídricos de los cultivos. Esto último podría ser compensado por una

posible disminución en la radiación solar, debido a un incremento de la nubosidad que sería esperable como consecuencia de la mayor entrada de masas de aire marino hacia el interior.

Las heladas muestran una tendencia hacia el aumento en zonas costeras y con influencia marina, mientras que en zonas precordilleranas muestran una tendencia hacia la disminución. Esto podría explicarse por una actividad por sobre lo normal del anticiclón, que se origina en inestabilidades atmosféricas de la zona intertropical, lo que sumado a las aguas frías de la corriente de Humboldt, facilita que éste se acerque al continente, trayendo aire frío de origen polar, y aumentando el poder destructivo de las heladas.

→ Referencias Bibliográficas

- ♦ Di Castri, F. y E. Hajek. 1976. Bioclimatología de Chile. Editorial Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 128 pp.
- ♦ Lobo, D.; Gabriels, D.; Ovalles, F.; Santibáñez, F.; Moyano, M.; Aguilera, R.; Sangüeza, C y N. Urra. 2005. Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe. Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe (CAZALAC), PHI-UNESCO. 66 p.
- ♦ Pizarro, R.; Sangüesa, C.; Cornejo, F.; León, L.; González, C.; Falcón, M. 2006. Estudio mapas de zonas de agresividad del clima. Servicio agrícola y ganadero (SAG) y Universidad de Talca. Talca, Chile. 89 p.
- ♦ Rivera, A.; Casassa, G.; Acuña, C.; Lange H. 2000. Variaciones recientes de glaciares en Chile. Investigación geográfica 34. p 29 -60.
- ♦ Safriel, U. 2009. Deserts and desertification: Challenges but also opportunities. Land Degradation and Development, 20: 353-366. doi: 10.1002/ldr. 935 p.
- ♦ Santibáñez Q.F. y P. Santibáñez V. 2007 Trends in Land Degradation in Latin America and the Caribbean, the role of climate change. EN: Climate and Land Degradation World Meteorological Organization. Ginebra. Springer Verlag. p 65-81.





Zorro culpeo (Lycalopex culpaeus) en Parque Nacional Fray Jorge. Región de Coquimbo.

Embalse Corrales, Salamanca. Región de Coquimbo.

Capítulo 3

Generación de Escenarios Climáticos de Alta Resolución



Introducción

→ El clima regional sufrirá importantes cambios como consecuencia del calentamiento global. La distribución espacial de estos cambios estará fuertemente determinada por la combinación de los factores locales modeladores del mesoclima: efecto marino, relieve, altitud, surgencias marinas frías. Con el propósito de tener una visión espacializada de los futuros escenarios climáticos, desarrollamos un sistema de integración de información proveniente de los modelos climáticos globales y regionales, información climatológica de terreno, imágenes satelitales térmicas y el modelo de elevación.

Los Modelos de Circulación Global (GCM) son utilizados para proyectar cambios en las variables atmosféricas bajo escenarios de cambio climático, definidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Ellos tienen una baja resolución espacial, 150 – 300 km aproximadamente, por lo que no pueden ser usados directamente a escala de cuenca hidrográfica para

evaluar los impactos del cambio climático. Para esto se requieren modelos regionales de Downscaling, que proveen una mayor resolución espacial, normalmente entre 10 – 50 km. Para algunos estudios detallados, se requiere aún mayor resolución, particularmente en modelos hidrológicos, agrícolas y de ecosistemas. Los modelos utilizados en estas aplicaciones generalmente requieren resoluciones mayores a 1 km², con el fin de representar la heterogeneidad y complejidad del territorio. Este hecho es especialmente importante en zonas con fuertes gradientes verticales de elevación.

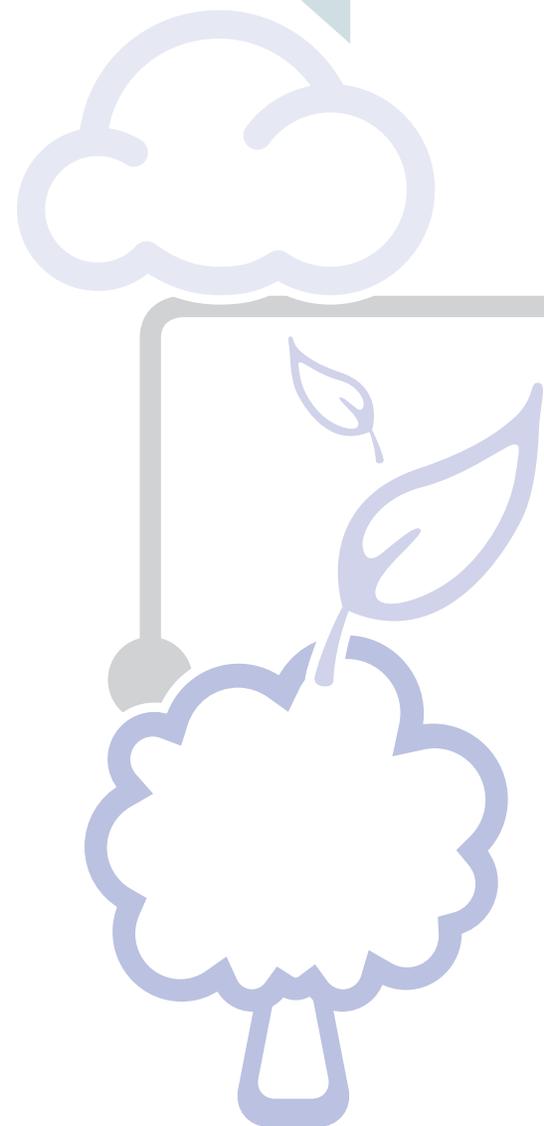
En este capítulo se presenta una metodología basada en los conceptos anteriores para la generación de escenarios climáticos de alta resolución espacial.

Para la generación de cartografías climáticas futuras se utilizó el escenario de cambio climático al año 2050 para la trayectoria de concentración RCP 8.5 (Ver anexo cuadro explicativo).

→ Recopilación, Validación y Análisis de Bases de Datos Climáticos Históricos

Para construir la línea base se compiló la información de estaciones meteorológicas de la Dirección Meteorológica de Chile, la Dirección General de Aguas y las provenientes de diversas instituciones públicas y privadas (Universidades, Institutos, particulares). El período considerado para este efecto fue 1980-2010.

Esta información fue complementada con la información climática espacializada del Atlas Agroclimático de Chile (Santibáñez y Uribe, 1993), la que fue actualizada al período en referencia para este estudio.



➔ Obtención de los Gradientes Verticales de Temperatura a través del uso de Imágenes Satelitales

En la zona de estudio existen 100 estaciones meteorológicas, sin embargo en algunas áreas, como zonas montañosas, existe una baja densidad de estaciones. En estas áreas se requiere densificar los datos climáticos para construir una cartografía de alta resolución espacial. Existen algunos principios termodinámicos que permiten modelar la temperatura en zonas de altura. La temperatura del aire normalmente decrece $0,6^{\circ}\text{C}$ por cada 100 metros. Este valor puede considerarse el gradiente térmico normal en las capas más bajas de la tropósfera. Sin embargo este valor puede variar localmente dependiendo de los "driver climáticos" presentes en cada zona, tales como surgencias marinas, cuerpos de agua, relieve, latitud y otras singularidades geográficas. Una anomalía que modifica el valor del gradiente térmico vertical se produce durante los periodos de inversiones térmicas, cuando la temperatura

del aire en vez de descender, aumenta con la altitud. Esta situación es muy frecuente después de varios días de tiempo estable, en donde el aire tiende a estratificarse según su densidad, quedando el aire más frío en las primeras capas, cercano a la superficie, mientras que el aire más tibio permanece en estratos más elevados. Este fenómeno es típico durante las mañanas en invierno en la zona Central de Chile en valles poco ventilados.

Las imágenes térmicas nos permiten conocer las temperaturas superficiales en todo el territorio, ya que representan las variaciones espaciales dentro de éste. A través de estas imágenes es posible obtener detalles que los algoritmos de interpolación espacial no son capaces de representar, como islas térmicas de concentración de masas de aire frío, efecto Foehn o sombras de lluvia (contraste climático entre laderas

orientes y ponientes), efecto atemperador de los cuerpos de agua sobre los bordes, capa límite del océano sobre el litoral y otras singularidades (Figura 3.1).

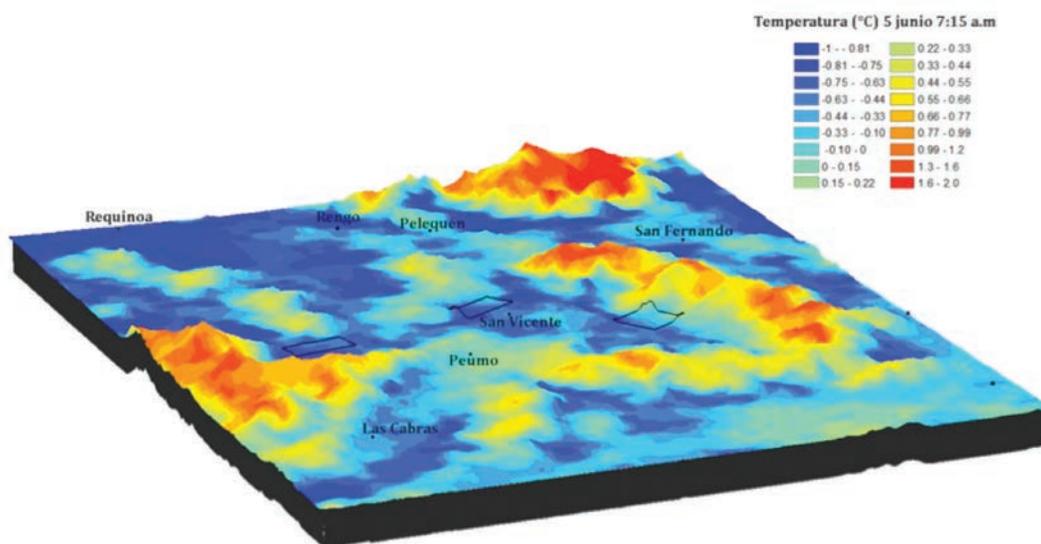
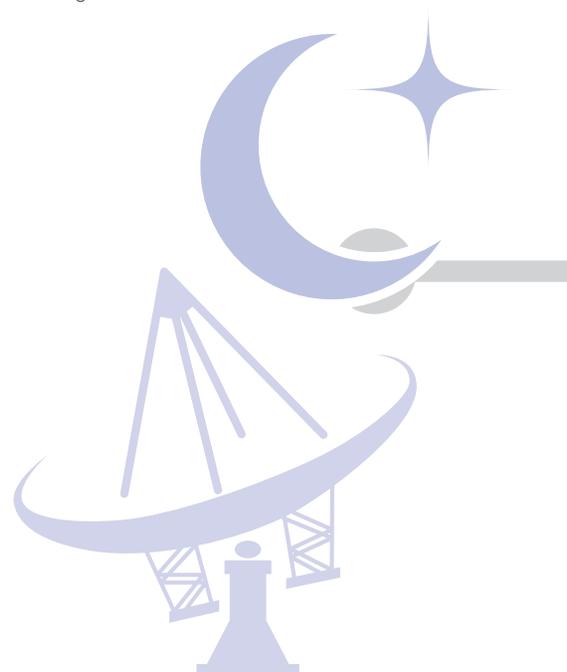


Figura 3.1: Variaciones de la temperatura a micro escala durante una helada en el valle interior de la zona Central de Chile. Técnica utilizada para refinar la cartografía agroclimática. Cada color representa una temperatura diferente. Los colores azules indican las temperaturas más bajas y los verdes a rojos las temperaturas más elevadas. Se puede apreciar así la configuración general de los apozamientos de aire frío y los sectores que escapan a la invasión de aire frío.

➔ Densificación de Información proveniente de Estaciones Meteorológicas

Para establecer los algoritmos de interpolación se densificaron las estaciones meteorológicas disponibles a través de la generación de estaciones virtuales (Figura 3.3). Estas estaciones se generaron a partir de la información proveniente de las imágenes térmicas satelitales (NOAA- AVHRR) y de un modelo digital de elevaciones. Combinando estos dos elementos podemos determinar en cada zona los diferentes gradientes verticales de temperaturas máximas y mínimas. Esto permitió suplir en parte las lagunas de información en ciertas zonas del territorio, particularmente en áreas de altura.

➔ Obtención de la Cartográfica Climática de Alta Resolución

Se modeló el régimen térmico y de precipitación con resolución de 1 km para el período 1980 a 2010, a través de regresiones múltiples que consideran como variables explicativas la elevación, la latitud y la distancia al mar de cada estación.

Para poder obtener un buen ajuste en la generación de regresiones, se dividió el área de estudio en 3 zonas. En algunos casos fue necesario adicionalmente dividir el territorio en dos sub-zonas longitudinales: aquellas con más influencia marina y sectores interiores más continentales. Las regresiones fueron de tipo cuadrática y en algunos casos cúbicas.

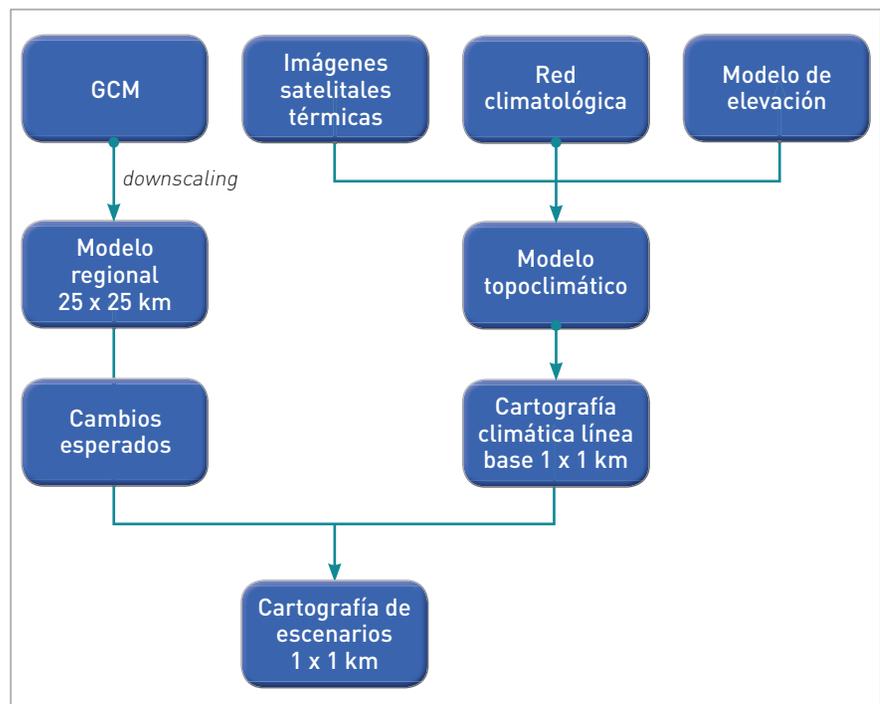


Figura 3.2: Esquema metodológico de la construcción de escenarios de alta resolución

Ejemplos de regresiones utilizadas para la modelación del régimen térmico y de precipitaciones

Para la región de Valparaíso se utilizó una regresión cuadrática para modelar la temperatura máxima (TX):

$$T_x = \alpha + \beta * elevación + \gamma * latitud + \delta * distancia\ mar + \varepsilon * elevación^2 + \theta * latitud^2 + \vartheta * distancia\ mar^2$$

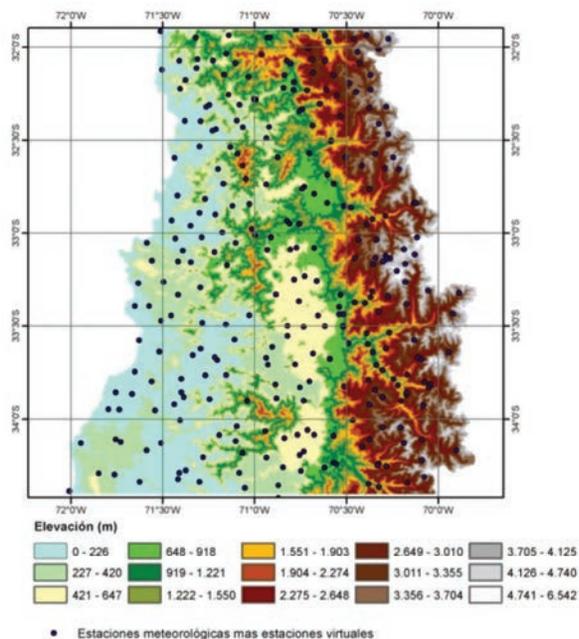


Figura 3.3. Distribución de estaciones meteorológicas más estaciones virtuales para la generación de regresiones no lineales múltiples en las regiones de Valparaíso y Metropolitana.

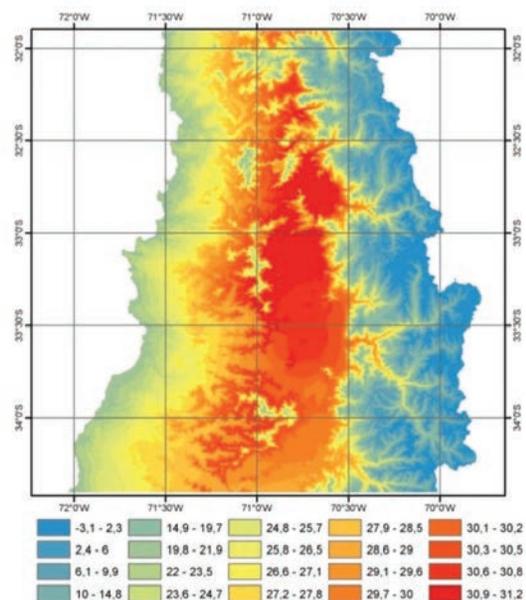


Figura 3.4. Temperatura máxima de enero, generada a partir del modelo de regresión. Región de Valparaíso y Metropolitana.

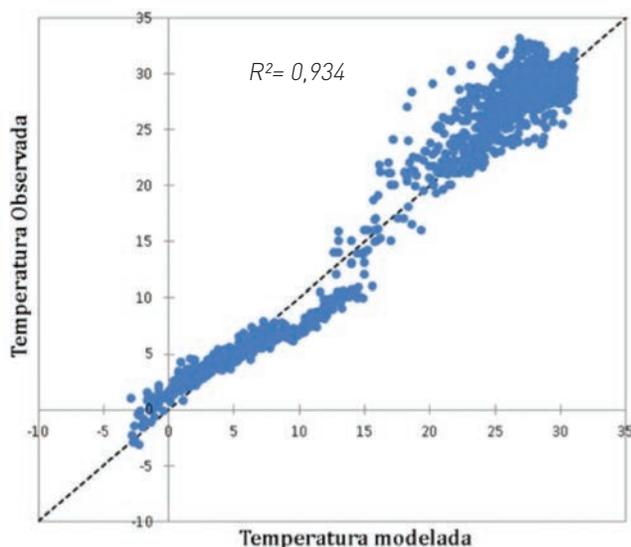


Figura 3.5. Validación del modelo de temperatura máxima de enero para la región Metropolitana. Temperatura modelada v/s temperatura observada

➔ Metodología de Generación de Escenarios Climáticos

Para la generación de los escenarios climáticos se utilizó el modelo de circulación global atmosférica HAD-GEM2, el que presenta un buen ajuste a la situación del escenario climático actual. Por otra parte, este modelo ha sido utilizado en estudios anteriores del Ministerio del Medio Ambiente, lo que permite comparar los análisis entre estudios.

➔ Aplicación de los Diferenciales de los Modelos de Downscaling para generar Escenarios Futuros

Se aplicaron los diferenciales de temperatura, precipitación y radiación solar, según lo pronosticado por el modelo HADGEM2 a la cartografía climática generada a 1 km. Al interior de cada cuadrante del modelo HADGEM2 (10 x 10 km), se corrigió el valor de todos los puntos de la malla más fina (microscaling) considerando la variación proyectada por HADGEM2:

$$V_f = V_0 * \frac{VH_f}{VH_0}$$

Donde V_f es el valor final de una variable en el punto de la malla fina, V_0 es el valor de la variable en la línea base en cada punto de la malla fina, VH_f es el valor final de la variable en el punto de HADGEM2 para el cuadrante respectivo y VH_0 es el valor de la línea base determinado por HADGEM2 para esa variable en cada punto (Figura 3.3).

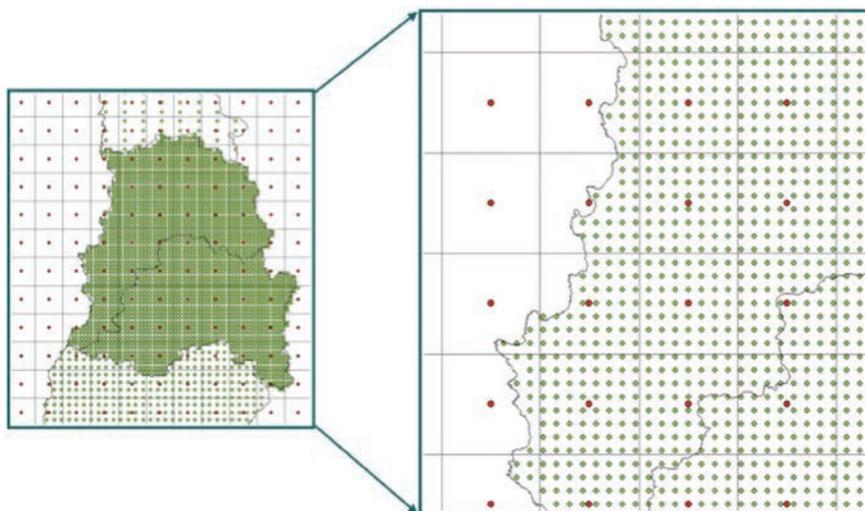


Figura 3.6. Malla verde: cartografía climática generada a 1 km. Malla roja: Datos provenientes del modelo HADGEM2 10 x 10 km. (cambios en las variables climáticas para escenarios futuros).

De esta manera se obtuvo una cartografía climática detallada a 1 km para los escenarios de línea base (1980-2010) y para los escenarios futuros 2030 y 2050. Ver anexo de la cartografía climática de la zona central.

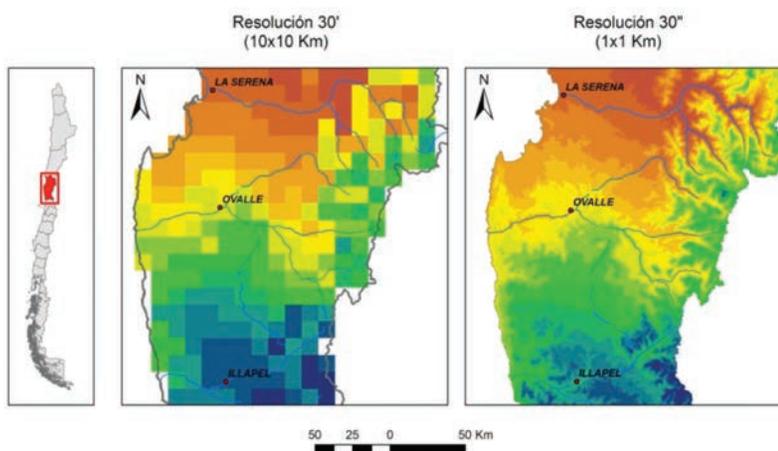


Figura 3.7. Comparación entre un Modelo regional, resolución 10 x 10 km (izquierda) y un modelo microscaling, resolución 1 x 1 km (derecha). Valles de Limarí y Choapa.



→ Cálculo de Variables Agroclimáticas Derivadas

A partir de los cambios que se registran de temperatura, precipitación y radiación solar en cada punto, se establecieron las modificaciones que estos cambios generarán sobre el conjunto de variables climáticas derivadas, tales como los días-grado, horas de frío, período libre de heladas, déficit y excedentes hídricos, número de heladas, de días cálidos, períodos secos y húmedos, período de receso vegetativo, evapotranspiración potencial e índices de humedad. Ver anexo de la cartografía climática de la zona central.

→ Referencias Bibliográficas

- AGRIMED, 2008. Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de Cambio Climático. Capítulo IV Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario frente a escenarios de Cambio Climático, Informe técnico. 92 p.
- CONAMA-DGF. 2006. Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI. Comisión Nacional del Medio Ambiente. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago.
- Santibáñez, F y J.M., Uribe. 1993. Atlas Agroclimático de Chile. Tomo II: Regiones Sexta, Séptima, Octava y Novena. Editorial Universitaria. Santiago, Chile. 99 p.
- Santibáñez, F., P. Santibáñez. C. Caroca, P. González, P. Perry, N. Gajardo, J. Simonetti, P. Pliscoff. 2012. Plan de acción para la protección y conservación de la biodiversidad, en un contexto de adaptación al cambio climático. Ministerio Medio Ambiente. Santiago de Chile. 225 p.





Palo de yegua (Fuchsia lycioides) en el Parque Nacional Fray Jorge. Región de Coquimbo.

Capítulo 4

→ Cambio Climático y Ecosistemas



Introducción

→ Los cambios que está sufriendo el clima son cada día más evidentes y amenazantes para la biota del planeta. En Chile, el importante descenso de las precipitaciones en las zonas costeras entre Caldera y Puerto Montt, y en menor medida en zonas interiores y precordilleranas, asociado a una tendencia creciente de las temperaturas máximas en zonas interiores, y decreciente en zonas costeras, podría generar consecuencias significativas sobre la agricultura y la biodiversidad. A los cambios ya señalados se incluyen el desplazamiento en sentido ascendente de las isoterma en la cordillera de Los Andes, el aumento de las temperaturas invernales en algunas localidades, con la consecuente disminución de las horas de frío, y de manera más local se advierte en algunos sectores el aumento de la intensidad de los vientos, el retraso de las lluvias otoñales, la prolongación del verano hacia el otoño, el aumento de las lluvias de primavera y el aumento de las heladas de origen polar, entre otros efectos.

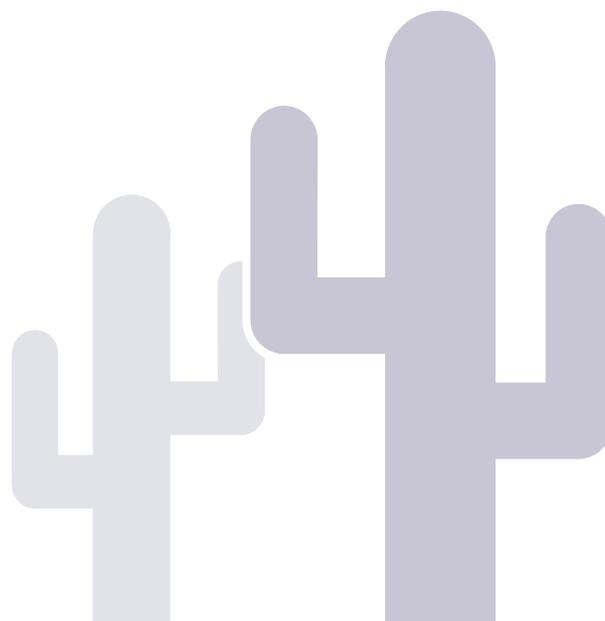
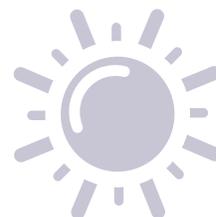
De manera natural, un ecosistema templado tardaría cientos de años en adaptarse a un nuevo escenario climático. Sin embargo, las alteraciones del clima previstas por los modelos globales de cambio climático podrían manifestarse en sólo décadas, dificultando toda posibilidad de adaptación, y constituyendo por tanto, una seria amenaza para los ecosistemas del país, por cuanto pocos ecosistemas podrían adap-

tarse a la misma velocidad con que están ocurriendo los cambios climáticos.

En el presente capítulo se describen los ecosistemas terrestres de la zona de régimen semiárido de Chile, representados bajo el concepto de "pisos de vegetación", los que fueron definidos por la clasificación del Ministerio del Medio Ambiente (Luebert y Pliscoff, 2006). Para tener una perspectiva de los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad de esta zona, se presenta a continuación la evaluación del estrés bioclimático que podrían inducir los nuevos escenarios del clima sobre los pisos de vegetación, entendiéndose por estrés bioclimático a la pérdida de sintonía entre una especie y su clima, lo que redundará en una disminución de la capacidad de un ecosistema de sustentarse en los nuevos escenarios climáticos.



El presente capítulo está basado en el proyecto "Plan de Acción para la Protección y Conservación de la Biodiversidad, en un contexto de adaptación al Cambio Climático", desarrollado por el Centro de Agricultura y Medio Ambiente (AGRIMED), por encargo del Ministerio del Medio Ambiente.



CARACTERIZACIÓN BIOCLIMÁTICA DE LOS PISOS DE VEGETACIÓN

→ Los Pisos de Vegetación de la Zona Semiárida de Chile

Existen distintas formas y escalas para clasificar el patrimonio biológico de un territorio. Es así como se han originado los conceptos de paisaje, bioma, reino, ecorregión, hábitat, nicho, entre otras. Un concepto bastante utilizado es el de piso de vegetación, el que corresponde a un complejo biótico relativamente homogéneo en su composición botánica y relación con el medio, coexistiendo con una condición bioclimática que le es propia. En Chile se han identificado 127 pisos vegetacionales (Luebert y Pliscoff, 2006), que a su vez se agrupan en 17 formaciones vegeta-

les que cubren todo el territorio. Las formaciones son conjuntos de pisos que tienen una similar estructura.

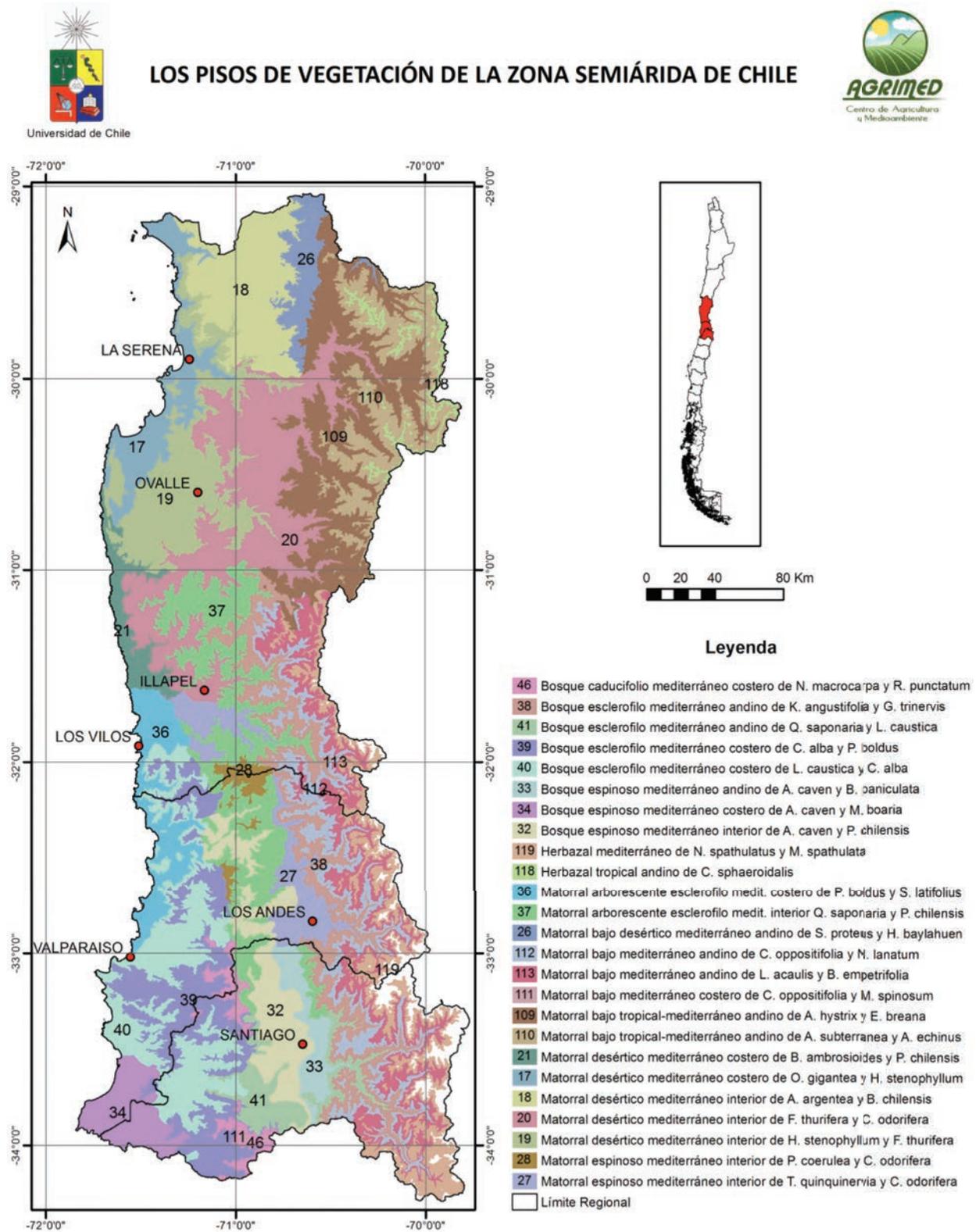
La zona semiárida de Chile contiene 25 pisos de vegetación que forman parte de las formaciones vegetales de matorral bajo desértico, matorral bajo de altitud, matorral desértico, matorral espinoso, matorral arborecente, herbazal de altitud, bosque espinoso, bosque esclerófilo y bosque caducifolio. A continuación se presenta una cartografía de los pisos de vegetación presentes en la zona semiárida del país.

Los pisos de vegetación son complejos bióticos relativamente homogéneos en su composición botánica y relación con el medio, coexistiendo con una condición bioclimática que le es propia. Se han definido 127 pisos de vegetación para todo Chile, de los cuales 25 son propios de la zona semiárida.



Bosque esclerófilo del Parque Nacional La Campana. Región de Valparaíso.

Parque Nacional La Campana, situado en las comunas de Hijuelas y Olmué (V región). Gran parte de este parque contiene al piso bosque esclerófilo mediterráneo costero de *Lithrea caustica* (Litre) y *Cryptocarya alba* (Peumo), asociado a *Jubaea chilensis* (Palma chilena) y a arbustos espinosos como *Colliguaja odorífera* (Colliguay) y *Retanilla trinervia* (Tevo).



Luebert y Pliscoff (2006).

Figura 4.1. Distribución geográfica de los pisos de vegetación de la zona de régimen semiárido de Chile.

➔ Perfil Bioclimático de los Pisos de Vegetación

Existen tres rasgos mayores del clima que determinan a las comunidades bióticas: la calidez del verano, el frío del invierno y el régimen de humedad de las estaciones. Cada comunidad vegetal se ha adaptado a una combinación específica de estas variables, y si cualquiera de ellas sufre un cambio más allá de lo tolerado por las especies que

componen la comunidad, creará problemas de reproducción, sobrevivencia o capacidad de crecimiento, que irá haciendo desaparecer a las especies que no puedan adaptarse a una nueva situación. Con el objeto de evaluar el efecto que los cambios climáticos podrían generar sobre los distintos pisos de vegetación en Chile, es necesario conocer las to-

lerancias de éstos frente a las variables climáticas (IPCC, 2007). Para ello es fundamental evaluar la amplitud de variación de cada variable climática dentro del territorio ocupado por cada piso, pues ello permite establecer, de una forma empírica, el intervalo máximo de tolerancia de cada piso frente a cada variable (Figuras 4.2, 4.3 y 4.4).



Existen tres rasgos climáticos importantes que determinan a las comunidades bióticas: la calidez del verano, el frío del invierno y el régimen de humedad de las estaciones. Cada comunidad vegetal se ha adaptado a una combinación específica de estas variables, y si cualquiera de ellas sufre un cambio más allá de lo tolerado por las especies que componen la comunidad, creará problemas de reproducción, sobrevivencia o capacidad de crecimiento, que irá haciendo desaparecer a las especies que no puedan adaptarse a una nueva situación.

➔ La Calidez del Verano

La temperatura máxima del mes más cálido es un buen indicador de cuán cálida es la estación cálida. Muchas especies de origen templado tienen problemas de crecimiento cuando las temperaturas exceden frecuentemente los 28°C. Por el contrario, las especies de origen

subtropical encuentran mejores condiciones de poblamiento cuando el verano se hace más cálido.

En el gráfico de la Figura 4.2 se puede observar cuánto se espera que varíe la calidez del verano en cada uno de los pisos de vegetación de la

zona semiárida, en relación con la línea base o situación actual. Como puede notarse, en todos los pisos habría un ascenso de la temperatura máxima de enero en el escenario 2030 (color verde), el cual se incrementaría aún más en el escenario 2050 (color rojo).

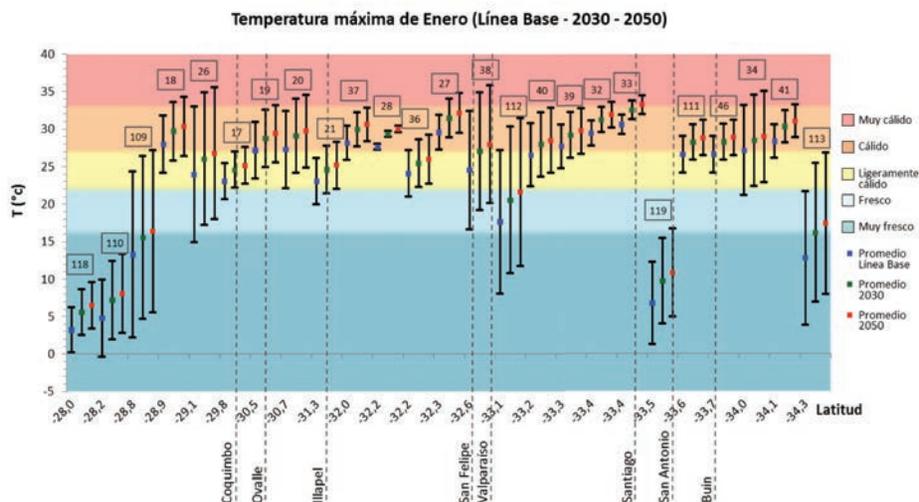


Figura 4.2. Intervalos de tolerancia de los pisos de vegetación de la zona semiárida frente a la temperatura máxima de enero (Línea base, escenario 2030 y escenario 2050). Los números en el gráfico corresponden al código de los pisos de vegetación presentados en el mapa anterior.

Los pisos de rango mayor, como por ejemplo el piso 109 (Matorral bajo tropical - mediterráneo andino de *A. hystrix* y *E. breana*) o el piso 113 (Matorral bajo mediterráneo andino de *Laretia acaulis* y *Berberis empetrifolia*), presentan mayor grado de tolerancia frente a variaciones de temperatura máxima, variando en-

tre un régimen ligeramente cálido a muy fresco. Estos pisos de mayor rango de tolerancia están adaptados a mayores variaciones de temperatura, lo que además les facilita tener una distribución geográfica más extensa. Distinto es el caso de pisos como el 28 (Matorral espinoso mediterráneo interior de *Puya coerulea*

y *Colliguaja odorifera*) o el 21 (Matorral desértico mediterráneo costero de *Bahia ambrosioides* y *Puya chilensis*), cuya amplitud de rango entre los valores máximos y mínimos es bastante más restringida, y son por tanto pisos de menor superficie y mayor vulnerabilidad ante cambios de la temperatura máxima.

→ El Rigor del Invierno

Las temperaturas más bajas invernales pueden actuar como un límite severo para la sobrevivencia de ciertas especies, especialmente de origen subtropical. Contrariamente a esto, muchas especies de origen templado requieren del frío invernal para generar flores fértiles y garantizar la reproducción de la especie. De este modo, si el frío invernal varía, puede favorecer o desfavorecer a diversas especies, según sea el origen de éstas.

La temperatura mínima del mes más cálido, al igual que la temperatura máxima de enero, se elevaría en los escenarios futuros, haciendo

que el rigor del invierno sea menos intenso en todos los pisos de la zona semiárida del país. Así, algunos pisos pasarían de tener un invierno frío a un invierno fresco, como es el caso del Bosque esclerófilo mediterráneo andino de *Kageneckia angustifolia* y *Guindilia trinervis* (piso 38), o de un invierno fresco a un invierno templado, como ocurriría con el Bosque espinoso mediterráneo interior de *Acacia caven* y *Prosopis chilensis* (piso 32) o el Matorral desértico mediterráneo interior de *Flourensia thurifera* y *Colliguaja odorifera* (piso 20), por nombrar algunos ejemplos.

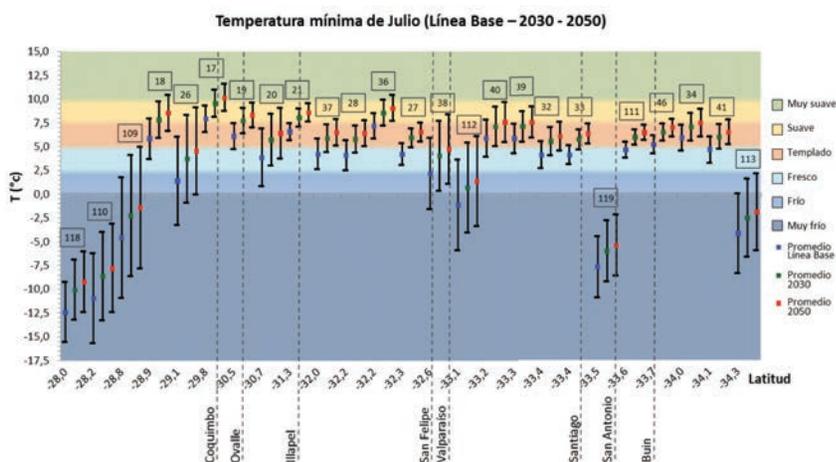


Figura 4.3. Intervalos de tolerancia de los pisos de vegetación de la zona semiárida frente a la temperatura mínima de julio (Línea base, escenario 2030 y escenario 2050). Los números en el gráfico corresponden al código de los pisos de vegetación presentados en el mapa anterior.

→ Régimen de Humedad

El grado de aridez del clima es uno de los factores más determinantes de la distribución de las especies. Las especies presentan diversas estrategias de adaptación a la aridez, siendo cada una capaz de tolerar un cierto nivel de déficit hídrico. Por sobre ciertos niveles de aridez dichas especies tienden a ser reemplazadas por otras más xerofíticas (que toleran aridez). Uno de los indicadores más extensamente utilizados es

el índice de aridez, que corresponde al cociente precipitación/evapotranspiración anuales.

En la zona semiárida los pisos de vegetación se van aridizando a medida que disminuye la latitud (de sur a norte), como puede observarse en el gráfico de la Figura 4.4. A su vez, se espera que en cada piso esta aridización se vaya incrementando en el futuro, tendiendo gran parte de

ellos hacia un régimen árido a hiperárido en el escenario 2050. Sólo los pisos de mayor amplitud de rango, correspondientes básicamente a ecosistemas andinos (como los pisos 112, 119 y 113), mantendrían un régimen subhúmedo a semiárido, aunque de todas formas aumentaría su aridez relativa en relación con el escenario actual (color azul).

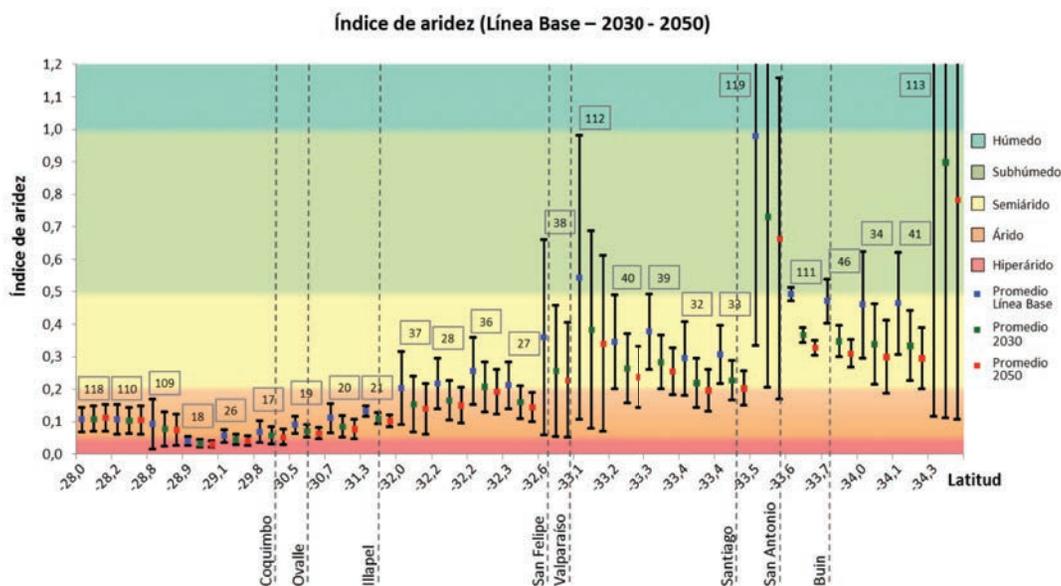


Figura 4.4. Intervalos de tolerancia de los pisos de vegetación de la zona semiárida frente a la aridez (Línea base, escenario 2030 y escenario 2050).

*Los rangos de los pisos 119 y 113 se prolongan hasta un índice de aridez máximo de 1,6 y 2,6 para la línea base, pero éstos no se muestran completos para poder apreciar de mejor forma los rangos del resto de los pisos.

IMPACTO DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES

Los nuevos escenarios climáticos podrían generar diferentes efectos sobre las especies de una comunidad o "piso de vegetación". Aquellas con mayor capacidad de adaptación a nuevas condiciones climáticas podrían persistir en su territorio original, mientras que otras podrían tender a desaparecer, siendo reemplazadas con el tiempo por otras especies invasoras. Podría incluso

suceder que se modificara por completo la composición específica de los pisos de vegetación, haciendo emerger nuevas comunidades con ventajas para subsistir en las nuevas condiciones climáticas. Múltiples podrían ser los posibles escenarios y es muy difícil anticipar cómo podría ser la dinámica de adaptación y sucesión en respuesta a una modificación del clima. Lo único posi-

ble de prever es el deterioro de la funcionalidad de las comunidades tal como se conocen hoy, a causa de las estrategias de adaptación de las comunidades vegetales (Lee et al. 2007).

Por razones adaptativas, los rangos de tolerancia se han sintonizado a través de la evolución con los rangos de variación de cada variable cli-

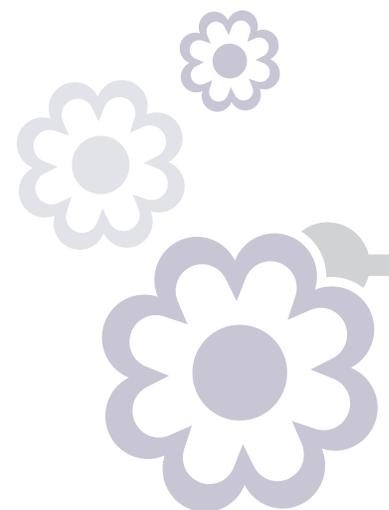
mática dentro del territorio ocupado por una comunidad. El estrés bioclimático comienza a aparecer cuando una variable escapa de estos rangos de tolerancia, creando una condición para la cual la especie no tiene respuestas (Vennetier, 2010). De esta forma se genera una situación adversa que degrada las funciones ecofisiológicas de las especies, reduciendo su capacidad competitiva, reproductiva o, incluso, de supervivencia.

Sobre esta base, fueron evaluados los rangos bioclimáticos extremos de tolerancia de cada ecosistema, derivados de su distribución geográfica actual. En la medida que estos rangos sean más estrechos, se su-

pone que las especies que componen el ecosistema poseen menos tolerancia frente a la variación de una variable. Contrariamente, cuando el rango se amplía, existe mayor capacidad de las especies para aceptar valores extremos de una variable (Turner and Kramer, 1980). Es así como surge el concepto de "capacidad de sustentación" de especies o ecosistemas, el cual corresponde al grado de coincidencias entre el bioclima de un territorio y los rangos de tolerancia de una comunidad vegetal.



El Estrés Bioclimático es un indicador de la pérdida de sustentación de un ecosistema a causa de variaciones climáticas que se escapan de su rango de tolerancia. Se calcula en base a un modelo que integra el estrés térmico y el estrés hídrico de los ecosistemas.



➔ Estrés Bioclimático de los Pisos de Vegetación

Para evaluar el estrés bioclimático de los pisos de vegetación de la zona de régimen árido frente a los cambios climáticos, se utilizó un modelo que integra a las dos mayores dimensiones del estrés: el estrés térmico (estival e invernal) y el estrés hídrico, particularmente originado en la acentuación de la aridez.

El estrés térmico estival (ET_e) está dado por la ecuación:

$$ET_e = S_{te} * (TXE_{futuro} - TXE_{linea\ base})$$

Y el estrés térmico invernal (ET_i) está dado por la ecuación:

$$ET_i = S_{ti} * (TNJ_{futuro} - TNJ_{linea\ base})$$

S_{te} y S_{ti} corresponden a la sensibilidad de una o un grupo de especies frente a las altas y bajas temperaturas respectivamente. Esta sensibilidad representa, en el primer caso, la caída relativa en el desempeño de las especies, por cada grado de alza de la temperatura al sobrepasar el umbral máximo de tolerancia de las altas temperaturas. En el segundo caso, la caída relativa en el desempeño de las especies, por cada grado de alza en las temperaturas invernales, lo que puede afectar el reposo vegetativo invernal. Estas sensibilidades son inversamente proporcionales al rango actualmente tolerado de cada variable. Para obtener los coeficientes de sensibilidad estival e invernal se emplearon las ecuaciones siguientes:

Para las temperaturas estivales: $S_{te} = 0,1532 - 0,2424 * CV_{te}$

Para las temperaturas invernales: $S_{ti} = 0,1552 - 0,1043 * CV_{ti}$

Donde CV_{te} y CV_{ti} son los coeficientes de variación de las temperaturas máximas del mes más cálido y mínima del mes más frío, de cada piso respectivamente.

Para calcular el estrés hídrico se empleó la siguiente ecuación, que relaciona la sensibilidad de los ecosistemas con el grado de intensificación de la aridez de cada uno de ellos.

$$E_h = S_h * \left(1 - \frac{IA_{futuro}}{IA_{actual}} \right)$$

Donde E_h es el estrés hídrico de los ecosistemas, S_h es la sensibilidad de los mismos frente a la aridez y IA es el índice de aridez. La sensibilidad en tanto, es calculada en base al coeficiente de variación del índice de aridez propio de cada piso de vegetación.

$$S_h = 1,3042 - 0,908 * CV_{nIA}$$

Para integrar el estrés hídrico y el estrés térmico se utilizó un modelo multiplicativo con atenuación regresiva, que permite atenuar gradualmente el efecto de un estrés cuando éste actúa repetidas veces en el tiempo o cuando se combina con otros estreses que actúan en el mismo sentido. En este caso tenemos dos fuentes de estrés: uno térmico (ET) y uno hídrico (EH). Ambos producen una merma en la capacidad de sustentación del ecosistema. Si ellos actuaran por separado, cada uno se evaluaría aparte:

Caída de la capacidad de sustentación debida al estrés térmico = $1 - ET$

Caída de la capacidad de sustentación debida al incremento de la aridez = $1 - E_h$

En la práctica los estreses se superponen, pudiendo ser integrados en un modelo multiplicativo donde el desempeño o capacidad de sustentación se va reduciendo gradualmente en la medida que los estreses sean más intensos y numerosos. En la práctica, luego de un estrés primario, el efecto de los estreses secundarios va perdiendo importancia en la medida que el organismo esté más estresado, por dicha razón, un modelo multiplicativo, que atenúa el efecto de los estreses secundarios en función de la magnitud total del estrés en que se encuentra el organismo (atenuación regresiva), parece más indicado:

$$E_{INT} = 1 - (1 - ET) * (1 - E_h)^{(1-ET)}$$

Donde E_{INT} es el estrés integrado conjunto debido al aumento de la temperatura y la intensificación de la aridez, que puede ser evaluado de acuerdo a la siguiente escala.

Tabla 4.1. Escala de estrés bioclimático de los pisos de vegetación.

Nivel de estrés bioclimático	Rango
Muy leve	$E_h \leq 0,05$
Leve	$0,05 < ET \leq 0,1$
Bajo	$0,1 < ET \leq 0,2$
Moderado	$0,2 < ET \leq 0,4$
Alto	$0,4 < ET \leq 0,6$
Muy alto	$0,6 < ET \leq 0,8$
Extremadamente alto	$ET > 0,8$



Se estima que para los escenarios 2030 y 2050 en la zona de régimen semiárido de Chile sólo se encontrarían dos de las categorías de estrés presentadas en la tabla, moderado y alto (figura 4.6).

El estrés bioclimático integrado aumentaría significativamente desde

el escenario 2030 al escenario 2050 (figura 4.5). En el caso de pisos, como el herbazal tropical andino de *Chaetantheras phaeroidalis* (piso 118) o el bosque espinoso mediterráneo costero de *Acacia caven* y *Maytenus boaria* (piso 34), continuarían con un estrés bioclimático bajo en ambos escenarios. Sin embargo,

en muchos otros casos como el bosque esclerófilo mediterráneo costero de *Lithrea caustica* y *Cryptocarya alba* (piso 40) o el bosque espinoso mediterráneo interior de *Acacia caven* y *Prosopis chilensis* (piso 32), pasarían de tener un estrés bioclimático moderado en el 2030 a un estrés bioclimático alto en el 2050.

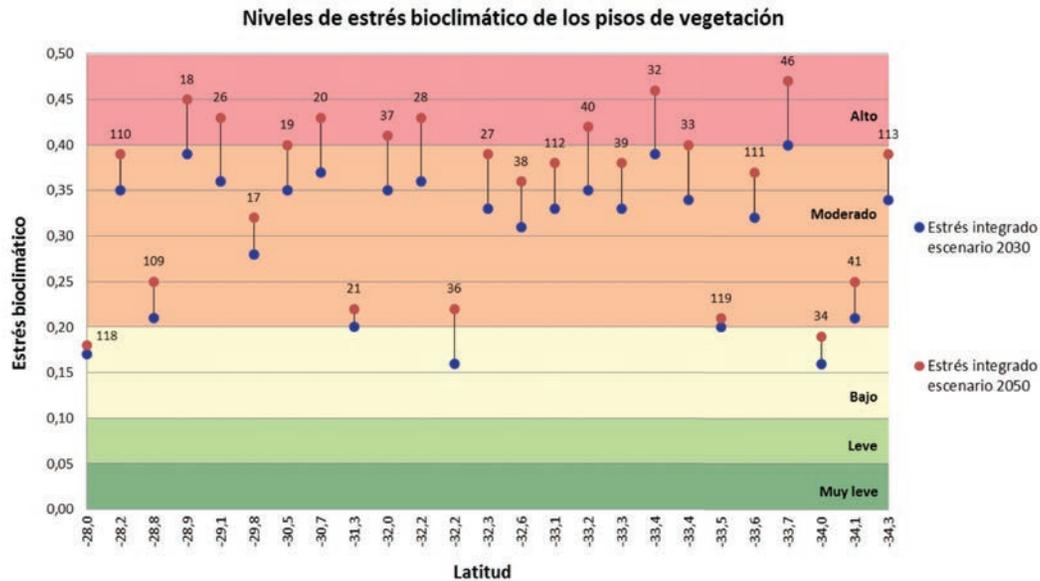


Figura 4.5. Niveles de estrés bioclimático de los pisos de vegetación de la zona semiárida en los escenarios 2030 y 2050.

En general, la zona semiárida del país podría verse afectada por altos niveles de estrés bioclimático. Los pisos de vegetación más afectados por las variaciones esperadas del clima en la zona semiárida corresponderían a ecosistemas costeros, especialmente aquellos situados entre la desembocadura del río Limarí y la del río Aconcagua, y los ecosistemas situados al sur de su distribución, administrativamente en la Región Metropolitana. Dentro de los ecosistemas costeros con mayor grado de estrés bioclimático se encontrarían el matorral arborescente esclerófilo mediterráneo costero de *Peumus boldus* y *Schinus latifolius* (piso 36), el matorral desértico mediterráneo costero de *Bahia ambrosioides* y *Puya chilensis* (piso 21), el matorral bajo mediterráneo costero de *Chuquiraga oppositifolia* y *Mu-*

linum spinosum (piso 111), el bosque espinoso mediterráneo costero de *Acacia Caven* y *Maytenus boaria* (piso 34) y el bosque caducifolio mediterráneo costero de *Nothofagus macrocarpa* y *Ribes punctatum* (piso 46). Otros pisos vulnerables serían

el bosque espinoso mediterráneo andino de *Acacia caven* y *Baccharis paniculata* (piso 33) y el bosque esclerófilo mediterráneo andino de *Quillaja saponaria* y *Lithrea caustica* (piso 41), situados principalmente en la Región Metropolitana.





ESTRÉS BIOCLIMÁTICO CAUSADO POR VARIACIONES DE TEMPERATURA Y ARIDEZ

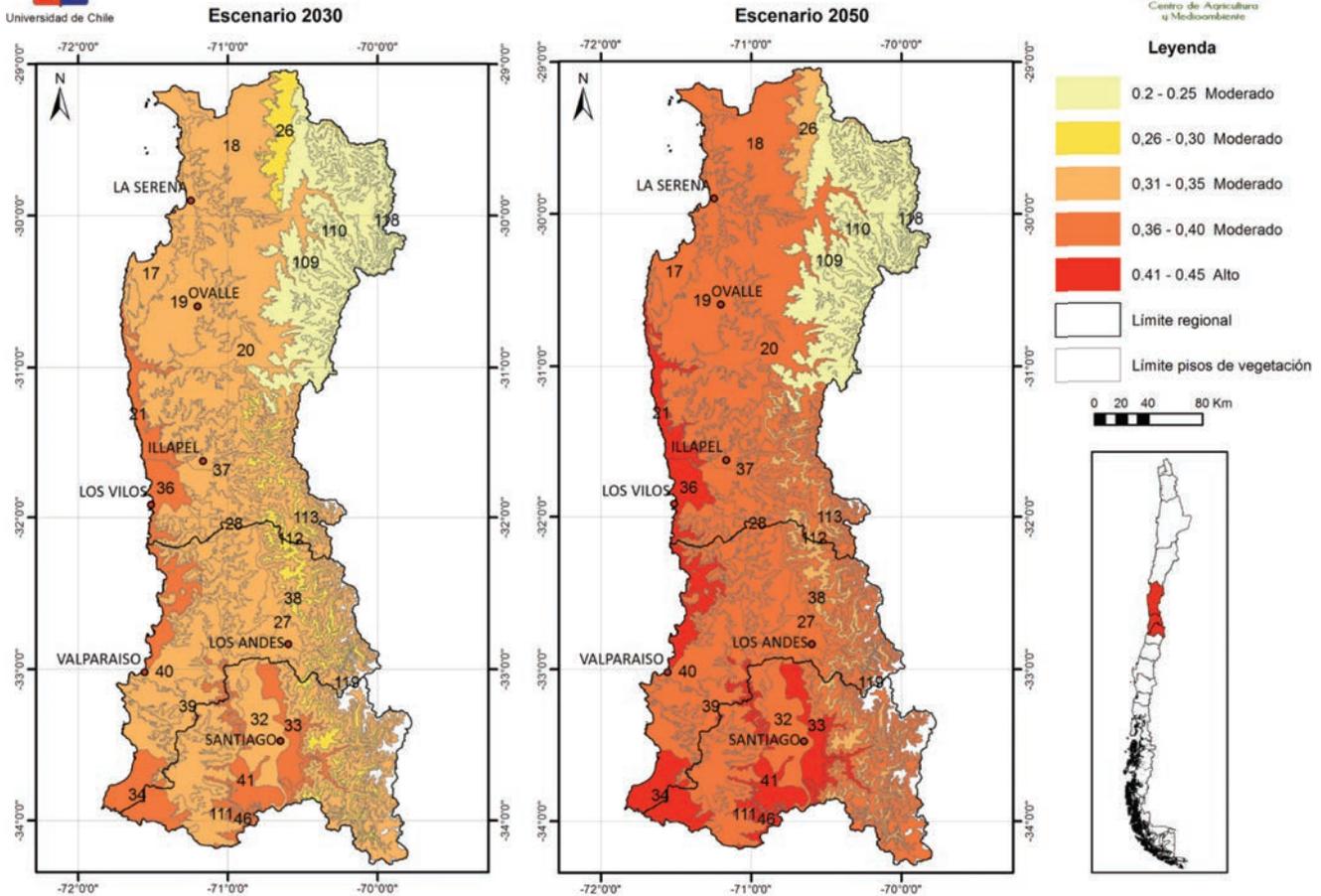


Figura 4.6. Cartografía del estrés bioclimático integrado de los pisos de vegetación de la zona de régimen semiárido de Chile.

Comentario Final

La región de climas áridos y semiáridos de Chile se encuentra dentro de las áreas de alta vulnerabilidad frente al fenómeno de cambio climático, como consecuencia de conformar el borde del desierto de Atacama, el más árido del mundo. De acuerdo con los modelos globales de cambio climático, los bordes de los desiertos intensificarán su grado de aridez, debido básicamente al aumento de la actividad anticiclónica como consecuencia del ca-

lentamiento de la atmósfera. Entre las alteraciones que podrían esperarse se encuentran la importante disminución de las precipitaciones, el aumento de las temperaturas especialmente en las zonas cordillera-nas por sobre los 2000 m, el aumento de las temperaturas máximas en zonas interiores y disminución en las zonas costeras. Esta amenaza climática de gran magnitud tiende a coincidir además con la zona mayormente amenazada por interven-

ción antrópica, dada su alta densidad de población y su bajo nivel de cobertura protegida.

El estrés bioclimático se iría intensificando en el futuro, desencadenando importantes problemas de conservación de la biodiversidad, lo que potencialmente puede afectar al patrimonio natural, al paisaje, la hidrología e incluso los equilibrios biológicos que afectan a la agricultura regional.

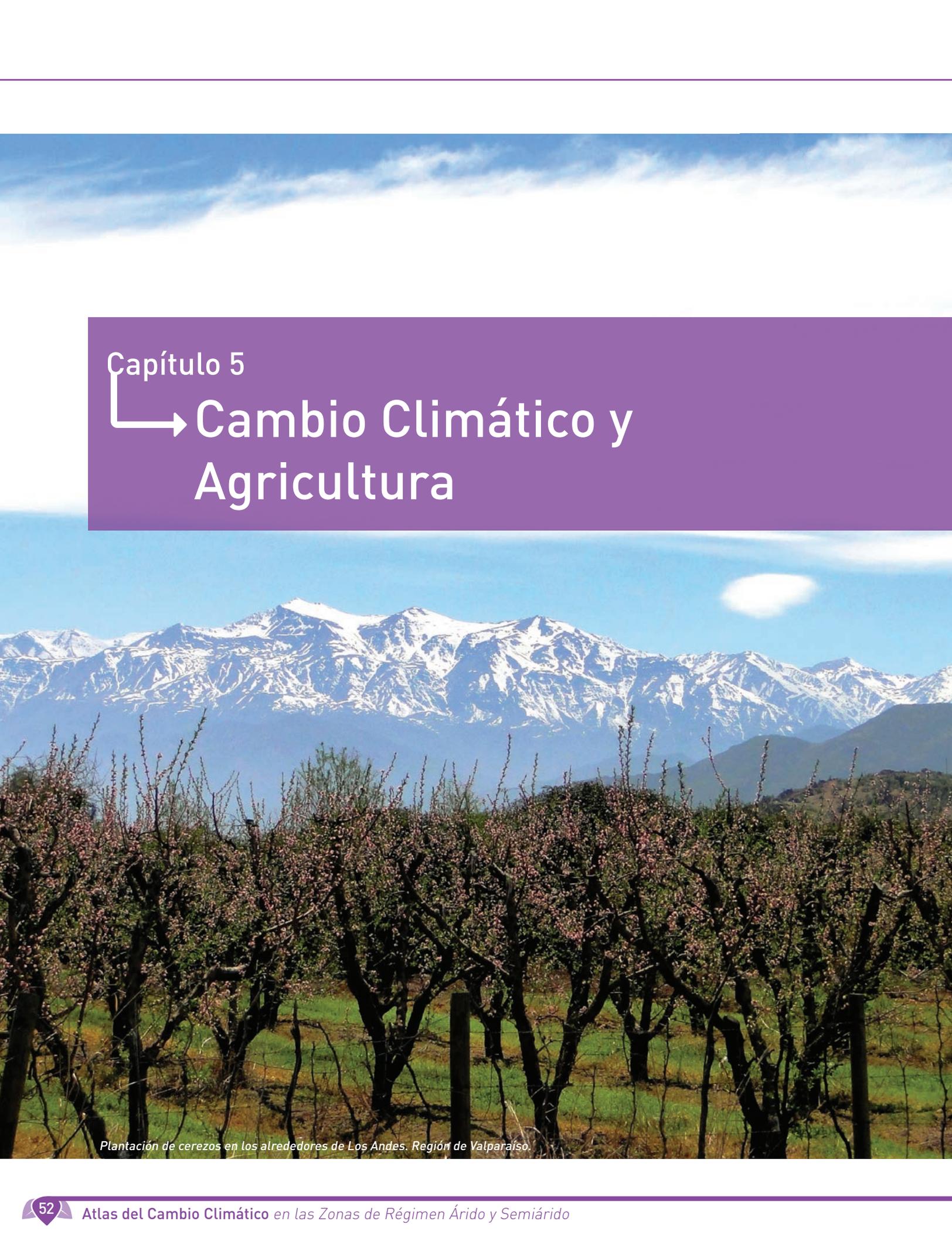
➔ Referencias Bibliográficas

- ♦ IPCC. 2007. In: Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; Van der Linden, P.J.; and Hanson, C.E., *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- ♦ Lee Hannah, Guy Midgley, Sandy Andelman, Miguel Araújo, Greg Hughes, Enrique Martinez-Meyer, Richard Pearson, and Paul Williams. 2007. Protected area needs in a changing climate, *Front Ecol Environ* 2007; 5(3): 131–138.
- ♦ Luebert, F. & P. Plischoff. 2006. *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago. 316 pp.
- ♦ Turner, N. y P. Kramer. 1980. *Adaptation of Plant to Water and High Temperature stress*. John Willey & Sons New York 481 pp.
- ♦ Vennetier M. 2010. *Climate Change Impact on Vegetation: Lessons from an Exceptionally Hot and Dry Decade in South-Eastern France*, *Climate Change and Variability*, Suzanne Simard (Ed.), ISBN: 978-953-307.



Embalse Culimo, Valle del Quilimarí. Región de Coquimbo.





Capítulo 5

→ Cambio Climático y
Agricultura

Plantación de cerezos en los alrededores de Los Andes. Región de Valparaíso.

Introducción

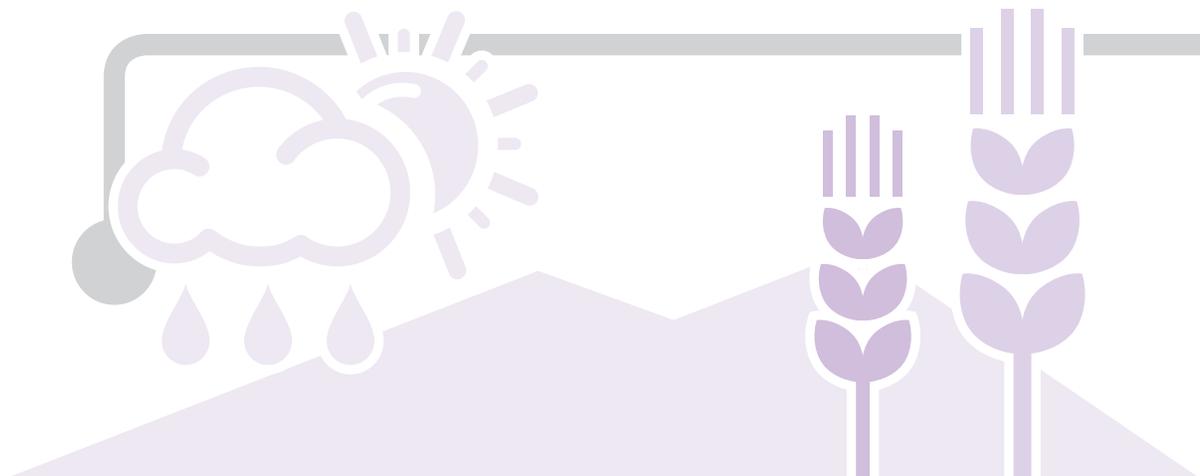
➔ Un aumento aunque leve de la temperatura (1 a 2°C) en climas templados cálidos, puede provocar caídas en los rendimientos de los cultivos debido al aumento de los niveles de estrés térmico y al acortamiento de los ciclos de vida de las plantas. El mismo aumento en climas templados fríos, podría tener efectos más bien benéficos al mejorar las condiciones de crecimiento para las especies cultivadas (WMO/UNEP, 2007). Una proyección realizada en Asia y África por el IPCC (2007) estima que un aumento de 2°C en la temperatura puede conducir a una disminución de un 20-40% en el rendimiento de cereales. El mismo estudio proyecta que los aumentos en las frecuencias de las sequías podrían afectar a la producción local de cultivos de manera negativa, especialmente en los cultivos de subsistencia. El desarrollo e introducción de variedades más adaptadas al estrés térmico y cambios en las fechas de siembra, más temprano por lo general, deberían permitir que los rendimien-

tos de los cereales se mantengan en los niveles actuales o aumenten frente a aumentos modestos en las temperaturas, los que podrían ser compensados con cambios en el calendario de siembra (WMO/UNEP, 2007).

La actual concentración atmosférica de CO₂ de 380 ppm, podría duplicarse hacia finales de este siglo e incluso algunos científicos opinan que la concentración atmosférica de CO₂ para entonces podría superar las 1000 ppm (Bazzaz, 1998). Diversos experimentos, desarrollados en atmósferas controladas, han mostrado que incrementos en la concentración de CO₂ pueden impactar el crecimiento y desarrollo de los cultivos de diferentes maneras. En principio, los niveles más elevados de CO₂ deberían estimular la fotosíntesis en determinadas plantas, particularmente en las llamadas especies C3, debido a que el incremento del dióxido de carbono tiende a suprimir la fotorespiración (Kimball et al., 1995). Los experimentos

basados en un aumento del 50% de las concentraciones actuales de CO₂ han confirmado que la fertilización con CO₂ podría aumentar la producción media de cultivos C3 en un 15% en condiciones óptimas. Los cultivos C4, que incluyen a los cultivos tropicales como el maíz, la caña de azúcar y el sorgo, no han mostrado una respuesta directa entre el aumento del CO₂ y la actividad fotosintética. A pesar de estos efectos positivos del CO₂, ellos no serían suficientes para compensar la caída en los rendimientos provocada por el estrés térmico y el acortamiento de los ciclos de vida.

Considerando la complejidad de los efectos del clima sobre las plantas, es difícil proyectar si un cambio en cualquiera variable del clima afectará positiva o negativamente al crecimiento y desarrollo de las plantas. Por lo anterior, se requiere elaborar modelos que aborden la relación clima planta en toda su complejidad, aunque ello implique hacer simplificaciones importantes.



→ Mecanismos Climáticos en la Producción de Cultivos

La productividad de un cultivo es el resultado de la acción e interacción de una gran diversidad de factores climáticos que operan durante el ciclo de vida. En ciertos casos estos se combinan positivamente favoreciendo el rendimiento, pero en

otros, se producen combinaciones que potencian su efecto negativo sobre la producción. Las interacciones negativas más frecuentes son la sequía con el estrés por altas temperaturas, la excesiva nubosidad con temperaturas bajas, la excesiva

precipitación a la madurez con elevadas temperaturas, lo que provoca grandes problemas sanitarios. A continuación revisaremos algunos de los mayores factores de estrés climático.

→ Estrés por Altas Temperaturas

La temperatura óptima para la fotosíntesis varía entre 15 y 25°C en cultivos de zonas templadas (Santibáñez, 1994). La fotosíntesis disminuye fuertemente desde los 30 a los 40°C (Mathur et al 2011). Esta disminución está asociada a daños en las membranas, aceleración de las tasas respiratorias y dificultades en la división celular debidas a la deshidratación. Si estas elevadas temperaturas se asocian además con altas tasas de radiación solar, ello puede gatillar una fotoinhibición del sistema fotosintético (Sinsawat et al.,2004). En un principio esta fotoinhibición es reversible, pero los daños pueden ser irreversibles si la duración de las altas temperaturas es prolongada o si la temperatura de las hojas excede de 45°C, llegando así en los casos extremos a la muerte de los tejidos, debido a la desnaturalización de importantes proteínas del citoplasma. (Crafts-Brandnery y Salvucci, 2000).

El déficit hídrico puede acentuar el efecto detrimental de las elevadas temperaturas. Con abastecimiento hídrico adecuado las hojas transpiran a nivel máximo, lo que mantiene la temperatura de las hojas 1° o 2°C por debajo de la temperatura del aire, previniendo el daño a los tejidos. Si la transpiración se reduce a causa de un cierre parcial de los estomas, la temperatura de la hoja puede llegar a ser de 2° a 3°C superior a la temperatura del aire y si el cierre de los estomas es total, la temperatura de la hoja puede ser hasta 10°C más alta que la temperatura del aire (Squire, 1990). En algunas zonas semiáridas y desérticas, las altas temperaturas del suelo pueden afectar a las raíces. Cuando las raíces de las plantas juveniles se exponen por varias horas del día a temperaturas de más de 45°C, se estimula la producción de hormonas, especialmente ácido abscísico, lo que restringe la producción de

clorofila, reduciendo la actividad fotosintética en los vástagos (Paulsen, 1994).

Un efecto importante de la temperatura sobre los rendimientos es su rol regulador de la longitud del ciclo de vida. Cuanto mayor es el ciclo del cultivo, más radiación es interceptada y mayores serán las posibilidades de generar un rendimiento importante. El largo óptimo del ciclo se logra normalmente con temperaturas ligeramente por debajo (en 2 a 3°C) de las temperaturas óptimas fisiológicas de crecimiento (Santibáñez, 1994). Por esta razón, en áreas templadas con días largos y noches relativamente frescas el potencial de rendimiento de especies de clima templado, es considerablemente mayor que en áreas tropicales.

→ Estrés por Bajas Temperaturas

Las bajas temperaturas reducen fuertemente la capacidad fotosintética y la capacidad de las hojas para intercambiar carbono (Nie et al, 2002). El frío afecta mayormente a las propiedades fisicoquímicas de las membranas (Momcilovic y Ristic, 2006; Tollenaar, McCullough y Dwyer, 1993), afectando con ello el

traspaso de agua y nutrientes entre los tejidos. En cultivos C4, más sensibles a las bajas temperaturas, si éstas se mantienen por debajo de los 10°C durante unas 36 horas se genera un daño irreversible sobre el sistema fotosintético, especialmente bajo condiciones de elevada luminosidad (Miedema, 1982). A menudo

los daños reversibles de las bajas temperaturas moderadas (cortos periodos bajo 10°C o periodos mayores entre 10 y 15°C) producen un desgaste energético con el consecuente costo productivo. Por otra parte, estas temperaturas afectan considerablemente a la extensión de las raíces y, por esta vía, a la ca-

pacidad de las plantas de absorber agua. Por lo anterior, luego de periodos fríos, las plantas pueden perder turgencia (Aloni y Griffith, 1991). Las temperaturas dentro del rango dañino suelen ocurrir al inicio del cultivo. Las heladas o temperaturas por debajo de 0°C son muy mal toleradas en esta etapa dada la limitada capacidad de los cultivos en

esta fase para reponer puntos de crecimiento. Aun así, el momento en que las bajas temperaturas son más peligrosas, es el periodo de fructificación, por cuanto los órganos reproductivos y los frutos pequeños son altamente sensibles a las temperaturas congelantes, a la vez que una reducción del área foliar durante el desarrollo de los frutos,

reduce proporcionalmente los rendimientos. El frío limita además el rendimiento, debido a que la capacidad de las plantas para traslocar carbohidratos hacia los granos se reduce fuertemente por debajo de un cierto umbral, bajo 15°C en maíz y bajo 10°C en el caso del trigo (Eagles y Lothrop, 1994; Hay y Delécolle, 1989).

→ Estrés por Sequía

El estrés hídrico afecta al crecimiento por dos vías. La primera es por reducción de la fotosíntesis tanto por limitaciones en la apertura de los estomas o por limitaciones bioquímicas (Efeoglu et al., 2009) y, la segunda es por reducción del turgor necesario para la división celular. Un déficit hídrico prolongado estimula la producción de ácido abscísico, el cual actúa como bloqueador de la fotosíntesis (Deng et al 2009; Vallabhaneni y Wurtzel 2010). Diferentes cultivos tienen diferente tolerancia a la sequía, lo que está primariamente asociado a la mantención de bajos niveles de ácido abscísico en las hojas (Aroca et al 2003).

→ Cambios en las Principales Variables Agroclimáticas

Para el escenario climático al año 2050, las temperaturas muestran aumentos en todas las regiones. Las temperaturas máximas del mes más cálido aumentarían entre 1,5° a 2,7°C, siendo más acentuado hacia la cordillera (Figura 5.1). En las zonas costeras y valles con influencia marina, es donde se esperan los menores aumentos en las temperaturas. Como consecuencia de la fuerte interacción océano continente que ocurre durante las horas del día, la que se expresa a través de los brisas de mar, se produce una atenuación del calentamiento en las franjas costeras. En las temperaturas mínimas este efecto no opera, por cuanto la interacción océano continente es considerablemente inferior a la del día. Las temperaturas mínimas del mes más frío presentan aumentos entre 2 y 2,5°C, siendo más acentuados hacia las regiones andinas y disminuyendo hacia la costa (ver mapa en anexos).

La acumulación de días grado (base 10°C) aumentaría en todo el país, especialmente en la Región de Co-

quimbo en donde se produce una homogeneización entre la costa y el Valle Central, pasando de 1800 – 2500 días grados en la actualidad a 2500 – 3000 días grado en el escenario RCP 8.5 año 2050. En la región de Valparaíso y Metropolitana el aumento es más marcado en el Valle Central, con valores que alcanzan los 3000 días grado, manteniéndose una franja costera y precordillera más fresca entre los 1800 y 2500 días grado.

Las horas de frío se reducen drásticamente en todo el país. La zona central presentaría una disminución de 60 a 70%. En Santiago por ejemplo, las horas de frío se reducirían de 980 a 300. Se espera que la actual zona climática (en relación a su régimen térmico) correspondiente a las regiones Metropolitana y de Valparaíso, se encuentre en un futuro en la región de La Araucanía.

La precipitación disminuiría en torno a un 20% hacia mediados de siglo en la zona árida y semiárida, lo que junto a un aumento generalizado

en las temperaturas, modificaría el régimen de aridez, desplazando los actuales límites hacia el sur y provocando una aridización en toda la zona central del país.



Una de las mayores paradojas del calentamiento global, es que las áreas sujetas a fuerte influencia anticiclónica en el mundo, podrían observar un incremento en los episodios de heladas de origen polar o advectivo. Esto se debería al anómalo desplazamiento de los anticiclones hacia el polo, trayendo aire polar a las latitudes medias. Estos fenómenos no son bien predichos por los modelos climáticos globales actualmente disponibles, razón por la que es difícil hacer una proyección del curso que podría tomar la frecuencia e intensidad de las heladas polares en la zona central de Chile.

Tabla 5.1. Cambios esperados en el régimen térmico. TXE_LB: temperatura máxima de enero en la línea base (1980 – 2010). TXE_2050: Temperatura máxima de enero para el año 2050. TNE: Temperatura mínima de enero. TXJ: Temperatura máxima de julio. TNJ: Temperatura mínima de julio.

LOCALIDADES	TXE_LB	TXE_2050	TNE_LB	TNE_2050	TXJ_LB	TXJ_2050	TNJ_LB	TXJ_2050
LA SERENA	21,6	23,3	14,4	16,1	14,8	16,7	7,5	9,4
MONTE GRANDE	30,9	33,4	11,6	14	17	19,8	3,9	6,6
ANDACOLLO	28,8	30,6	13,1	14,8	18	20,1	6,4	8,6
OVALLE	28,4	30,2	13,5	15,2	17,2	19,3	4,5	6,7
MONTE PATRIA	30	31,9	13,4	15,2	17,4	19,7	4	6,5
PUNITAQUI	26,9	28,7	14,2	16	16,9	19,1	4,8	6,9
COMBARBALA	30,5	32,4	13,2	15,1	19,3	21,5	5,2	7,6
ILLAPEL	27,1	29	12,3	14,1	16,9	18,9	5,4	7,5
SALAMANCA	30,5	32,6	12,1	14,1	18,1	20,5	3,7	6
CUNCUMEN	31,1	33,7	12	14,5	14,9	17,4	4	6,5
LOS VILOS	20,2	21,6	12,4	13,8	13,2	15,2	7	8,7
PETORCA	29,7	31,8	11,9	13,9	17,2	19,5	5,2	7,4
LA LIGUA	26,4	28	9,7	11,3	15,4	17,2	4,1	5,9
SAN FELIPE	30,8	33	11,8	13,8	15,5	17,6	4,7	6,8
LOS ANDES	30,9	33,3	11,8	14,2	14,6	16,7	4,7	6,8
QUILLOTA	26,7	28,3	10,7	12,4	16,9	18,7	4,3	6
VALPARAISO	20,4	21,8	14,2	15,3	14,4	13,3	9,3	11,2
QUILPUE	24,4	25,7	12,2	13,7	15,6	17,3	6,3	8
SAN ANTONIO	20,5	21,8	12,2	13,6	15	16,5	7,1	8,5
SANTIAGO	30,2	32,5	13,3	15,3	15,3	17,4	3,9	6
SAN JOSE DE MAIPO	28	30,6	10,5	13,7	15,8	17,7	2,5	4,6
TALAGANTE	30,1	31,9	12	13,8	15,1	16,9	4,2	6,1

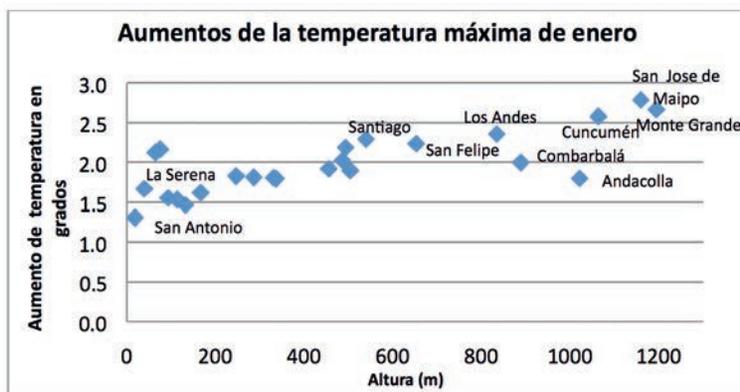


Figura 5.1. Aumentos en la temperatura máxima de enero según altura.

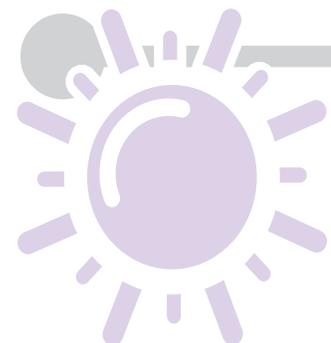


Tabla 5.2. Cambios en la principales variables agroclimáticas para el año 2050.

LOCALIDADES	Precipitación 1980 -2010	Precipitación 2050	Días grado (base 10°C) 1980 -2010	Días grado (base 10°C) 2050
LA SERENA	81	66	1454	1984
MONTE GRANDE	98	83	2039	2748
ANDACOLLO	97	78	2129	2722
OVALLE	138	111	1988	2532
MONTE PATRIA	140	107	2108	2696
PUNITAQUI	154	125	1909	2467
COMBARBALA	209	168	2318	2950
ILLAPEL	210	169	1801	2354
SALAMANCA	237	190	2114	2704
CUNCUMEN	273	228	1963	2619
LOS VILOS	235	190	1064	1486
PETORCA	246	200	2011	2618
LA LIGUA	327	275	1445	1852
SAN FELIPE	231	176	1966	2538
LOS ANDES	275	215	1918	2525
QUILLOTA	348	281	1613	2060
VALPARAISO	401	314	1389	1843
QUILPUE	394	307	1519	1945
SAN ANTONIO	409	289	1188	1578
SANTIAGO	353	289	1980	2558
SAN JOSE DE MAIPO	419	284	1621	2227
TALAGANTE	395	307	1880	2361
MELIPILLA	396	294	1641	2053
ALTO DE JAHUEL	434	342	1891	2447



→ Simulación del Rendimiento de Cultivos

Para evaluar el comportamiento de los cultivos frente a las variaciones del clima, se utilizó el modelo SIMPROC (Simulador de la Productividad de Cultivos) (Santibáñez, 2001), utilizado en la Primera y Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático. El modelo simula el crecimiento y producción de los cultivos, integrando los principales procesos ecofisiológicos y su regulación climática.

Una de las mayores ventajas del modelo SIMPROC frente a otros modelos de cultivos, es que la simulación la realiza de manera iterativa, es decir, el modelo considera todas las fechas de siembra y escoge la fecha que maximice el rendimiento.

Esta iteración permite determinar los posibles desplazamientos en las fechas de siembra que podrían tener los cultivos anuales bajo nuevos

escenarios climáticos. Esto es esencial, por cuanto sería un error evaluar el comportamiento futuro de un cultivo suponiendo que se mantiene la misma fecha de siembra actual. En el caso de las especies frutales lo que representa la mayor movilidad es la fecha de maduración de los frutos.

→ Modelo SIMPROC

El modelo SIMPROC integra en el tiempo las respuestas ecofisiológicas de los cultivos, frente a los estímulos climáticos. El crecimiento es simulado entre la emergencia y la cosecha. A partir de la intercepción de la radiación solar y del área foliar, simula en cada instante la producción fotosintética bruta. Una vez considerados los costos respiratorios se establece el potencial de producción de materia seca, proceso en el que influyen las temperaturas y la disponibilidad de agua en el suelo. Mediante un balance hídrico del suelo se establece el grado de satisfacción de las demandas hídricas del cultivo, lo que a su vez, regula la velocidad del crecimiento. El modelo simula la fenología del cultivo a partir de la acumulación de días grado, variable de base para establecer en todo instante, la edad fisiológica del cultivo. A partir de ésta, se modula el coeficiente de reparto del crecimiento entre los distintos órganos de la planta, así como la sensibilidad de ésta frente a eventos catastróficos como las heladas, el estrés térmico y la sequía.

A continuación se muestra un diagrama simplificado del modelo, donde:

IAF = Índice de área foliar

EF = Eficiencia fotosintética de cada especie

FN = Fotosíntesis neta

FB = Fotosíntesis bruta

Re = Respiración de mantenimiento

Cr = Tasa de crecimiento

HR = Humedad relativa

ET₀ = Evapotranspiración de referencia

ETr = Evapotranspiración real

SD₀ = Suma de días grado de referencia

Tsenh = Tasa de senescencia hojas

Tsent = Tasa de senescencia tallos

Tseng = Tasa de senescencia granos

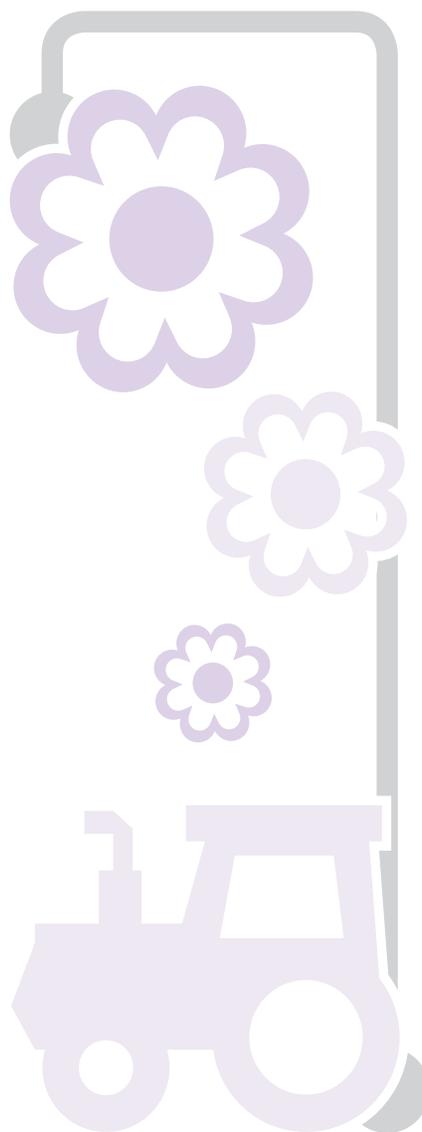
Tsenr = Tasa de senescencia raíces

Tch = Tasa de crecimiento hojas

Tct = Tasa de crecimiento tallos

Tgc = Tasa de crecimiento granos

Tcr = Tasa de crecimiento raíces



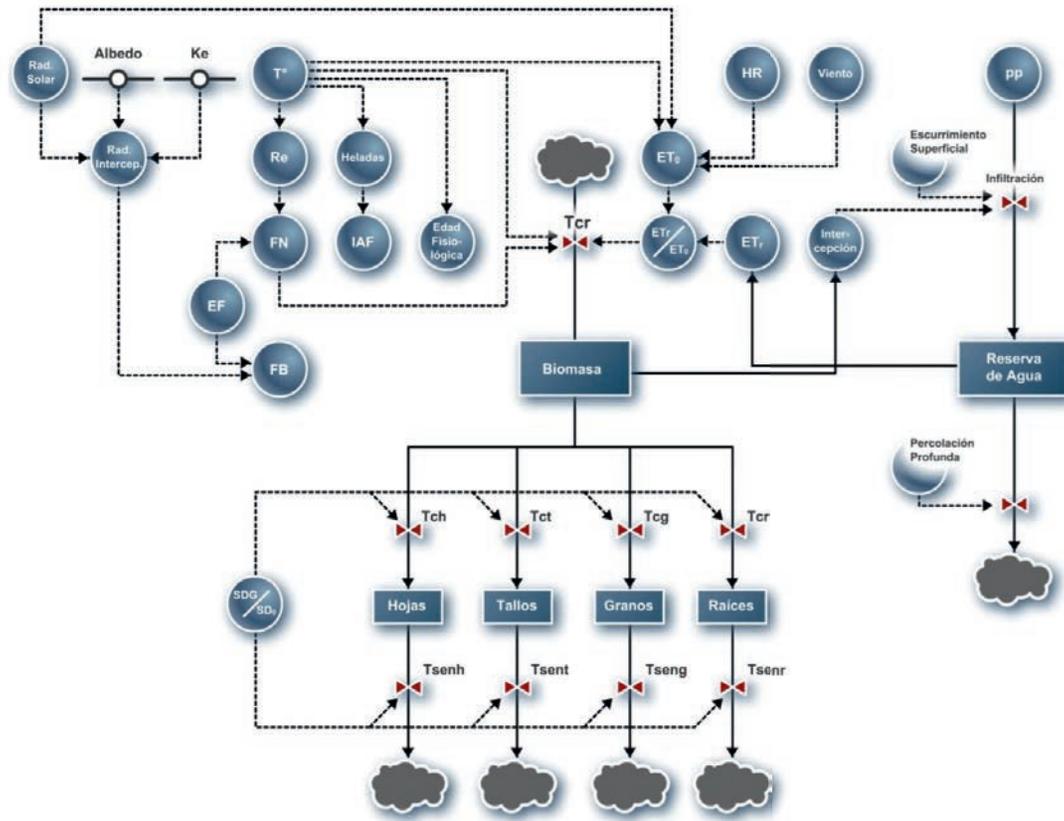


Figura 5.2. Diagrama simplificado del Modelo SIMPROC.

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DEL MAÍZ

➔ Rendimiento

El maíz es un cultivo exigente en temperatura, por lo que el mayor potencial de producción en riego se encuentra en valles interiores de la zona central, especialmente en las zonas interiores más cálidas del territorio, donde los rendimientos se sitúan entre 14 y 17 T/ha, disminuyendo ligeramente hacia las áreas más frescas en la costa, influenciadas por la corriente de Humboldt, y la precordillera de Los Andes, donde el potencial productivo cae a unas 10 Ton/ha.

Para mediados de siglo en el escenario RCP 8.5 el potencial de pro-

ducción se expandiría considerablemente hacia latitudes más altas, con respecto a la situación actual, esto como consecuencia del aumento de las temperaturas que en la actualidad son limitantes para el cultivo. Por el contrario, se aprecia un deterioro del orden del 10 a 20% en el potencial productivo en las regiones actualmente productoras de la zona árida y semiárida, como consecuencia del aumento en los niveles de estrés térmico, especialmente durante el llenado de granos. En algunos valles interiores de la Región de Coquimbo y Valparaíso hasta el paralelo 32°S esta disminu-

ción no es significativa (disminuciones inferiores al 5%) a pesar del aumento del estrés térmico. En estas zonas no hay variaciones significativas en el rendimiento, debido a que las fechas de siembra se desplazan hacia junio y julio. (Figura 5.6). En las zonas interiores del valle central la disminución si es significativa, como se observa en la figura 5.6 en Buin, ya que no es posible desplazar las fechas de siembra más allá de agosto. La costa y precordillera actualmente frescas mejoran considerablemente su potencial productivo, en alrededor de 25%, en respuesta al aumento de las temperaturas.

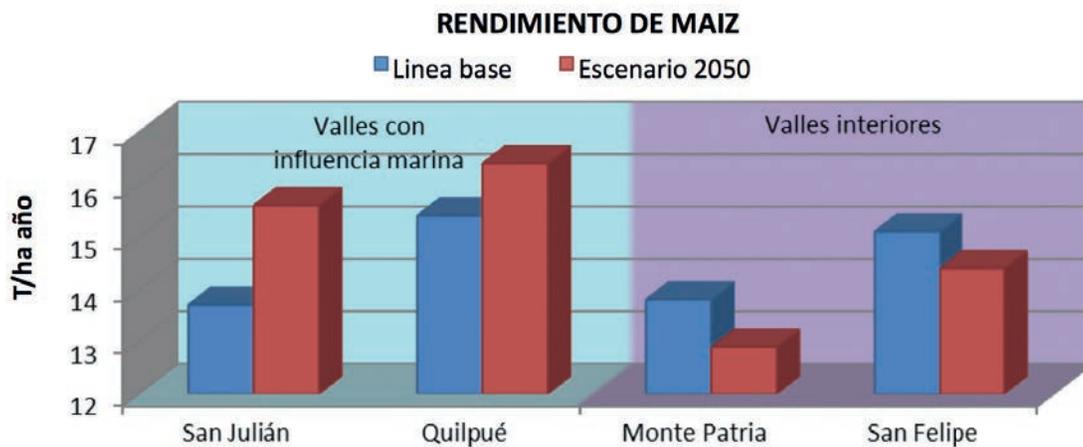


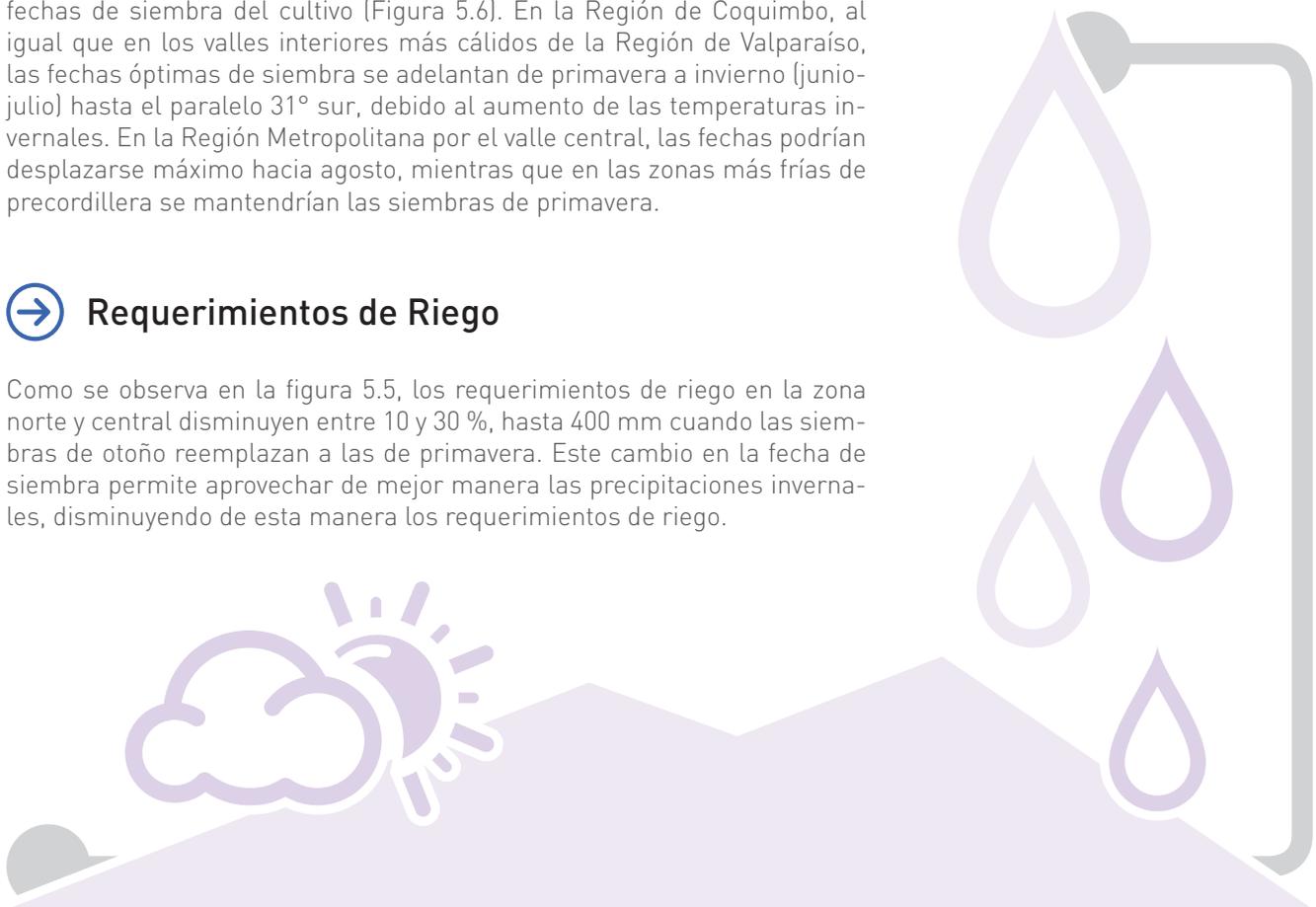
Figura 5.3: Rendimiento del maíz en el escenario línea base (1980-2010) y escenario 2050 en valles con influencia marina (San Julián y Quilpué) y valles interiores (Monte Patria y San Felipe).

→ Estacionalidad de la Siembra

Un aspecto especialmente notable es el significativo desplazamiento de las fechas de siembra del cultivo (Figura 5.6). En la Región de Coquimbo, al igual que en los valles interiores más cálidos de la Región de Valparaíso, las fechas óptimas de siembra se adelantan de primavera a invierno (junio-julio) hasta el paralelo 31° sur, debido al aumento de las temperaturas invernales. En la Región Metropolitana por el valle central, las fechas podrían desplazarse máximo hacia agosto, mientras que en las zonas más frías de precordillera se mantendrían las siembras de primavera.

→ Requerimientos de Riego

Como se observa en la figura 5.5, los requerimientos de riego en la zona norte y central disminuyen entre 10 y 30 %, hasta 400 mm cuando las siembras de otoño reemplazan a las de primavera. Este cambio en la fecha de siembra permite aprovechar de mejor manera las precipitaciones invernales, disminuyendo de esta manera los requerimientos de riego.



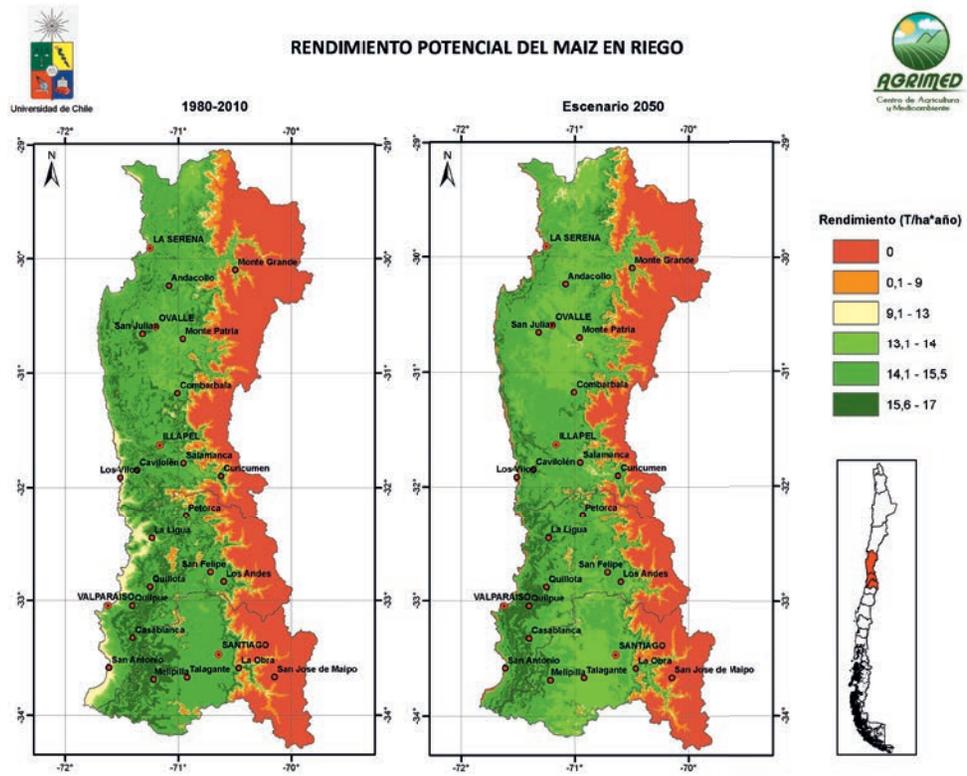


Figura 5.4. Cambio en el rendimiento del maíz en riego entre la línea base (1980 -2010) y escenario 2050 (RCP 8.5).

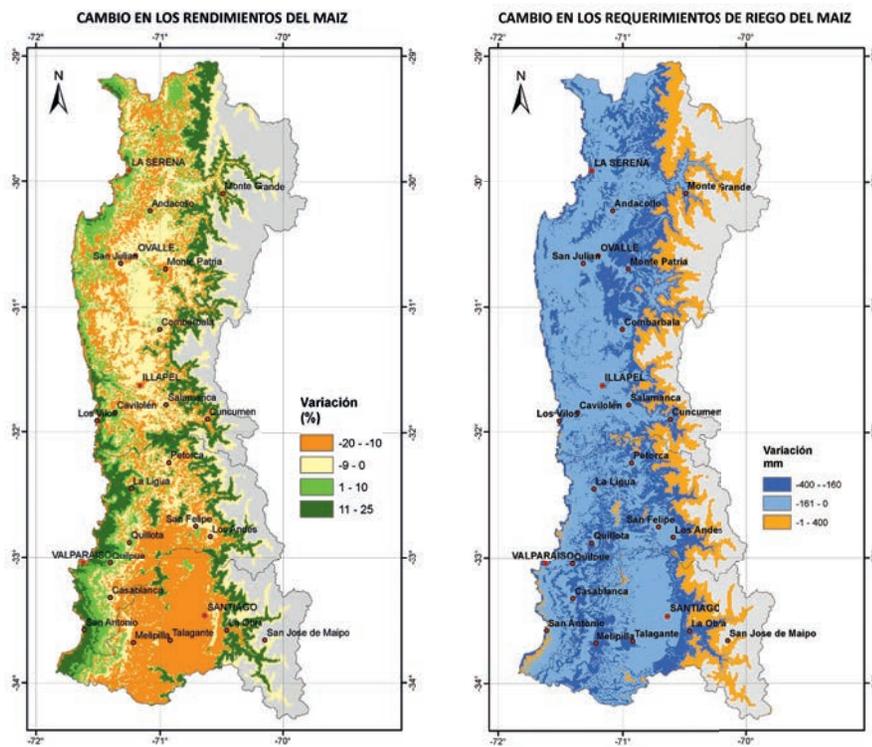


Figura 5.5. Variación en los rendimientos del maíz entre la línea base (1980 -2010) y escenario 2050 (Izquierda). Cambios en los requerimientos de riego (derecha)



Universidad de Chile

MES DE SIEMBRA DEL MAIZ EN RIEGO

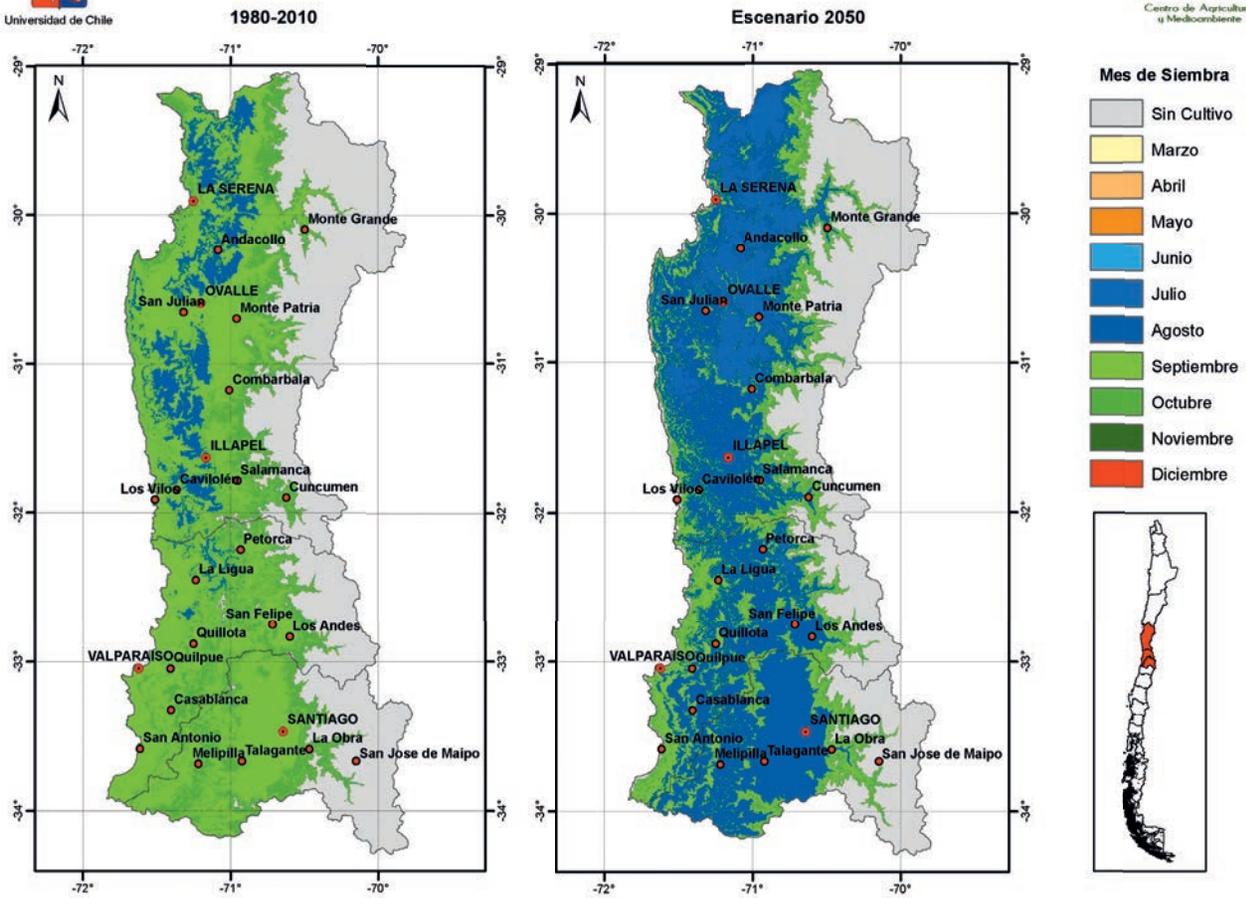


Figura 5.6. Cambios en las fechas óptimas de siembra entre la línea base [1980 -2010] y escenario 2050 [RCP 8.5].

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DEL TRIGO EN RIEGO

➔ Rendimiento

En el escenario climático actual, el potencial de rendimiento es bastante homogéneo, presentando mejores condiciones en la costa y precordillera que en el Valle Central. Por la costa y precordillera los rendimientos se mantienen entre 10 y 12 T/ha año, disminuyendo a 9 T/ha año hacia los valles interiores, debido a las

mayores temperaturas que acortan el ciclo de vida del trigo.

El aumento de las temperaturas asociado al escenario RCP 8.5 reducirá los rendimientos de esta especie en la zona árida y semiárida del país. Las mayores disminuciones se esperan en los valles interiores con

influencia marina entre los paralelos 29 y 30,5°S, donde el rendimiento del trigo podría reducirse entre 20% y un 30%. Entre el río Limarí y el Aconcagua las disminuciones varían entre un 20% y a un 10%, mientras al sur del río Aconcagua la disminución en los rendimientos es inferior al 10%.

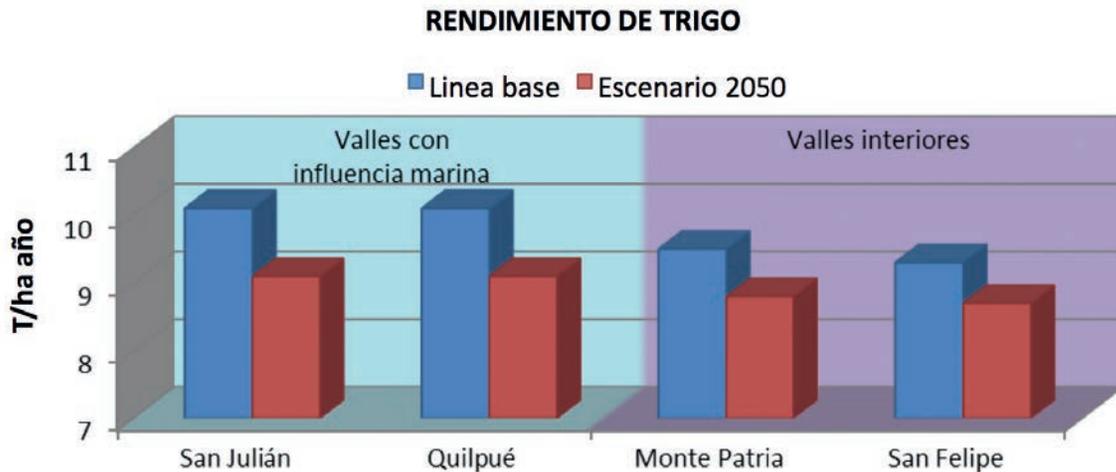


Figura 5.7. Rendimiento potencial del trigo en el escenario actual (1980 – 2010) y escenario futuro 2050 (RCP 8.5).

En el escenario actual, las zonas norte y central exhiben los mayores rendimientos con siembras de otoño, lo que le permite al trigo beneficiarse del clima fresco de invierno durante la mayor parte de su ciclo. En los nuevos escenarios, esta zona no presenta cambios notables en las fechas de siembra, con excepción de las áreas de precordillera donde podrían haber desplazamientos de éstas desde el otoño hacia el invierno.

Los requerimientos de riego tienden a reducirse a pesar de la disminu-

ción de las precipitaciones como consecuencia del acortamiento en el ciclo de vida del trigo. Sólo en algunas áreas de precordillera donde hay aumento o mantención de los rendimientos, existe aumento en los requerimientos de riego.



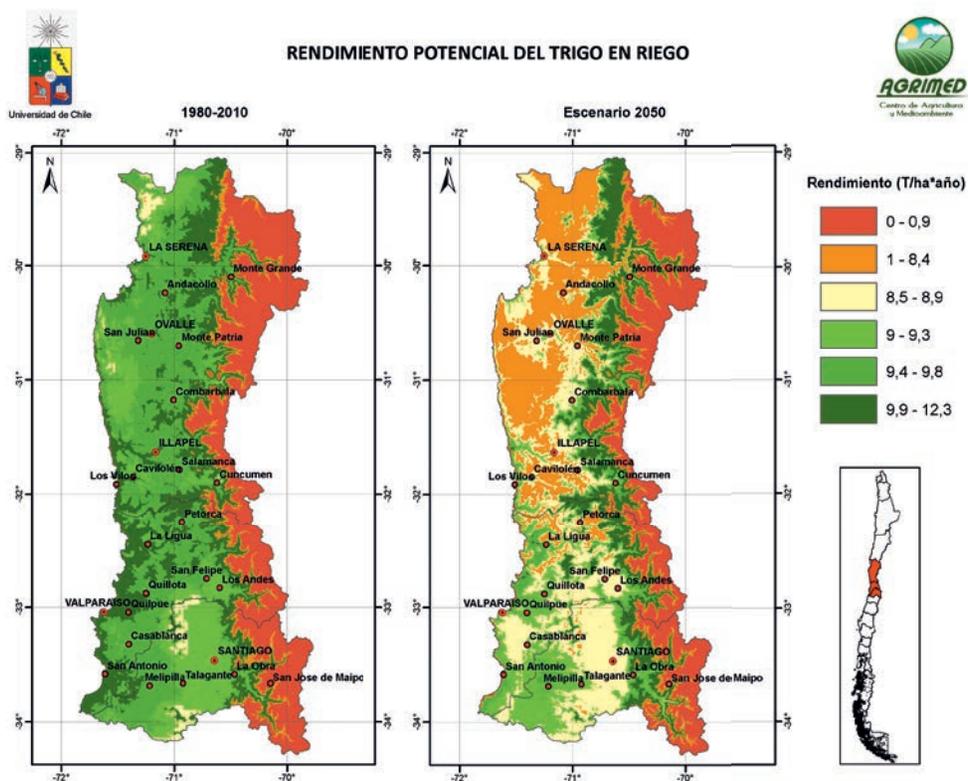


Figura 5.8. Cambio en el rendimiento del trigo en riego entre la línea base (1980 -2010) y escenario 2050 (RCP 8.5).

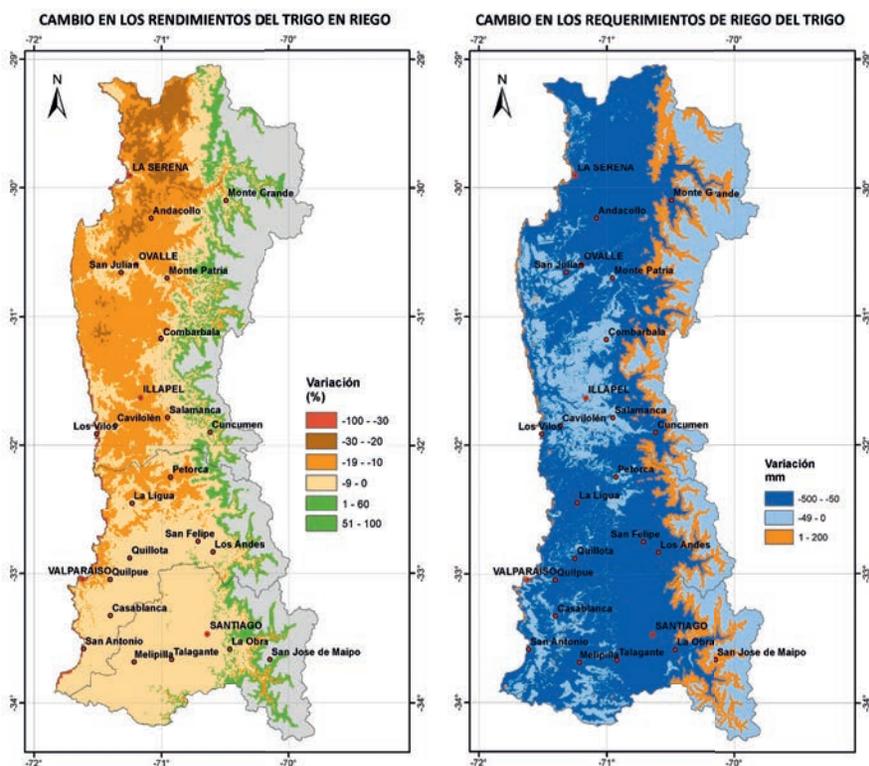


Figura 5.9. Variación en los rendimiento del trigo en riego entre la línea base (1980 -2010) y escenario 2050 (Izquierda). Cambios en los requerimientos de riego (Derecha)

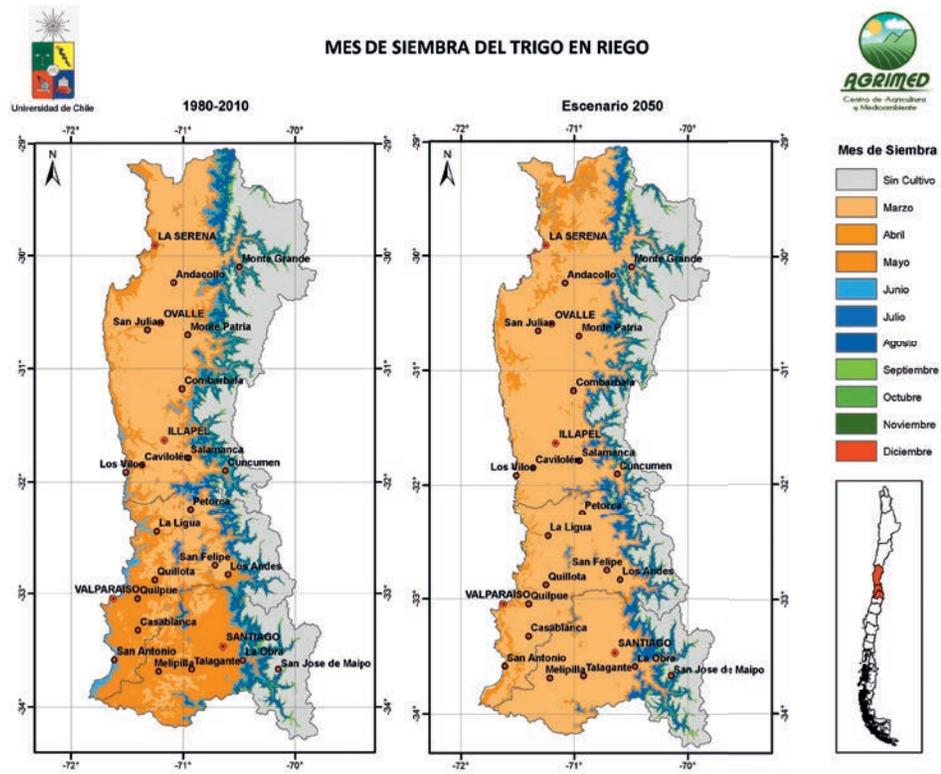


Figura 5.10. Cambios en las fechas óptimas de siembra del trigo en riego entre los escenarios línea base y 2050 [RCP 8.5].

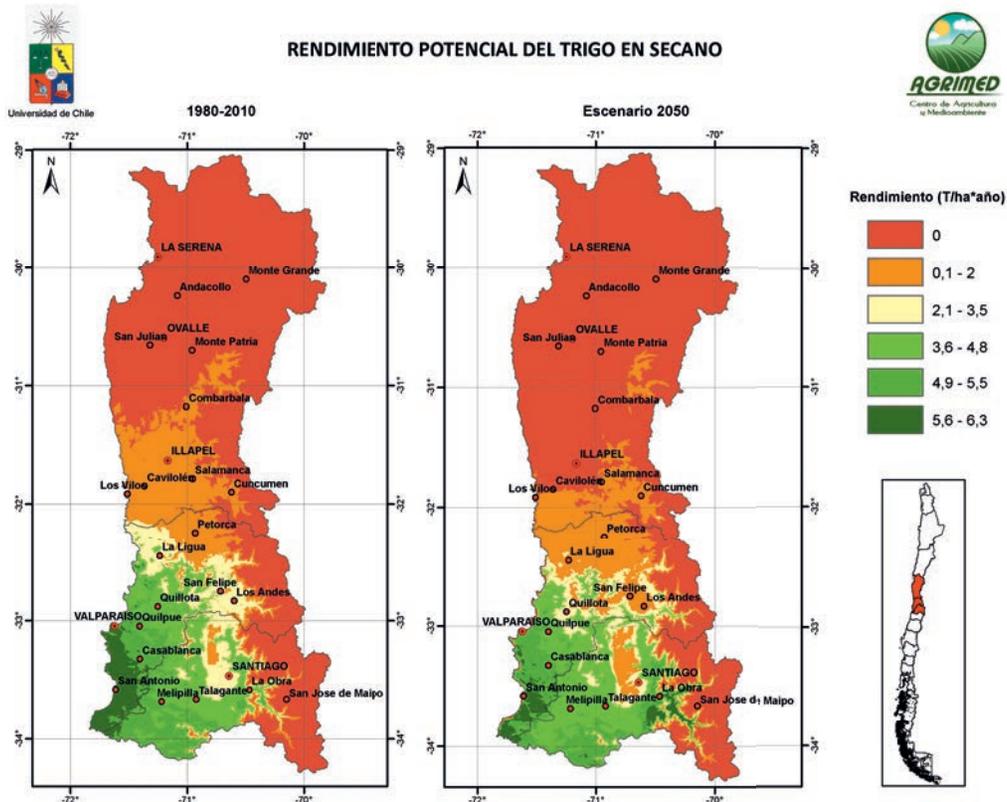


Figura 5.11. Cambios en el rendimiento del trigo en seco entre los escenarios línea base y 2050 [RCP 8.5].

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DE LA PAPA EN RIEGO

➔ Rendimiento

La papa es un cultivo que se beneficia de los climas térmicamente suaves, sin temperaturas diurnas muy elevadas y con noches frescas que estimulan la formación de los tubérculos. Por esta razón, en el escenario actual las mejores condiciones de producción se encuentran en

la costa y en la precordillera, alcanzando rendimientos que superan las 40 toneladas por hectárea al año. La zona costera del norte de Coquimbo presenta una reducción en los rendimientos de entre un 20% y un 30%, como consecuencia del alza en las temperaturas. En el resto de

la Región de Coquimbo y en toda la Región de Valparaíso se espera una disminución en los rendimientos entre un 10% y 20%. En la Región Metropolitana, se esperan disminuciones entre 20% y 30% en la precordillera y entre 10% y 20% en el valle central y zonas costeras.

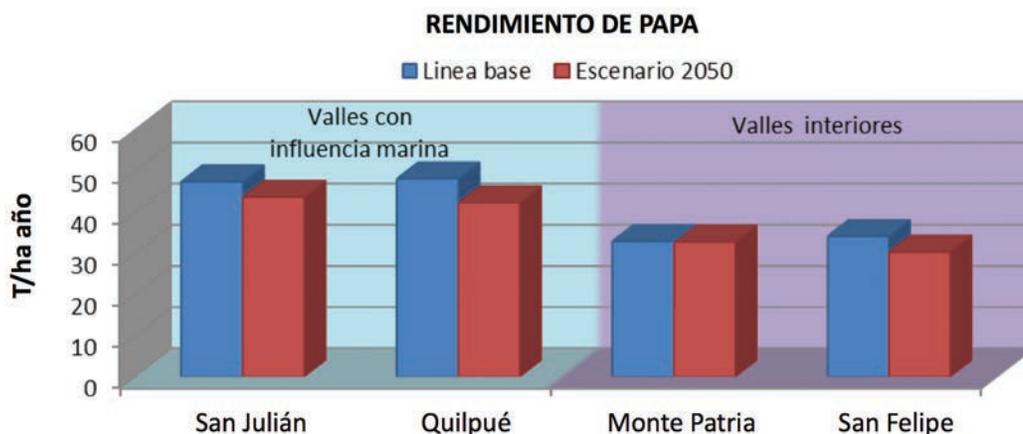


Figura 5.12. Rendimiento potencial de la papa en el escenario actual (1980 – 2010) y escenario futuro 2050 (RCP 8.5).

➔ Estacionalidad de la Siembra

Las siembras óptimas tienden a adelantarse un mes en esta zona. En la Región de Coquimbo y Valparaíso, hasta el paralelo 33°S, se mantienen las fechas de invierno, mientras que en la Región Metropolitana, las fechas de siembra se adelantan de septiembre a agosto.

➔ Requerimientos de Riego

En la zona central los requerimientos de riego disminuyen entre un 10% y un 30%. En zonas de precordillera, en donde aumentan los rendimientos, la necesidad de riego aumentaría en hasta 200%.



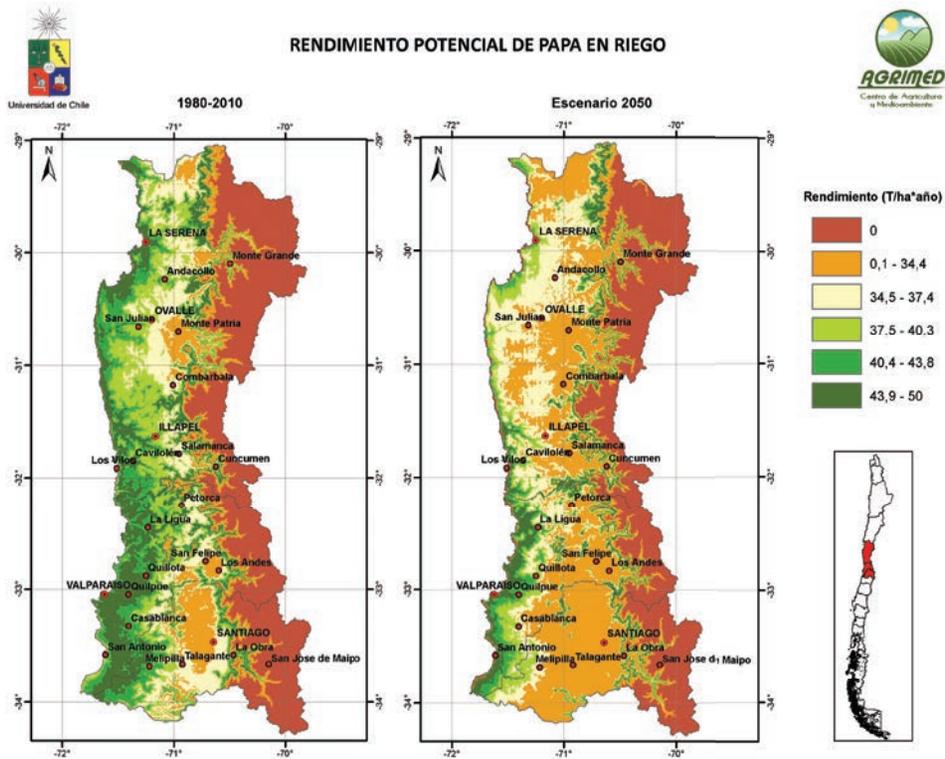


Figura 5.13. Cambios en los rendimientos de la papa en riego entre la línea base (1980 -2010) y escenario 2050 (RCP 8.5).

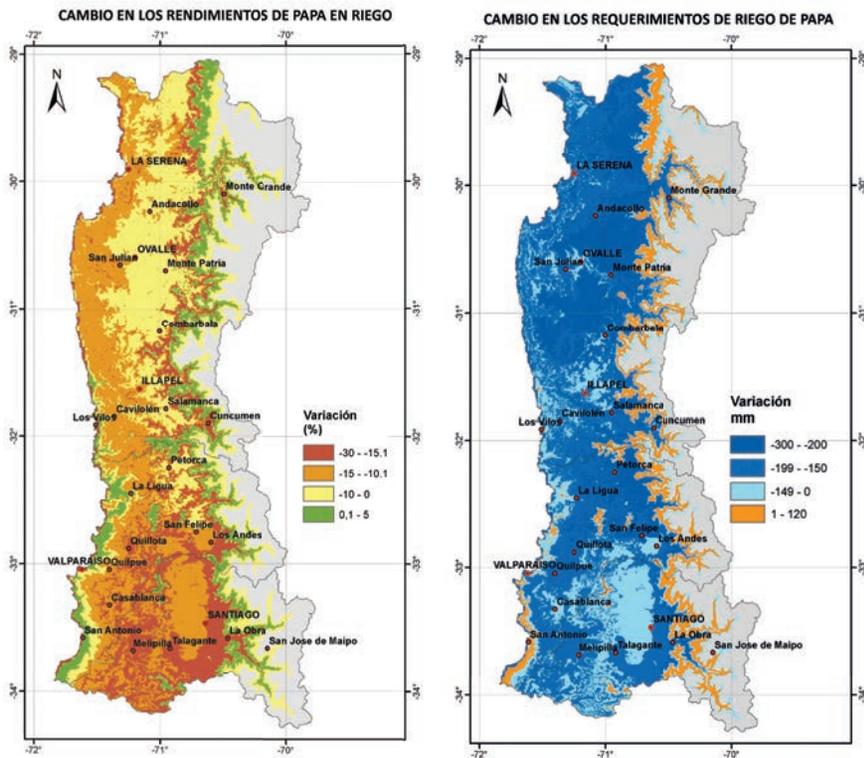


Figura 5.14. Variación en los rendimientos de la papa en riego entre la línea base (1980 -2010) y escenario 2050 (Izquierda). Cambios en los requerimientos de riego (Derecha)



MES DE SIEMBRA DE LA PAPA EN RIEGO

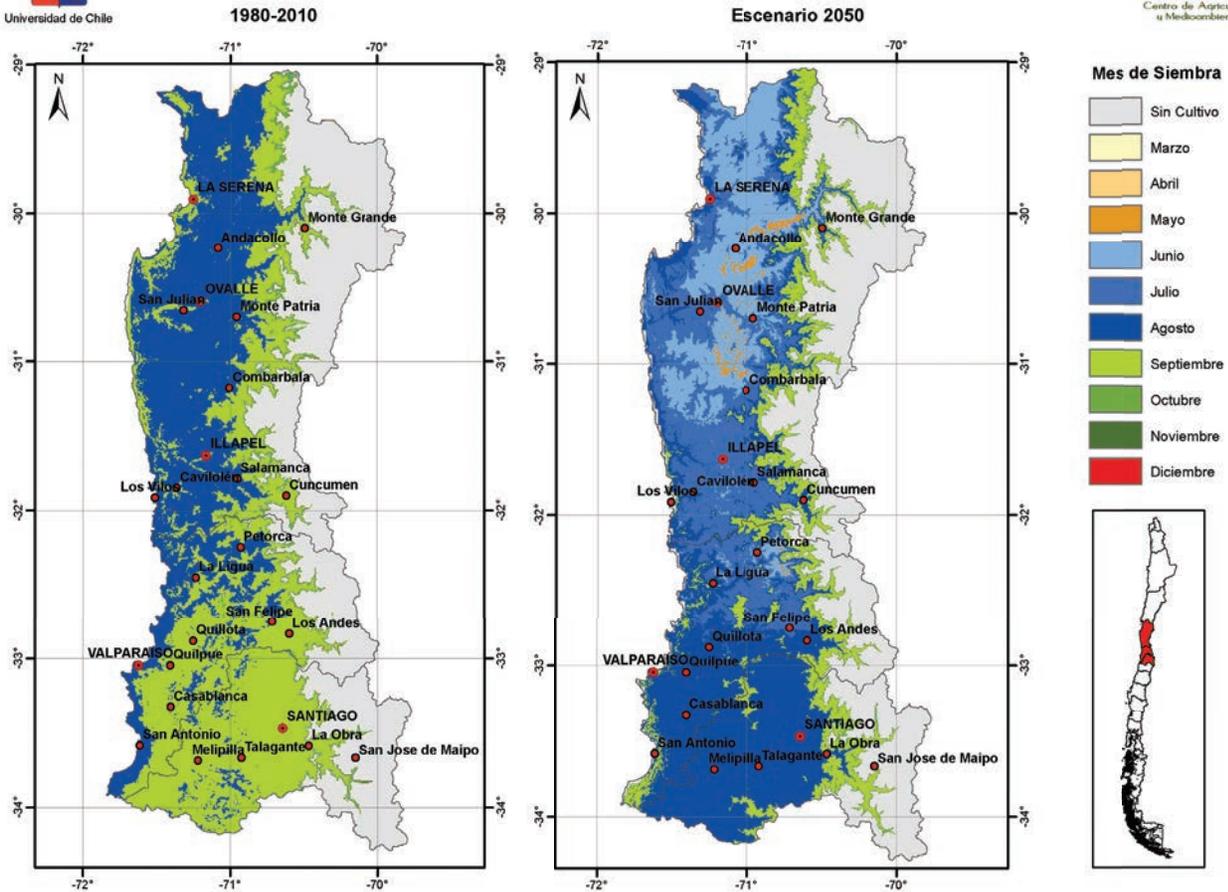


Figura 5.15. Cambios en las fechas óptimas de siembra de la papa en riego entre los escenarios línea base y 2050 (RCP 8.5).

➔ Comportamiento Productivo en Frutales

En el escenario actual, la zona de producción de las vides está entre la Región de Atacama y del Biobío. La zona más productiva se ubica en el valle central entre las regiones de Atacama y el Maule. Desde ese punto hacia el sur las condiciones se deterioran como consecuencia de la disminución de la luminosidad, de la temperatura estival y del aumento de las precipitaciones y las heladas tardías de primavera. En el escenario RCP 8.5 estas limitaciones se trasladan hacia el sur, produciéndose una importante expan-

sión de las zonas productivas. En la zona árida y semiárida, el potencial productivo se mantiene en algunas zonas de precordillera, debido a la atenuación del régimen de heladas hacia estos sectores interiores. Los requerimientos de riego para la vid aumentarían en todo el país. En la zona central se espera un aumento promedio entre 20% a 30 % con respecto a la línea base.

En el caso de los naranjos, las condiciones de producción mejoran en todo el territorio. En la zona Norte el

potencial mejora considerablemente, especialmente en los valles interiores de la Región de Coquimbo. En la precordillera las condiciones mejorarían haciendo viable su cultivo, desde un punto de vista económico, especialmente en condiciones de laderas abrigadas de las heladas. Los requerimientos de riego aumentarían en todo el territorio.



Figura 5.16. Cambios en los requerimientos de riego en vid de mesa.

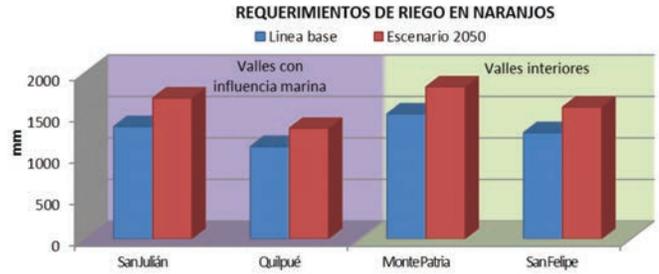


Figura 5.17. Cambios en los requerimientos de riego en naranjos.

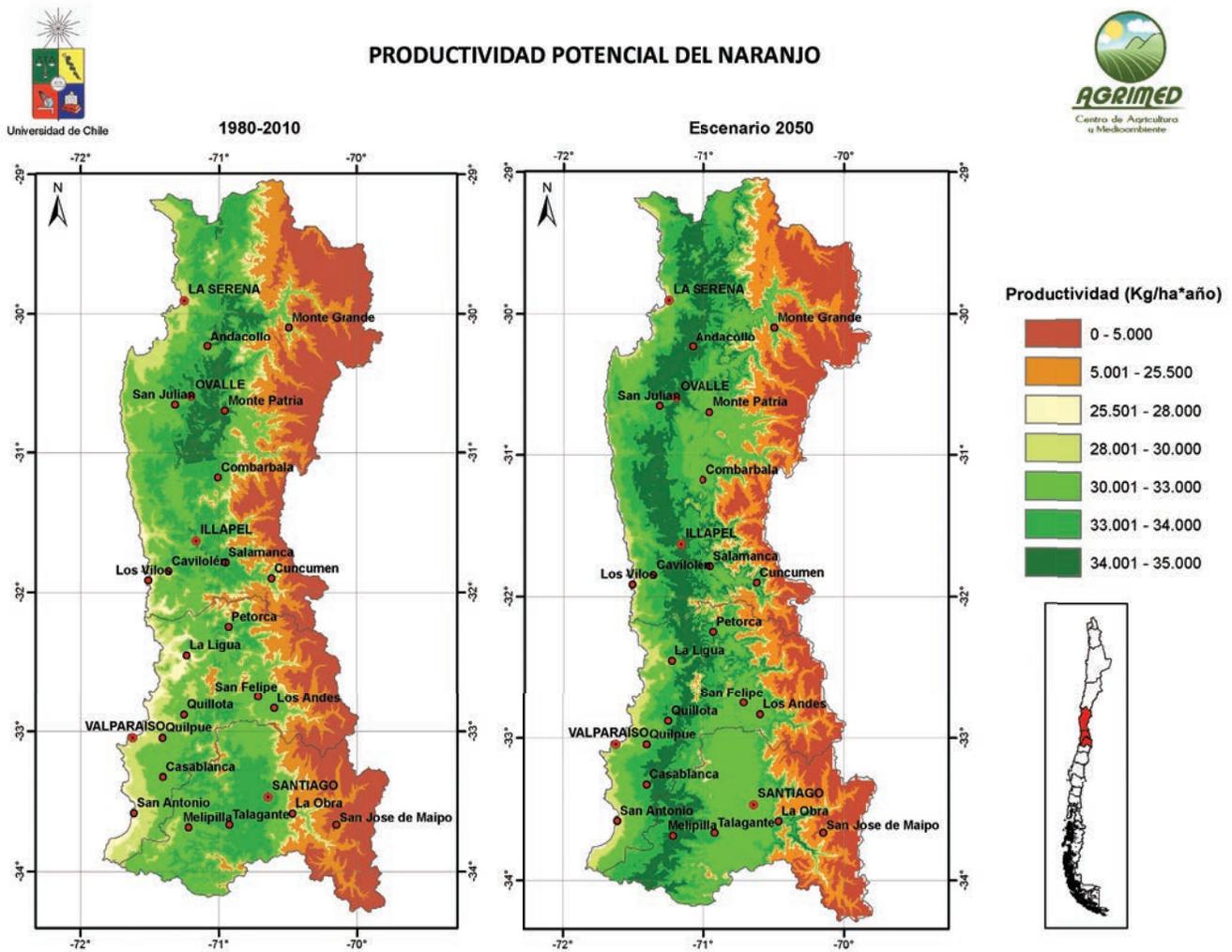


Figura 5.18. Cambios en la productividad potencial de la Vid de mesa entre la línea base y el escenario 2050 (RCP 8.5).

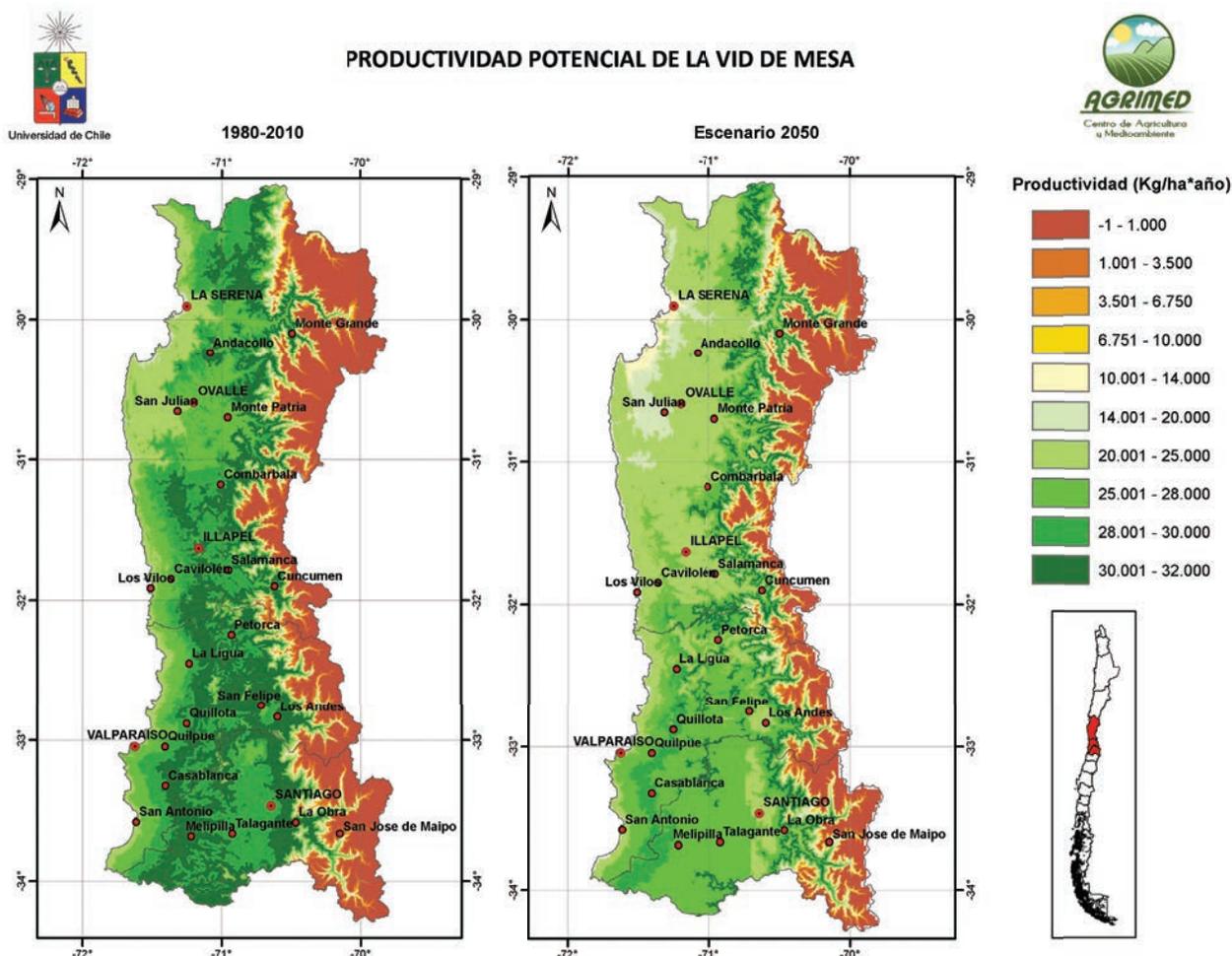


Figura 5.19. Cambios en la productividad potencial del Naranja entre la línea base y el escenario 2050 (RCP 8.5).

➔ Referencias Bibliográficas

- Aloni, R.; Griffith, M. 1991. Xylem in the root:shoot junction of cereals. *Planta*. 184: 123-129.
- Aroca, R.; Vernieri, P.; Irigoyen J.J.; Sánchez-Día, M.; Tognoni F.; Pardossi, A. 2003. Involvement of abscisic acid in leaf and root of maize (*Zea mays* L.) in avoiding chilling-induced water stress. *Plant Science*. 165: 671-679.
- Bazzaz, F.A. 1998. Elevated CO₂ and Plant Productivity in the 21st Century: Can we feed billions and preserve biological diversity?, In: *Photosynthesis: Mechanisms and Effects*. Ed G. Garab Kluwer Academic Publishers. Vol V, pp 3923-3940.
- Crafts-Brandner, S.J.; Salvucci, M.E. 2002. Sensitivity of photosynthesis in a C₄ plant, maize, to heat stress. *Plant Physiology*. 129: 1773-1780.
- Deng, X.; FU, F.; Ni, N.; LI, W. 2009. Differential Gene Expression in Response to Drought Stress in Maize Seedling *Agricultural Sciences in China* Volume 8: 767-776.
- Eagles, H.A.; Lothrop, J.E. 1994. Highland maize from Central Mexico - its origin, characteristics, and use in breeding programs. *Journal of Agronomy Crop Science*. 34: 11-19.
- Efeoğlu, B.; Y. Ekmekçi, N. 2009. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. *Journal of Botany*. 75: 34-42.
- Hay, R. K.; Delécolle, R. 1989. The setting of rates of development of wheat plants at crop emergence: influence of environment on rates of leaf appearance. *Annals of Applied Biology*. 115: 333-41.

- ♦ IPCC. 2007. In: Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; Van der Linden, P.J.; and Hanson, C.E., *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- ♦ IPCC. 2007. In: Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; Van der Linden, P.J.; and Hanson, C.E., *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- ♦ Kimball, B.A.; Pinter Jr., P.J.; Garcia, R.L.; LaMorte, R.L.; Wall, G.W.; Hunsaker, D.J.; Wechsung, G.; Wechsung, F.; Kartschall, T. 1995. Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Global Change Biology*. 1: 429-442.
- ♦ Mathur S.; Suleyman I.; Allakhverdiev; Jajoo, A. 2011. Analysis of high temperature stress on the dynamics of antenna size and reducing side heterogeneity of Photosystem II in wheat leaves (*Triticum aestivum*). *Biochimica et Biophysica Acta*. 1807: 22-29.
- ♦ Miedema, P. 1982. The effects of low temperature on *Zea mays*. *Adv. Agron.*, 35: 93-129.
- ♦ Momcilovica, I.; Risticb, Z. 2006 Expression of chloroplast protein synthesis elongation factor, EF-Tu, in two lines of maize with contrasting tolerance to heat stress during early stages of plant development. *Journal of Plant Physiology*. 164: 90-99.
- ♦ Nie, G.-Y., Long, S. P. and Baker, N. R. (1992), The effects of development at sub-optimal growth temperatures on photosynthetic capacity and susceptibility to chilling-dependent photoinhibition in *Zea mays*. *Physiologia Plantarum*, 85(3): 554-560. 3054.1992.tb05826.x
- ♦ Paulsen, G.M. 1994. High temperature responses of crop plants. In K.J. Boote, J.M.; Bennett, T.R. Sinclair; G.M. Paulsen (eds). *Physiology and determination of crop yield..* Madison, WI, USA, American Society of Agronomy. pp. 365-389.
- ♦ Santibáñez Q.F. 1994. Crop requirements - temperate crops. In: Griffith J (Ed) *Handbook of Agricultural Meteorology*. Ed. Oxford University, New York. pp 174-188.
- ♦ Santibáñez, F. 2001. El Modelado del Crecimiento, Desarrollo y Producción de Maíz, sobre bases Ecofisiológicas, mediante el modelo SIMPROC. *Revista de Agrometeorología Argentina*. 1: 7-16.
- ♦ Sinsawat, V.; Leipner J, Stamp, P. Fracheboud, Y. 2004. Effect of heat stress on the photosynthetic apparatus in maize (*Zea mays* L.) grown at control or high temperature. *Environmental and Experimental Botany* 52: 123-129.
- ♦ Squire, G.R. 1990. *The physiology of tropical crop production*. Oxon, UK, CAB International. p. 236.
- ♦ Tollenaar, M.; McCullough, D.E.; Dwyer, L.M. 1993. Physiological basis of the genetic improvement of corn. In: Slafer, G.A. (Ed). *Genetic improvement of field crops*, New York, NY, USA, M. Dekker. pp. 183-236.
- ♦ Vallabhaneni, R.; Wurtze E. T. 2010. Epoxycarotenoids to ABA: The role of ABA 8'-hydroxylases in drought-stressed maize roots *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 504: 112-117.
- ♦ WMO/UNEP, 2007. *World Meteorological Organization (WMO) United Nations Environment Programme (UNEP). Scientific assessment of ozone depletion. Global Ozone Res. Monit. Proj. Rep. 50*, World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.

Estero Pupio en la localidad de Caimanes. Región de Coquimbo.

Capítulo 6

→ Cambio Climático y Recursos Hídricos

Introducción

Los recursos hídricos de la zona central de Chile presentan alta vulnerabilidad frente al cambio climático, si se considera que la mayor parte de los modelos globales señalan que la precipitación podría continuar su tendencia declinante durante este siglo. La magnitud de esta disminución es incierta, pudiendo situarse entre 15 y 30%, lo que puede afectar significativamente al funcionamiento de las cuencas de más al norte, y en particular a los ecosistemas ribereños y humedales que dependen de las aguas de escorrentía.

Durante el siglo XX la declinación de la pluviometría sólo fue significativa en la franja costera, afectando a todas las localidades litorales desde

Caldera a Valdivia. En sectores interiores las tendencias son menos apreciables o no significativas, lo que sugiere que el anticiclón pudiera haberse acercado ligeramente al continente, creando una resistencia adicional al paso de los frentes por las áreas costeras. La tendencia que tomaría este fenómeno en el futuro es incierta. Podría suceder que el anticiclón tienda a trasladarse más al interior, extendiendo la declinación pluviométrica hacia sectores del Valle Central, o bien hacia sectores cordilleranos. Igualmente está en el dominio de la incerteza, la tendencia que seguirá la pluviometría durante este siglo. La mayor parte de los modelos señalan que hay una alta probabilidad de que la tendencia decreciente de las precipitaciones

continúe, reduciendo las caídas pluviométricas en un 10 a 30% adicionales, particularmente en sectores costeros. Esta tendencia debiera orientarse hacia una estabilización hacia finales de siglo, momento en el que las emisiones de gases de efecto invernadero se habrán reducido por el cambio en las fuentes de energía, y porque los sistemas de circulación de la atmósfera habrán alcanzado un nuevo equilibrio. En concreto, es altamente probable que los recursos hídricos de esta región se vean reducidos durante este siglo como consecuencia de los cambios climáticos, los cuales claramente se han encaminado hacia una condición más desértica.

Disponibilidad de Agua en las Regiones Áridas y Semiáridas de Chile

La disponibilidad de agua en las regiones áridas y semiáridas de Chile ha alcanzado niveles críticos en relación con las crecientes demandas por parte de la agricultura, la minería y las zonas urbanas. Las demandas han crecido fuertemente en las últimas décadas, frente a una oferta que sólo ha ido disminuyendo como consecuencia de las tendencias pluviométricas. La disponibilidad de agua per cápita en estas regiones está por debajo del nivel crítico considerado de estrés hídrico (1700 m³/persona año). Un par de regiones (Metropolitana y Valparaíso) se sitúan por debajo de la clasificación

de zona con escasez hídrica (1000 m³/persona año). Adicionalmente, la extrema variabilidad en la disponibilidad de agua está creando un serio problema de abastecimiento, especialmente para la agricultura que es la actividad más demandante.

Durante este siglo las precipitaciones podrían declinar entre 10 y 30%, reduciendo la disponibilidad de agua en las cuencas de las regiones áridas y semiáridas del país.



→ ¿Cuánta Agua hay en la Región?

Considerando la precipitación anual y la superficie, se estima que sobre la región de Coquimbo precipitan unos 9 km³ de agua cada año, sobre Valparaíso un poco más de 7 km³ y sobre la región Metropolitana unos 10 km³. De estas cantidades, escurren a través de los cauces unos 0,73 km³ en Coquimbo, 1,38 km³ en Valparaíso y 3,07 km³ en la región Metropolitana. Las cifras anteriores, expresadas como un flujo continuo, equivalen a un caudal de 23,2, 43,7 y 97,3 m³/s. Esta agua debe abastecer a las diferentes actividades de agricultura, minería, energía, industria y centros urbanos. En años secos, esta disponibilidad puede caer a menos de la mitad de las cifras pro-

medio, siendo la agricultura la actividad más afectada.

El aporte hídrico de los ríos es fundamental para complementar el agua proporcionada por las precipitaciones. Los principales ríos presentes en la zona de régimen semiárido son el Elqui, el Limarí y el Choapa en la región de Coquimbo, el Aconcagua en la región de Valparaíso y el Maipo en la Región Metropolitana. Todos se caracterizan por presentar una marcada estacionalidad, con un peak de caudal al comienzo de la época estival, que es cuando se inicia el período de deshielos en las zonas cordilleranas. El peak de caudal del río Elqui es de unos 20 m³/s en

el mes de Diciembre, casi el triple del caudal más bajo, que bordea los 7,5 m³/s. El río Choapa alcanza un caudal cercano a los 25 m³/s en el mes de Noviembre, correspondiente a seis veces el caudal registrado en los meses de Abril y Mayo. El caudal del río Aconcagua en tanto, tiene un peak de 80 m³/s en el mes de Diciembre, superando casi siete veces el caudal de 13,4 m³/s del mes de Mayo, diferencia que disminuye en el río Maipo donde el peak de 221,2 m³/s en el mes de Diciembre no supera en más de cuatro veces al menor caudal, que bordea los 62 m³/s. La siguiente tabla muestra los caudales medios de los ríos de la zona semiárida del país.

Tabla 6.1. Caudales medios de los ríos de la zona semiárida

Río	Región	Superficie cuenca (km ²)	Caudal m ³ /s	Longitud (km)
Elqui	IV	9826	13,0	75
Limarí	IV	11800	11,1	64
Choapa	IV	8124	7,3	160
Aconcagua	V	7340	24,7	142
Maipo	RM	15304	98,8	250

Fuente: DGA 2004a, DGA 2004b, DGA 2004c, DGA 2004d, DGA 2004e.

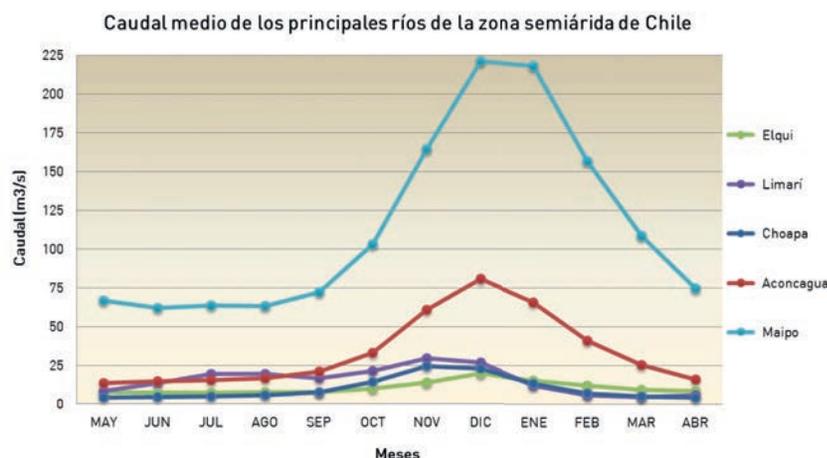


Figura 6.1. Caudales medios de los Ríos Elqui, Limarí, Choapa, Aconcagua y Maipo.

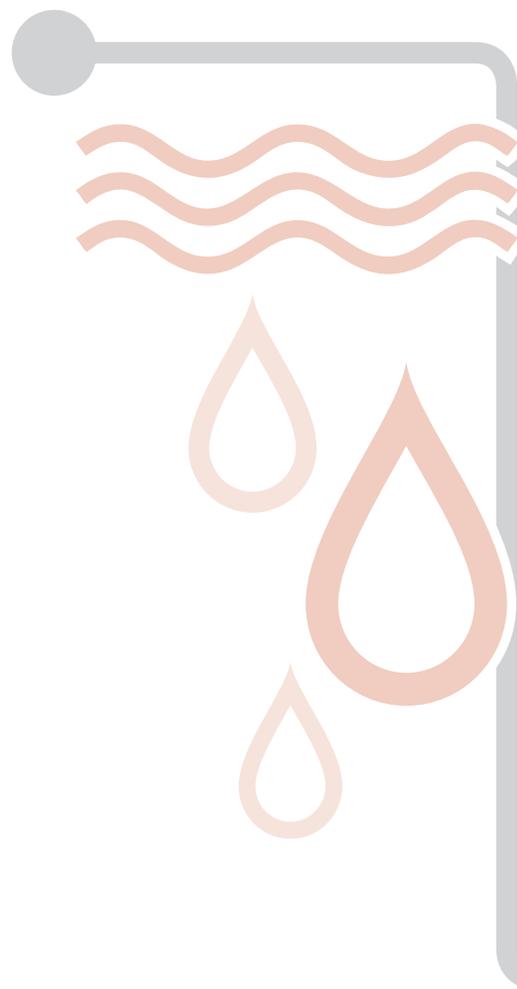


Tabla 6.2. Relación agua - población

Región	Superficie (km ²)	Principales cuencas	Precipitación media anual (mm/año)	Esorrentía media anual (mm/año)	Disponibilidad de agua (m ³ /hab/año)
Coquimbo	40656	Ríos: Elqui, Choapa y Limarí	222	18	1411
Valparaíso	16396	Ríos: Petorca, Ligua y Aconcagua	434	84	995
Metropolitana	15349	Río Maipo	650	200	584

Fuente: FAO, 2000.

Tabla 6.3. Balance hídrico de precipitación y esorrentía en las regiones áridas y semiáridas de Chile

Región	Precipitación (km ³)	Esorrentía (km ³)	Esorrentía (%)	Esorrentía (m ³ /año)	Esorrentía (m ³ /s)
Coquimbo	9,03	0,73	0,08	731808000	23,2
Valparaíso	7,12	1,38	0,19	1377264000	43,7
Metropolitana	9,98	3,07	0,31	3069800000	97,3

Fuente: Elaboración propia.

→ El Consumo de Agua

El mayor consumidor de agua es la agricultura, actividad que demanda en estas regiones entre el 73% y el 87% del consumo total. Cada hectárea regada consume entre 6500 y 12000 m³ de agua, dependiendo de la eficiencia del sistema de riego utilizado. Le sigue la minería que demanda una cantidad variable dependiendo de la actividad minera de cada cuenca, siendo la del Choapa la que genera una mayor deman-

da con un 17,3% en este rubro. Las demandas de agua potable sólo son importantes en la cuenca del Maipo, con un 16,5%, cifra generada mayormente por la ciudad de Santiago, cuyo consumo es del orden de los 18,51 m³/s. La industria, al igual que la minería, tiene consumos variables según la cuenca, siendo más significativa en Aconcagua y Maipo. Todos los usos del agua van en aumento, salvo la agricultura que en

los últimos años ha estabilizado su demanda debido al abandono de numerosas plantaciones como consecuencia de la sequía. Es probable que Coquimbo y Aconcagua ya hayan llegado a un nivel de consumo no sostenible y que la crisis del riego sea una muestra del necesario ajuste en respuesta a la sequía, que ha puesto en relieve esta situación.

Uso del agua por las distintas actividades en la cuenca del Maipo



Figura 6.2: Demanda de agua de las principales actividades de la cuenca del río Maipo. Fuente: DGA, 2007b.

La agricultura es el mayor consumidor de agua ocupando más de ¾ de todo el consumo a nivel de región y a nivel de cuencas. El consumo de agua potable es menos significativo, salvo en la cuenca del Maipo (Región Metropolitana), donde esta fracción llega al 16,5% del agua disponible.

Tabla 6.4. Estructura del consumo de agua en la región

Cuenca	Rubro	Caudal (m³/s)	Caudal anual (m³)	Caudal Anual (km³)	Porcentaje por cuenca (%)
Elqui	Agricultura	6,09	191959632	0,1920	87,4
	Agua potable	0,10	3058992	0,0031	1,4
	Industria	0,17	5266512	0,0053	2,4
	Minería	0,60	18890064	0,0189	8,6
	Forestal	0,01	346896	0,0003	0,2
Limarí	Agricultura	10,88	343111680	0,343	93,2
	Agua potable	0,31	9776160	0,010	2,7
	Industria	0,05	1482192	0,001	0,4
	Minería	0,43	13560480	0,014	3,7
	Forestal	0,01	189216	0,0002	0,1
Choapa	Agricultura	5,93	187000000	0,187	80,8
	Agua potable	0,11	3437424	0,003	1,5
	Industria	0,02	725328	0,001	0,3
	Minería	1,27	40000000	0,040	17,3
	Forestal	0,01	220752	0,0002	0,1
Aconcagua	Agricultura	22,31	703442016	0,703	79,5
	Agua potable	1,14	36045648	0,036	4,1
	Industria	3,65	115074864	0,115	13,0
	Minería	0,92	29013120	0,029	3,3
	Forestal	0,04	1292976	0,001	0,1
Maipo	Agricultura	82,36	2597336496	2,597	73,6
	Agua potable	18,51	583731360	0,584	16,5
	Industria	10,42	328636656	0,329	9,3
	Minería	0,48	15168816	0,015	0,4
	Forestal	0,10	3027456	0,0030	0,1

Fuente: DGA, 2007a y DGA, 2007b.

➔ Relación Consumo/Disponibilidad de Agua

La extrema variabilidad interanual de las precipitaciones, hace variar igualmente a la escorrentía superficial de los ríos. Es muy frecuente que la escorrentía total anual, expresada en km³ de agua, sea inferior a la demanda, situación que va empeorando con el tiempo en la medi-

da que las demandas van aumentando. En Elqui un 52% de los años escurre menos agua que la demandada, generándose condiciones de déficit hídrico. En Limarí el 56% de los años son deficitarios, en Choapa un 37%, en Aconcagua un 38% y en Maipo un 49%. Esta situación puede

ser regulada parcialmente por los embalses, pero durante los ciclos secos, en que varios años se presentan deficitarios, ningún sistema de embalses es capaz de conservar el agua demandada, generándose sequías con severas consecuencias sociales y económicas.

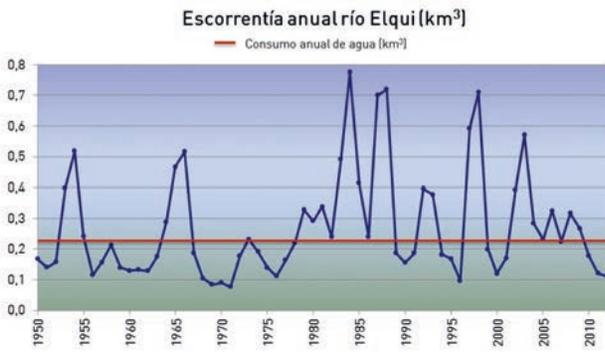


Figura 6.3. Escorrentía interanual del Río Elqui comparada con el consumo de agua en la cuenca. Fuente: DGA, 2007a y DGA, 2013.

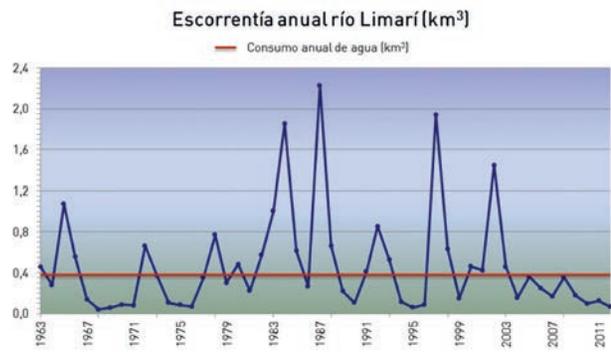


Figura 6.4. Escorrentía interanual del Río Limarí comparada con el consumo de agua en la cuenca. Fuente: DGA, 2007a y DGA, 2013.



Figura 6.5. Escorrentía interanual del Río Choapa comparada con el consumo de agua en la cuenca. Fuente: DGA, 2007a y DGA, 2013.



Figura 6.6. Escorrentía interanual del Río Aconcagua comparada con el consumo de agua en la cuenca. Fuente: DGA, 2007b y DGA, 2013.

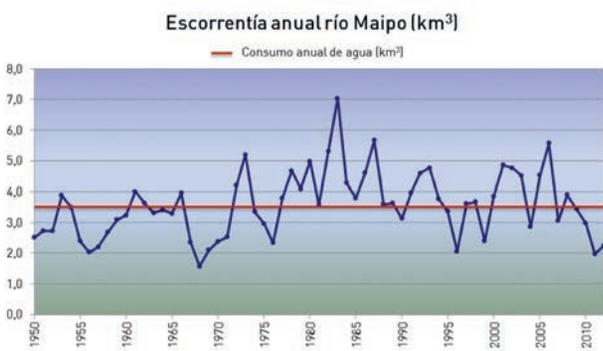


Figura 6.7. Escorrentía interanual del Río Maipo comparada con el consumo de agua en la cuenca. Fuente: DGA, 2007b y DGA, 2013.



Tabla 6.5. Capacidad de los embalses

Embalse	Región	Cuenca	Uso principal	Capacidad (millones m ³)
La Laguna	IV	Elqui	Riego	40
Puclaro	IV	Elqui	Riego	200
Recoleta	IV	Limarí	Riego	100
La Paloma	IV	Limarí	Riego	748
Cogotí	IV	Limarí	Riego	150
Culimo	IV	Quilimarí	Riego	10
Corrales	IV	Choapa	Riego	50
Aromos	V	Aconcagua	Agua potable	35
Peñuelas	V	Peñuelas	Agua potable	95
El Yeso	RM	Maipo	Agua potable	220
Rungue	RM	Maipo	Riego	2
Laguna negra	RM	Maipo	Agua potable	600

Fuente: DGA, 2013.

Tabla 6.6. Relación agua embalsada/consumo anual

Cuenca	Consumo de agua (millones de m ³)	Capacidad del Embalse	Agua embalsada / consumo anual
Elqui	220	240	1,09
Limarí	368	998	2,71
Choapa	149	60	0,40
Aconcagua	885	130	0,15
Maipo	3528	822	0,23

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.7. Relación demanda/oferta de agua en las diferentes cuencas

Cuenca	Nº de años analizados	Nº de años con superávit caudal	Nº de años con déficit de caudal	Porcentaje de años deficitarios en agua
Elqui	63	30	33	52,4 %
Limarí	50	22	28	56,0 %
Choapa	63	40	23	36,5 %
Aconcagua	72	45	27	37,5 %
Maipo	63	32	31	49,2 %

Fuente: DGA, 2013.

Según estudios realizados por la DGA (FAO, 2003), el escenario hídrico en el periodo 1992-2017 para la zona, seguirá siendo restrictivo dado que los usos domésticos, mineros e

industriales se duplicarían y el uso agrícola crecería en un 20%. Estas proyecciones son preocupantes, considerando que esta región está ubicada en una zona de transición

climática, altamente sensible a los cambios climáticos y con una marcada declinación pluviométrica, que podría continuar acentuándose en las próximas décadas (Peña, 2001).



→ Tendencias de las Reservas de Agua en la Década

En la actualidad es conocido el ciclo de sequías generado por la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Este fenómeno, de causas aún desconocidas, tiene una fase fría que dura entre 15 y 20 años, que coincide con ciclos secos, y una fase cálida, de similar duración, que tiende a ser más prodiga en años de Niño, lo que aumenta las

caídas pluviométricas. El milenio comenzó con un ciclo seco, lo que hizo agotar las reservas de agua de todos los embalses de la zona, los que quedaron prácticamente exhaustos al fin del año 2012. En efecto, durante los ciclos secos la capacidad de los embalses no permite soportar más de tres años de sequía consecutivos.

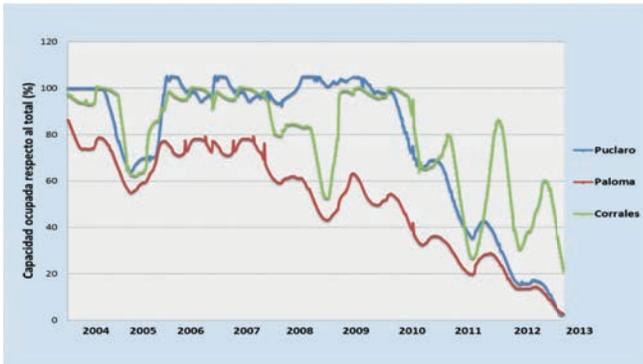


Figura 6.8. Capacidad ocupada de los embalses Puclaro, Paloma y Corrales. Fuente: DOH, 2013.

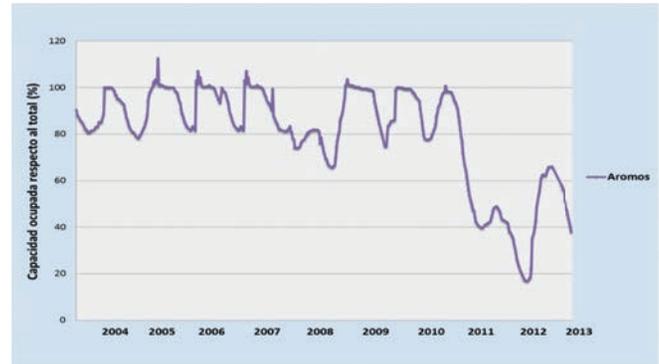


Figura 6.9. Capacidad ocupada del embalse Aromo. Fuente: DOH, 2013.

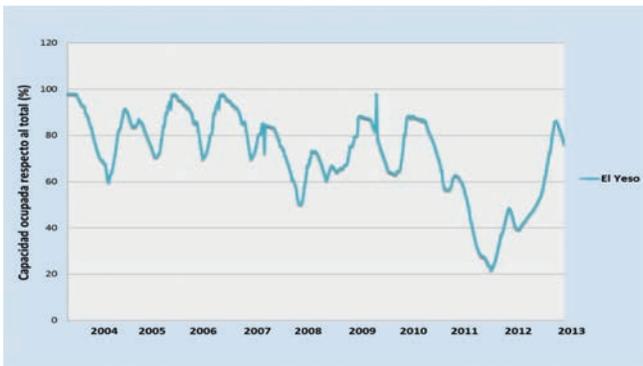


Figura 6.10. Capacidad ocupada del embalse El Yeso. Fuente: DOH, 2013.

Las sequías en la zona responden a un ciclo pluri-anual, modulado mayormente por la Oscilación Decadal del Pacífico, que regula la frecuencia de los ciclos de El Niño y La Niña. Durante los ciclos secos, la capacidad de los embalses no permite soportar más de tres años de sequía consecutivos.

→ Las Aguas Subterráneas

Los niveles freáticos han mostrado una clara tendencia al descenso en los últimos años. Esto tiene varias causas entre las cuales, las más importantes son la excesiva extracción que hace el ser humano, la menor recarga de las napas debido a la pérdida de vegetación de los sectores altos de las cuencas y el cambio que se ha venido observando en el

régimen de lluvias. Los tres factores mencionados son difícilmente reversibles, razón por la que es complejo que los niveles freáticos tengan recuperaciones significativas en el futuro. Los sectores altos y medios de las cuencas son los que muestran las variaciones más dramáticas. Las partes más bajas de las cuencas tienen una tendencia me-

nos marcada gracias a las aguas de recuperación que se concentran en dichos sectores. La idea de infiltrar artificialmente agua para recuperar las aguas subterráneas podría mejorar parcialmente el problema en algunos sectores, pero difícilmente estas obras podrían atender las necesidades de todos los acuíferos de las cuencas.

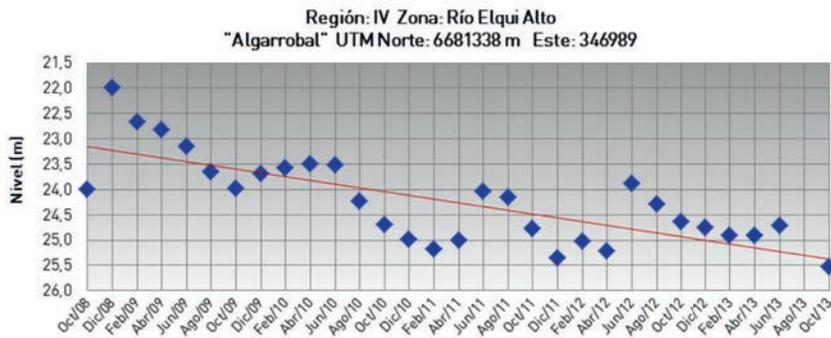


Figura 6.11. Nivel de la capa freática en la estación Algarrobal. Fuente: DGA, 2013.

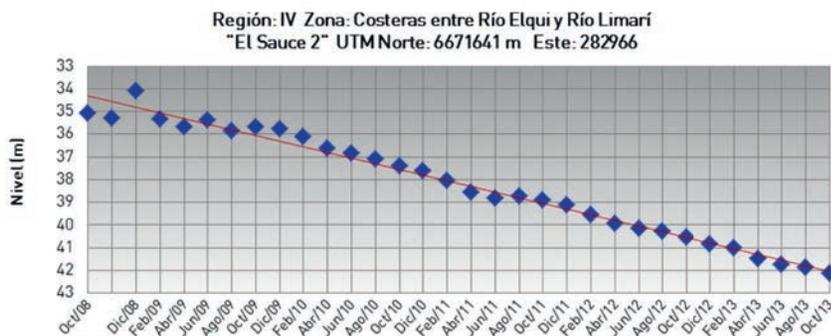


Figura 6.12. Nivel de la capa freática en la estación El Sauce 2. Fuente: DGA, 2013.

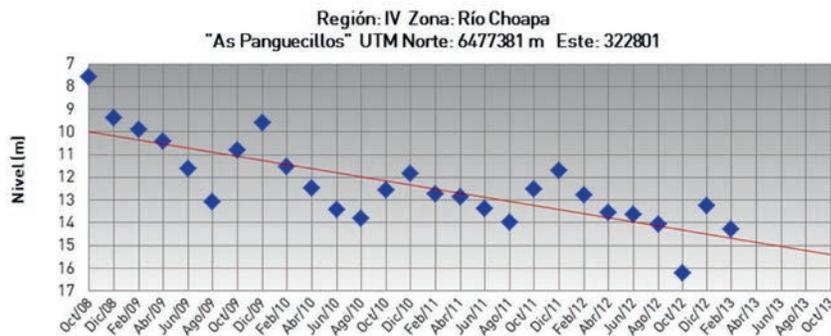


Figura 6.13. Nivel de la capa freática en la estación Panguecillos. Fuente: DGA, 2013.

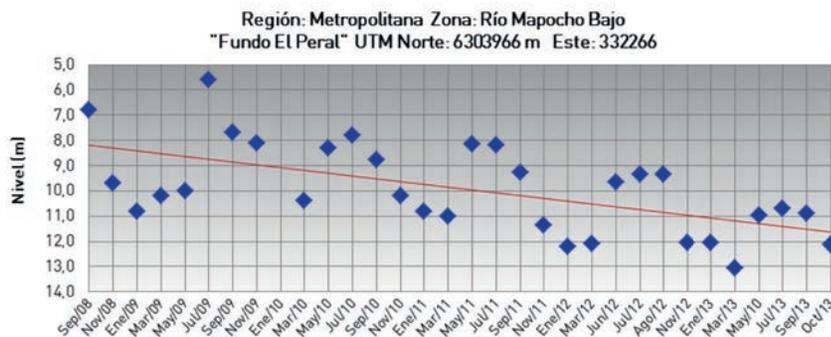
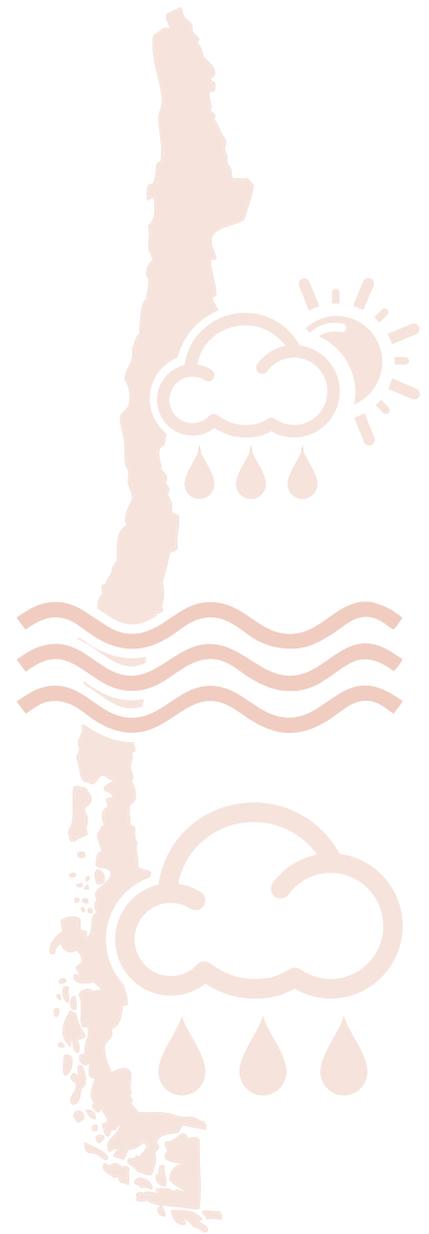


Figura 6.14. Nivel de la capa freática en la estación Fundo El Peral. Fuente: DGA, 2013.



Los niveles freáticos han mostrado una clara tendencia al descenso en los últimos años. Esto se debería a la excesiva extracción de aguas subterráneas que hace el ser humano, la deforestación de los sectores altos de las cuencas y al cambio que se estaría observando en el régimen de precipitación.

→ Comentarios Finales

Los recursos hídricos de las regiones áridas y semiáridas de Chile han mostrado un creciente desequilibrio entre la dinámica de la demanda y la disponibilidad natural de éstos. Mientras las primeras crecen aceleradamente, la disponibilidad se reduce como consecuencia de los cambios climáticos que están operando en el borde del Desierto de Atacama y del sobreconsumo que es particularmente evidente en el caso de las aguas subterráneas. Esto ha llevado a esta zona del país a una condición de extrema vulnerabilidad hídrica, presentando casi la mitad de los años una mayor demanda en relación a la oferta de agua por parte de las cuencas hidro-

gráficas. Con la excepción de la cuenca del Limarí, y en menor medida del Elqui, los embalses con que cuenta la zona juegan más bien un rol de regulación estacional, aportando agua invernal para abastecer el consumo estival, no teniendo una capacidad suficiente como para jugar un rol de regulador interanual importante. Según lo anterior, la zona no está preparada para soportar sin impacto negativo, un periodo muy seco que perdure por más de dos años. Esta situación pone a esta zona en condición vulnerable si se cumplen las tendencias hacia la disminución de la pluviometría, como lo señalan los modelos globales.

→ Referencias Bibliográficas

- ♦ DGA. 2004a. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Elqui. Ministerio de Obras Públicas. Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Elqui.pdf. 137 p. Visto octubre de 2013.
- ♦ DGA. 2004b. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Limarí. Ministerio de Obras Públicas. Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Limarí.pdf. 131 p. Visto octubre de 2013.
- ♦ DGA. 2004c. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Choapa. Ministerio de Obras Públicas. Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Choapa.pdf. 125 p. Visto octubre de 2013.
- ♦ DGA. 2004d. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Aconcagua. Ministerio de Obras Públicas. Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Aconcagua.pdf. 154 p. Visto octubre de 2013.
- ♦ DGA. 2004e. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Maipo. Ministerio de Obras Públicas. Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Maipo.pdf. 195 p. Visto octubre de 2013.
- ♦ DGA. 2007a. Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I. Regiones I a IV. Ministerio de Obras Públicas. 571 p.
- ♦ DGA. 2007b. Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona II. Regiones V a XII y región Metropolitana. Ministerio de Obras Públicas. 986 p.
- ♦ DGA. 2013. [En línea]. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Ministerio de Obras Públicas. Chile. Disponible en <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>. Visto octubre de 2013.
- ♦ DOH. 2013. [En línea]. Estado de embalses. Dirección. Ministerio de Obras Públicas. Chile. Disponible en <http://www.doh.gov.cl/AcercadelaDireccion/estado-deembalses/Paginas/default.aspx>. Visto octubre de 2013.
- ♦ FAO. 2000. [En línea]. Sistema de Información sobre el Uso del agua en la agricultura y el medio rural de la FAO. Chile. Disponible en http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/chile/indexesp.stm. Visto octubre de 2013.
- ♦ FAO. 2003. [En línea]. Administración de derechos de agua. Experiencias, asuntos relevantes y lineamientos. Héctor Garduño para el Servicio de Derecho para el Desarrollo Oficina Jurídica de la FAO, Roma. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/006/y5062s/y5062s0i.htm#TopOfPage>. Visto octubre de 2013.
- ♦ Peña, H. 2001. Uso Sustentable de los Recursos Hídricos en Chile. Ventajas y Limitaciones del Sistema Institucional Vigente, VII Jornadas del Programa Hidrológico Internacional - Chile.



Capítulo 7

→ **Cambio Climático y
Recursos Edáficos**

Erosión de suelo al interior de la comuna de Canela. Región de Coquimbo

Introducción



La degradación del suelo y la cubierta vegetal comenzó en Chile en la época de la colonia. La construcción de ciudades y puentes, así como los requerimientos de energía fueron obtenidos de la tala de bosques a partir del siglo XVI. Ya en el siglo XIX (1838), Claudio Gay advierte al gobierno chileno sobre la dramática destrucción y desaparición de los bosques de Chile con el propósito de abastecer de leña a la minería (Gay, 1982). En Chile han existido a lo menos 7 grandes procesos de deforestación histórica asociada a: la habilitación de terrenos para el uso agropecuario; el desarrollo de la minería metálica y del salitre; la demanda mundial de cereales; los procesos de colonización durante el siglo XIX y XX; así como la explotación de los bosques para cubrir la demanda mundial de productos forestales.

La superficie de tierras arables per cápita habrá pasado de 0,38 ha en 1995 a 0,26 por habitante para el año 2035. Esta disminución se debería principalmente al efecto combinado del crecimiento de la población, procesos de degradación y de las pérdidas de suelos por expansión urbana. (Informe país, 2005).

Los cambios climáticos podrían a futuro acelerar los procesos de pérdida de suelos por erosión. La intensificación del régimen de precipitaciones, la mayor escorrentía debido a la elevación de la línea de las nieves y al desplazamiento de la agricultura hacia suelos más frágiles de la costa y precordillera, serán

factores de intensificación de la degradación de los suelos. La suma de los efectos del cambio climático, la degradación de los suelos y la pérdida o empobrecimiento de la cubierta vegetal, se ha llamada "desertificación", por cuanto le otorga al paisaje un aspecto más desértico. Al respecto, las cifras son preocupantes, por cuanto se estima que al menos la mitad del territorio exhibe signos de desertificación, lo que representa una pérdida de patrimonio irreversible. Un ecosistema, una especie, un suelo, un glaciar perdido, ninguna tecnología podrá recuperarlo. Este capítulo pone parcialmente el acento en la necesidad de detener esta pérdida patrimonial, retomando la ruta de la sustentabilidad ambiental del crecimiento económico.



➔ Riesgo de Erosión Potencial de los Suelos

El régimen de precipitaciones de un lugar, crea riesgos de erosión en la medida en que los suelos estén desprotegidos frente a lluvias intensas. Las zonas más vulnerables de sufrir procesos erosivos al año 2050, se estimaron mediante un índice de riesgo de erosión potencial del suelo obtenido a partir de los factores de la ecuación RUSLE. Este índice considera la capacidad erosiva de las precipitaciones, la topografía y la cobertura vegetal. Debido a la ausencia de información detallada de suelos en la mayor parte de esta región (interfluvios), se omitió el cálculo de erodabilidad, un atributo propio de cada tipo de suelo, el cual depende de su contenido de materia orgánica, textura, estructura y permeabilidad. La aplicación a gran escala de este modelo se hizo por medio del cálculo de índices de vegetación de imágenes satelitales MODIS, que permitieron determinar la cobertura vegetal, y un modelo digital de elevación con resolución espacial de 90 metros.

Considerando que en la mayor parte de los suelos expuestos a la erosión, el mayor componente de la cobertura vegetal en zona áridas y semiáridas, está representado por la cubierta herbácea y vegetación tipo matorral, se aplicó el modelo de simulación de productividad de cultivos (SIMPROC), para evaluar el efecto de los nuevos escenarios climáticos sobre los pastizales naturales y el efecto de ellos como protector del suelo.

Evaluación de la erosión potencial de los suelos: La Ecuación RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). La ecuación RUSLE es una versión mejorada de la ecuación

universal de la erosión (USLE), la cual es el modelo de estimación de suelo con mayor aceptación y de más amplia aplicación, aunque se deben considerar las restricciones del modelo para evitar errores en la interpretación de los datos (Almorox, 1994). La RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), sólo modifica la forma de estimar los diferentes parámetros del modelo. Ésta representa una versión computarizada que incorpora los resultados de investigaciones y experiencias obtenidas desde 1978 (Wischmeier y Smith, 1978). La RUSLE calcula la erosión de suelo como el producto de seis factores: Erosividad de lluvia (R), erodabilidad del suelo (K), longitud de la pendiente (L), inclinación de la pendiente (S), cobertura del suelo (C) y prácticas de conservación de suelo (P). La ecuación es:

La formulación de la RUSLE es la siguiente:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Dónde:

- A: Pérdida de suelo (ton/ha*año)
- R: Erosividad de las precipitaciones (hJ*cm/m²*h*año)¹
- K: Erodabilidad del suelo (ton*h*m²/ha* hJ*cm)
- L: Longitud de la ladera (adimensional)
- S: Pendiente de la ladera (adimensional)
- C: Cultivo y manejo del suelo (adimensional)
- P: Prácticas de conservación (adimensional)

FACTORES DE LA ECUACIÓN RUSLE CONSIDERADOS EN EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE EROSIVIDAD

➔ Factor R: Erosividad de la Lluvia

Es un indicador que determina la capacidad erosiva de una tormenta. Es el resultante de multiplicar la energía cinética de la lluvia por la intensidad máxima durante 30 minutos de precipitación (Wischmeier y Smith, 1978). Se han desarrollado numerosos índices alternativos debido a la escasez de series de datos de intensidad de la lluvia para largos periodos, uno de los cuales fue propuesto en España (ICONA-INTECSA, 1988). Para zonas semiáridas con precipitaciones inferiores a 400 mm se determinó la siguiente relación:

$$R = e^{-1.235} * [PMEX]^{1.297} * [MR]^{-0.511} * [MV^{0.366}] * [F24]^{0.414}$$

$r = 0,96$

¹hJ = Hectojoule (102J), MJ = Megajoule (106J), J = Joule, h = horas, ha = hectáreas

PMEX = Lluvia media del mes más lluvioso de cada uno de los años de la serie
 MR = Lluvia media período octubre - mayo
 MV = Lluvia media período junio - septiembre



$$F24 = \frac{[\text{Máxima lluvia en 24 horas}]^2}{\text{Suma de las máximas en 24 horas de todos los meses del año}}$$

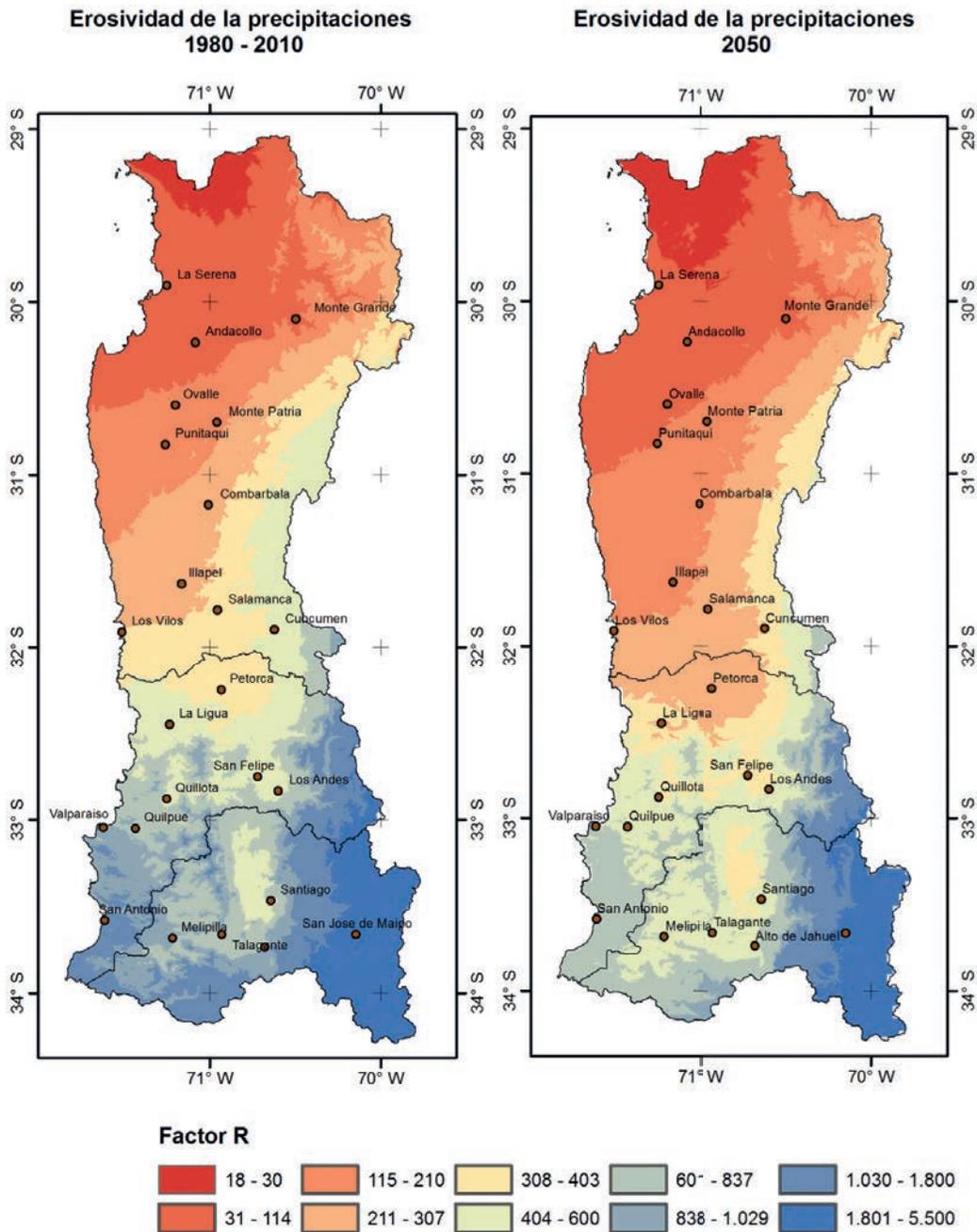


Figura 7.1: Cambios en la erosividad de las precipitaciones hacia el año 2050 (Factor R).

➔ Factor LS: Longitud - Pendiente

Este factor depende de la longitud de la ladera en metros, calculada como proyección horizontal y del ángulo de la pendiente. Para incorporar la influencia del impacto de la convergencia del flujo, el factor de largo de la pendiente (L) fue reemplazado por el área contribuyente (A) pendiente arriba. La ecuación modificada para el cálculo del factor LS en SIG en forma de diferencias finitas para la erosión en cada celda de una grilla (representado por un segmento de pendiente), fue derivado por Desmet and Govers (1996). Una forma más simple y continua de la ecuación para el cálculo del factor LS en un punto de una pendiente $r = (x,y)$ (Mitasova et al., 1996) es:

$$LS(r) = (m + 1)[A(r) / a_0]^m [\text{sen}(b(r) / b_0)]^n$$

Donde A es el área contribuyente pendiente arriba, b [grados decimales] es la pendiente, m y n son parámetros que representan el tipo de erosión predominante (laminar o en surco), $a_0 = 22,1$ m es el largo de la pendiente y $b_0 = 0,09=9\%= 5,16$ (deg) es la pendiente del terreno estándar de RUSLE.

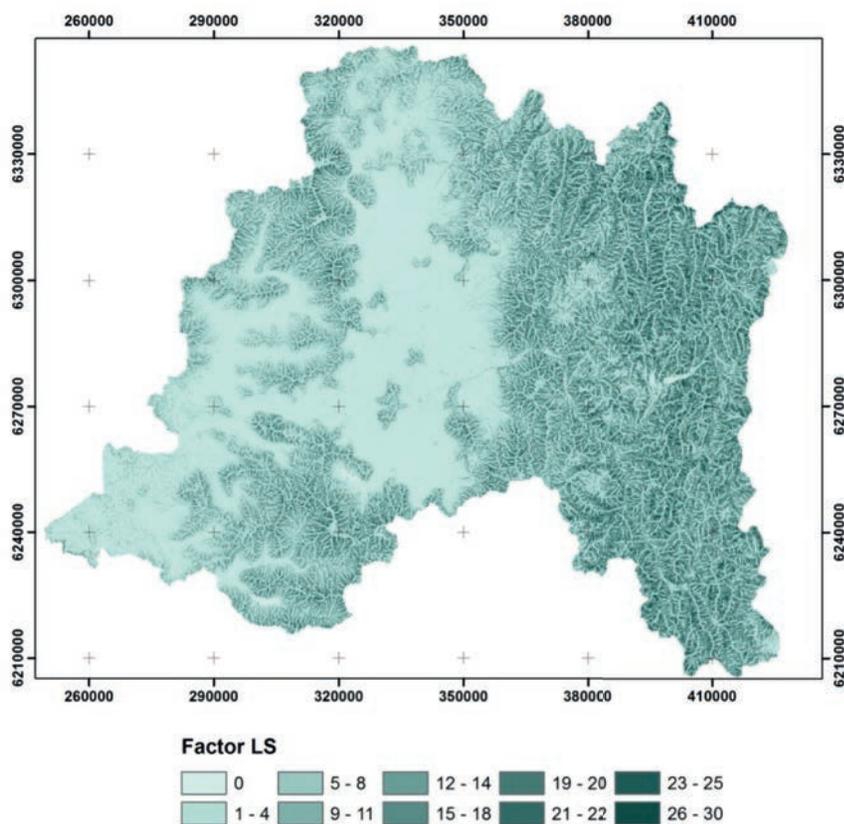
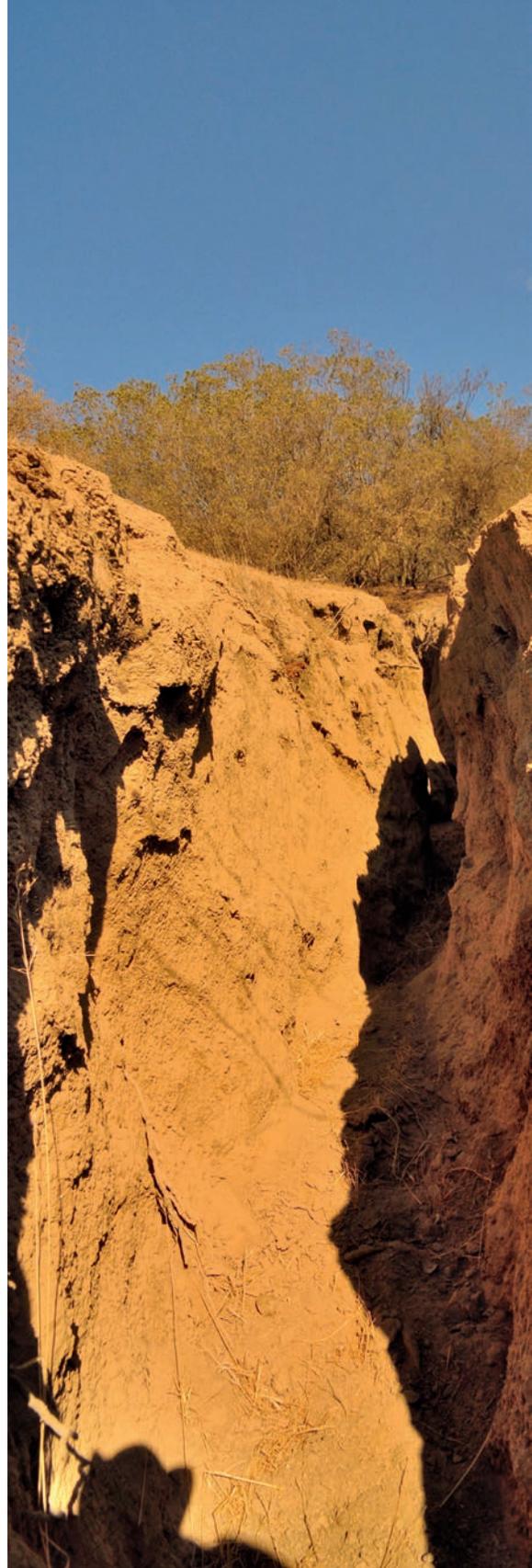


Figura 7.2: Factor LS de longitud y pendiente para la región Metropolitana calculada a través de un Sistema de Información Geográfica.

Erosión en cárcava en el valle del Quilimarí



→ Factor C: Cobertura Vegetal

El Factor C expresa la influencia de la vegetación sobre la erosión del suelo y sus valores varían entre 0,02 en áreas forestadas y 1 en áreas descubiertas. La cobertura de vegetación es considerada como uno de

los factores cruciales en la reducción de erosión del suelo (De Asis, 2007), de tal manera que su estudio resulta determinante como factor de corrección en la ecuación RUSLE. Hoy en día mediante el apoyo de las

técnicas geomáticas es posible estimar el Factor C a través del ajuste de funciones que describen la relación que existe con el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) (Patriche, 2006).

→ Método Propuesto

Para calibrar la función que relaciona NDVI con el Factor C se utilizaron imágenes MODIS (disponibles en el sitio web de la NASA), además de NDVI e imágenes disponibles en Google Earth. Se establecieron 120 unidades muestrales, correspondientes a parcelas de 500 x 500 m, donde mediante fotointerpretación, se determinó el porcentaje de coberturas vegetal presente en el área de interés. Para ello se utilizaron imágenes Google Earth (2-3 años de antigüedad) y una malla vectorial de 500 x 500 metros dividida en cuadrantes.

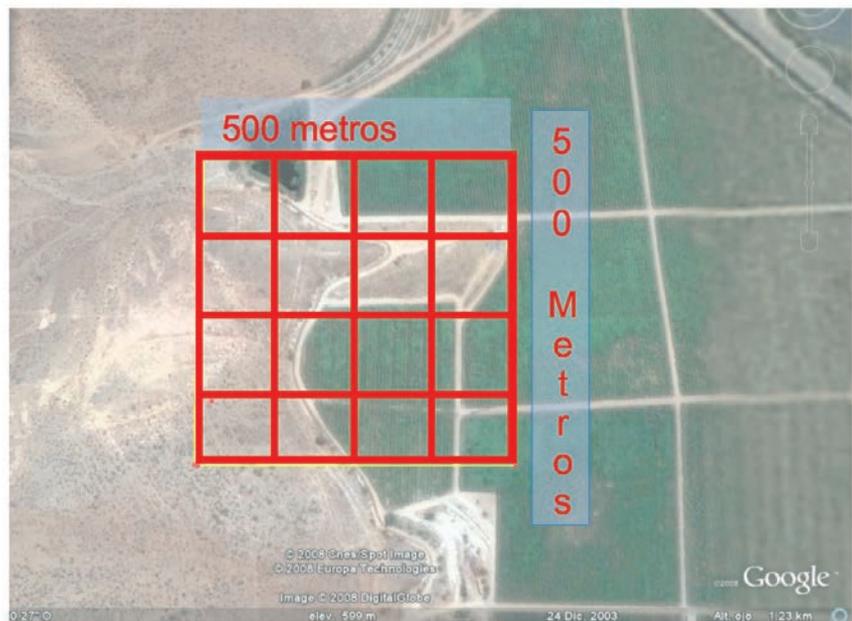
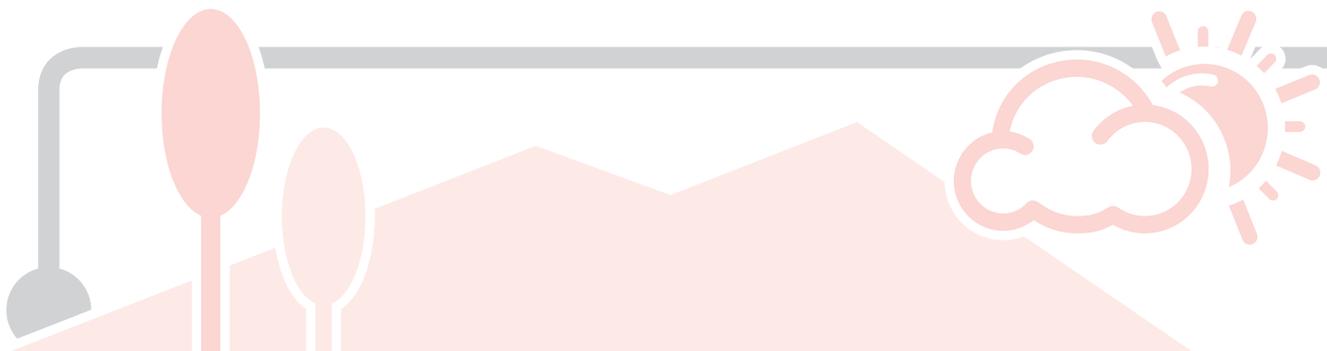


Figura 7.3. Malla vectorial para el muestreo

Mediante este método se calibró una ecuación que relaciona NDVI con el porcentaje de cobertura.

El modelo presentala siguiente forma:

$$C = 103,907 * e^{-4,443 * NDVI} + 10,5398 + \varepsilon$$



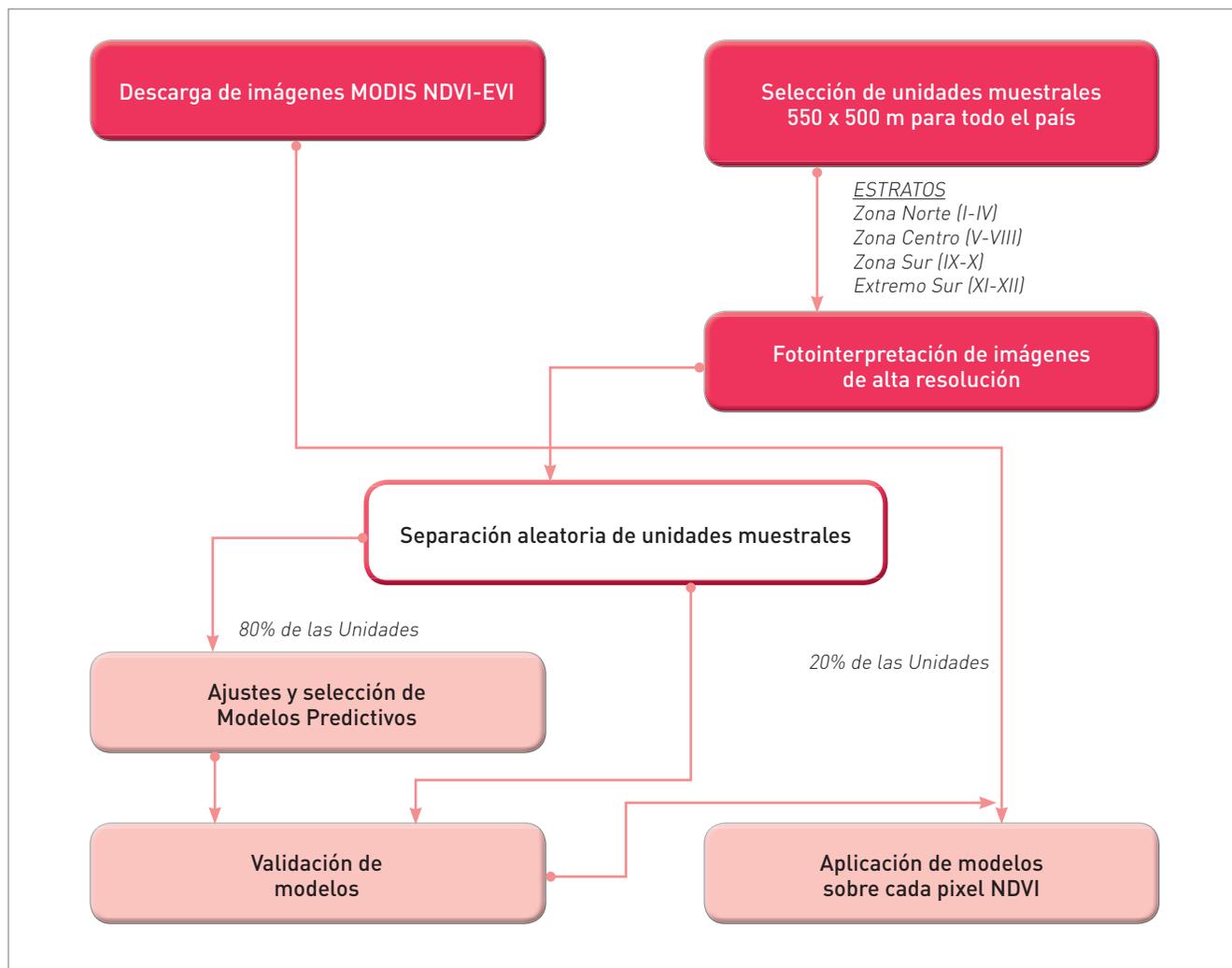


Figura 7.4 Diagrama metodológico de cálculo del factor cobertura vegetal.

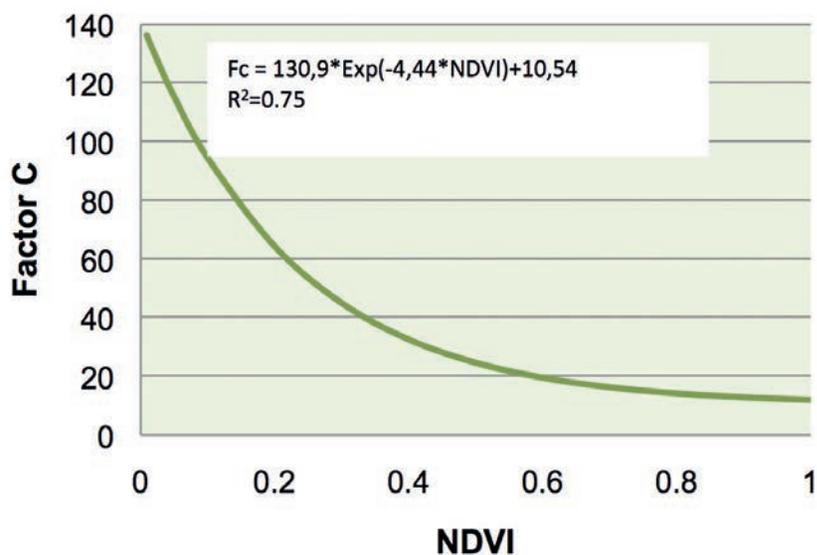
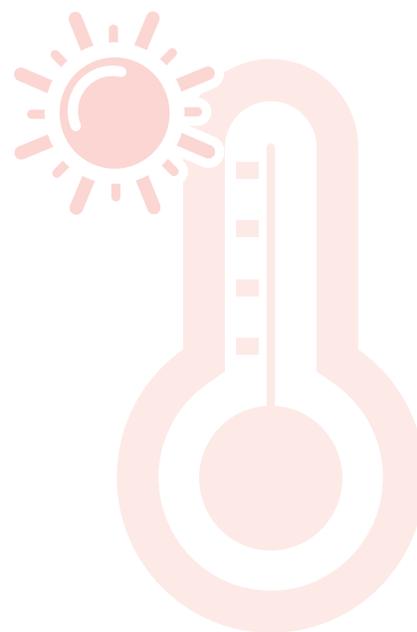


Figura 7.5. Modelo Ajustado



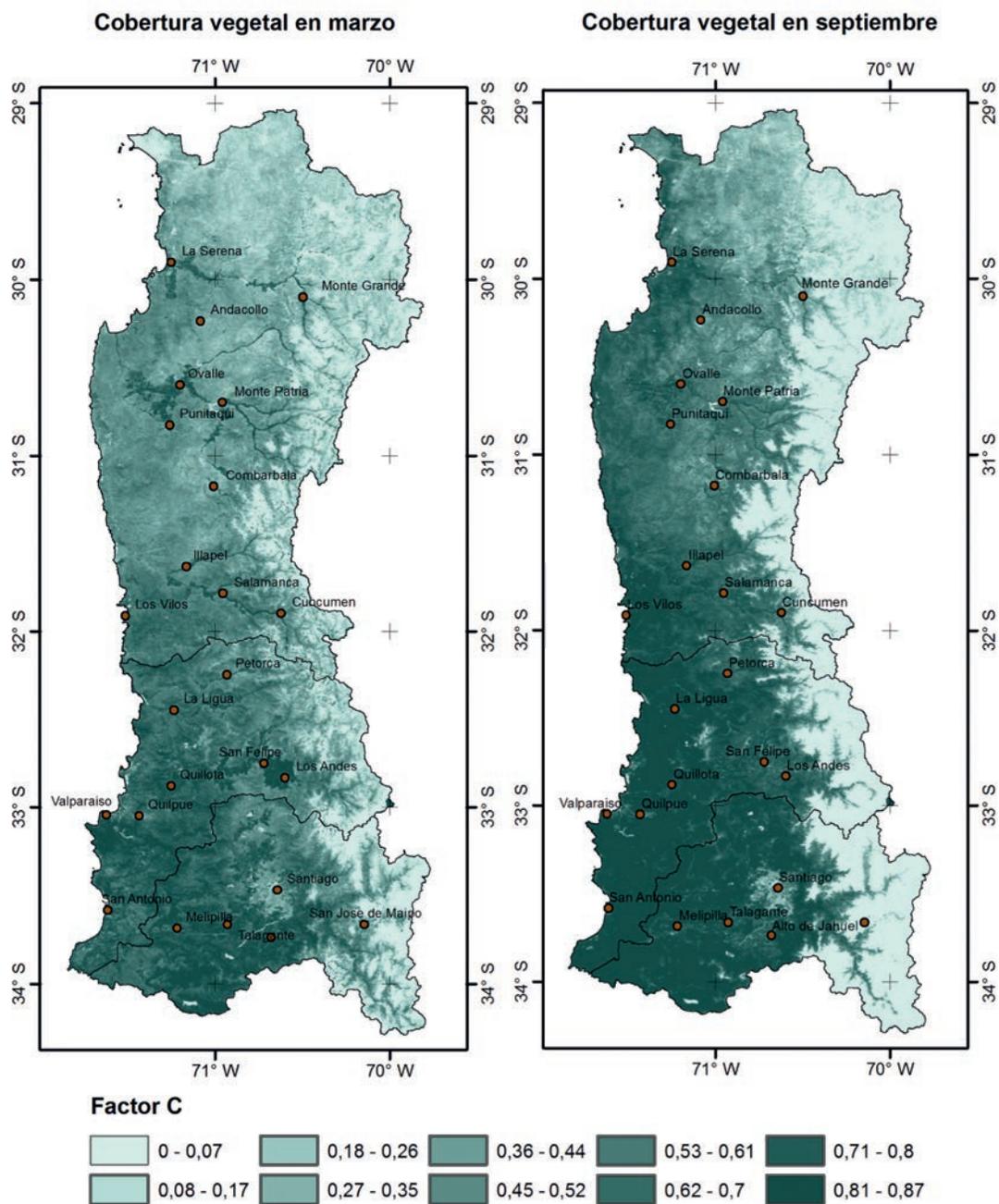


Figura 7.6. Factor de cobertura vegetal escenario línea base. Valores cercanos a 1 indican mayor cobertura, valores cercanos a 0 muestran zonas descubiertas de vegetación. Marzo corresponde al mes más seco y septiembre al que tiene mayor cobertura vegetal durante el año.

➔ Estimación del Factor de Cobertura C para el Escenario 2050

Para la estimación del factor C para el escenario futuro, se consideró que este cambiará en la misma proporción en que variarán los rendimientos de las praderas

naturales. Se utilizó el modelo SIMPROC (descrito en el capítulo 5) para evaluar la productividad primaria de los pastizales para el escenario Línea base y 2050.

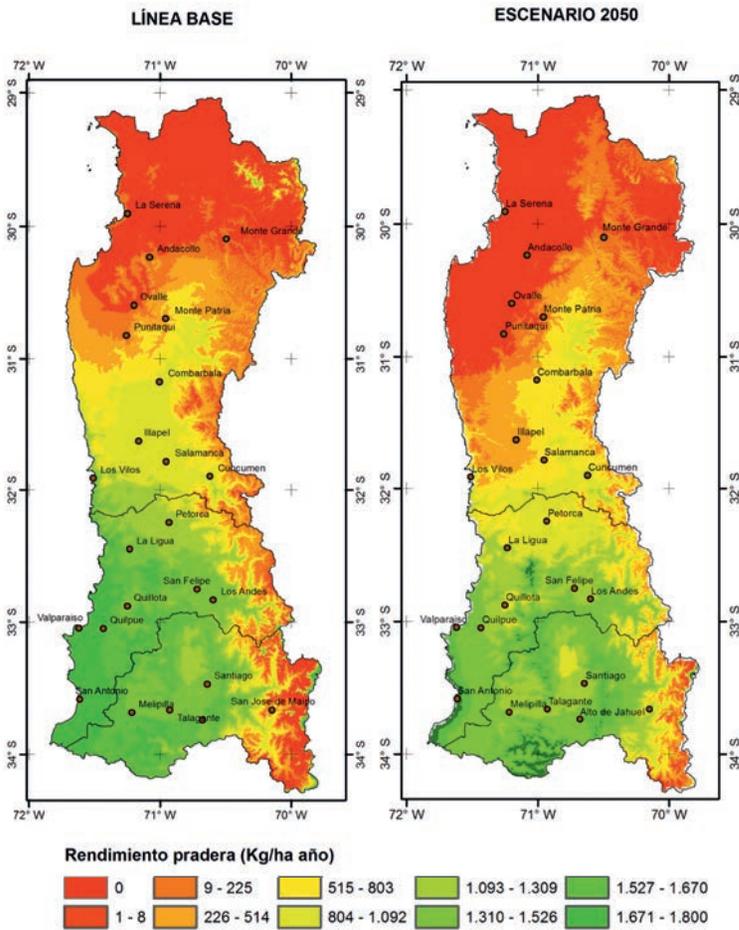


Figura 7.7. Biomasa anual producida por los pastizales naturales para el escenario línea base (1980 - 2010) y escenario futuro RCP 8.5 año 2050.

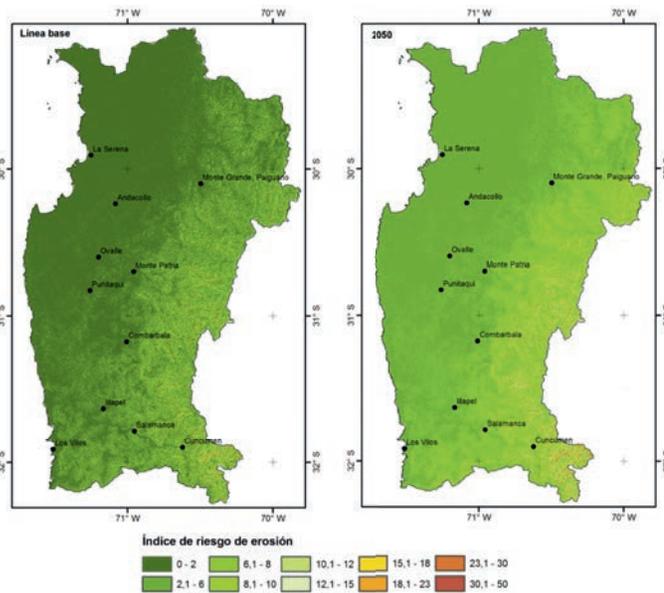
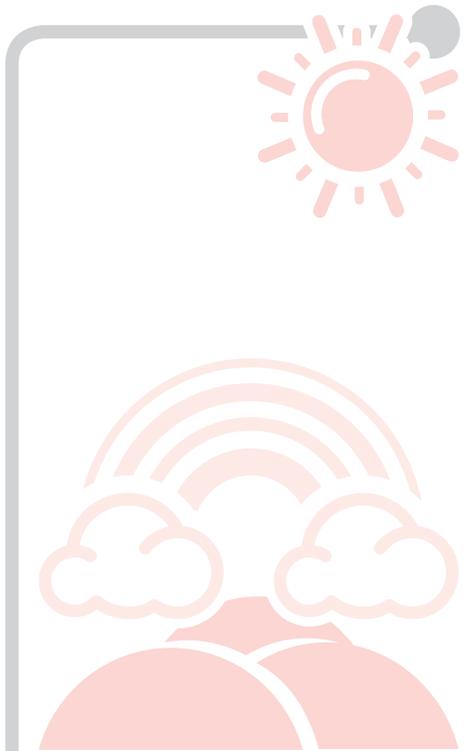


Figura 7.8. Índice de riesgo de erosión potencial de la región de Coquimbo. Colores verdes muestran zonas de bajo riesgo, amarillos riesgo medio y cafés riesgo alto.



El modelo RUSLE está calibrado para terrenos con pendientes inferiores a 22% ya que está diseñado para evaluar prácticas de manejo conservacionista de suelo en terrenos agrícolas y forestales. Para pendientes superiores a este valor, existe una sobreestimación de los resultados y requiere calibraciones para cada caso particular. Por esta razón, se hablará de pérdidas potenciales de suelo.

Sin embargo, en áreas montañosas, los resultados igualmente muestran los sectores con mayores riesgos de sufrir procesos de erosión. Resultados de riesgo erosión potencial muy elevados en zonas con fuertes pendientes, pero con buena cobertura vegetal, indican que si en estas áreas disminuyera esta cobertura, aumentarían las pérdidas a una tasa muy elevada, y si por el contrario, estas áreas están descubiertas, probablemente ya se ha perdido prácticamente todo el suelo capaz de sustentar vegetación, como es el caso de algunos sectores del seco costero de la zona Central del país.

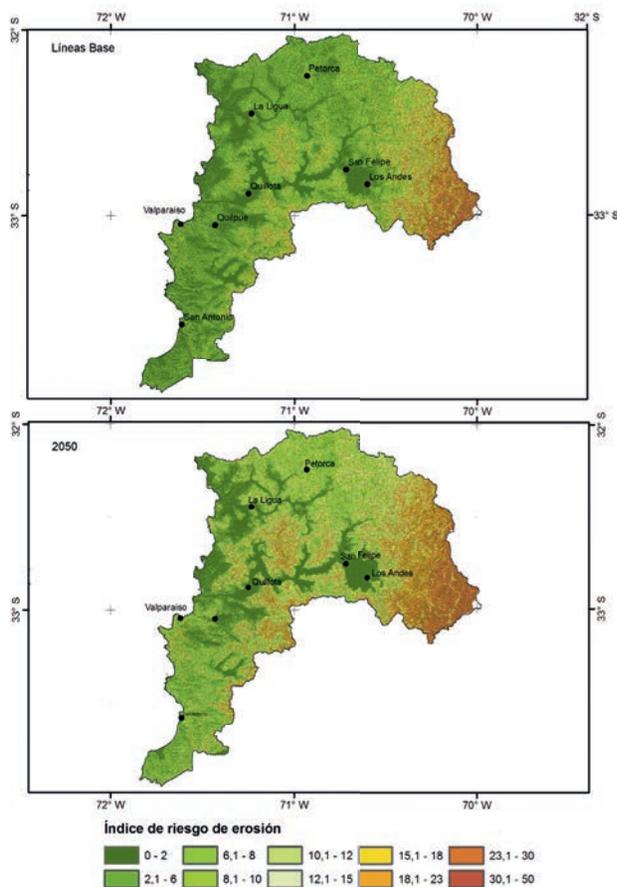


Figura 7.9. Índice de riesgo de erosión potencial. Región de Valparaíso. Colores verdes muestran zonas de bajo riesgo, mientras que las amarillas muestran riesgo medio y cafés riesgo alto.

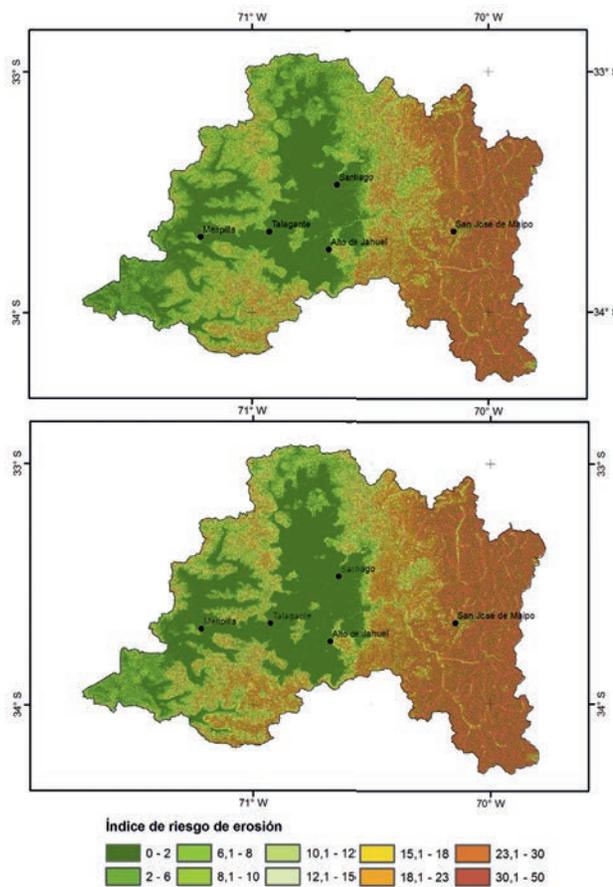


Figura 7.10. Índice de riesgo de erosión potencial. Región Metropolitana. Colores verdes muestran zonas de bajo riesgo, mientras que las amarillas muestran riesgo medio y cafés riesgo alto.

El riesgo de erosión aumenta generalizadamente en toda la región, particularmente en áreas de topografía compleja. Los riesgos de erosión y sedimentación podrían estar subestimados por este modelo en el escenario futuro, si se considera que este no tiene en cuenta

los cambios en la intensidad de la lluvia que podrían ser característicos de los nuevos escenarios. El deterioro de la cubierta vegetal podría dejar más descubiertos los suelos en el futuro, exponiéndolos a lluvias más intensas y erosivas.

➔ La Erosión de los Suelos en Cifras

En la región de Coquimbo, las pérdidas de suelos pueden llegar a las 20 Toneladas por hectárea y por año en sectores montañosos, mientras que en sectores de serranía ellas alcanzarían una cifra entre 2 y 10 Toneladas. En las zonas de cultivo en laderas (“lluvias” en las comunidades agrícolas) las pérdidas podrían alcanzar a 50 Toneladas por hectárea y año, lo que conduce a una fuerte degradación del suelo en un período de 15 a 20 años.



Una pérdida de 12 toneladas de sedimento por hectárea, representa un espesor de 1 mm de suelo. O sea, cuando se han perdido 50 Toneladas de sedimentos en un año, el suelo ha perdido más de 4 mm de espesor, es decir, en unos 50 años se habrán perdido los 20 primeros centímetros, tornando el suelo casi improductivo sólo en un par de generaciones humanas.

En la región de Valparaíso las pérdidas anuales de suelo van desde las 2 a las 50 Toneladas por hectárea año. Las regiones montañosas y los terrenos agrícolas en pendiente son los más afectados. Todo este sedimento va a los ríos, lagunas, lagos y embalses, y de ahí, parte llega al mar, contaminando los litorales.

En la región metropolitana, los frágiles suelos de la costa se erosionan

con gran facilidad, perdiendo 20 a 30 Toneladas por hectárea y año, especialmente cuando los suelos de la costa son cultivados en pendiente. Los suelos planos de los valles tienen pérdidas bajas por causas naturales, pero pueden llegar a ser muy altas cuando se aplican sistemas de riego ineficientes, con grandes caudales de agua que lavan los horizontes superficiales. Por la mayor pluviometría, la cordillera de la región

metropolitana es muy vulnerable a la erosión, lo que se ha exacerbado por la deforestación que han sufrido las cabeceras de los ríos Mapocho y Maipo. Los sedimentos de las partes altas de la cuenca es lo que torna café el color de las aguas de estos ríos.

→ La Urbanización de los Suelos Agrícolas

La ciudad de Santiago es aproximadamente responsable de 2/3 de todo el crecimiento urbano del país. El ritmo de crecimiento de la ciudad va en franca aceleración, haciendo imprevisible cuanto suelo terminará consumiendo esta ciudad en el futuro. Mientras en los años 50 se urbanizaban un poco menos de 400 hectáreas anuales, el ritmo actual a cuadruplicado esa cifra llegando a una 1800 hectáreas anuales que quedan bajo en cemento urbano. La mayor parte de esa superficie

corresponde a suelo agrícola muy fértil. Si bien a finales de la primera década del siglo el ritmo bajó un tanto debido al crecimiento en altura de la ciudad, la tendencia en el largo plazo es aún creciente y está lejos que mostrar signos de estabilización. Como promedio en la primera década de este siglo, Santiago creció a razón de 1465 hectáreas por año, es decir, 4 hectáreas (manzanas) por día. Baste recordar que en Santiago, cada manzana alberga en promedio unas 85 personas, lo que

significa unos 17 autos que se agregan a la ciudad por cada manzana que esta crece. Es decir, Santiago se ha tornado una ciudad incontrolable, que nadie quiere controlar y que será fuente de grandes problemas ambientales para las generaciones que vienen. Por las características de la cuenca de Santiago, la cual es cerrada, con pocos drenajes, poco ventilada, el cambio climático sólo acentuará los problemas de ella, tornándose cada día más vulnerable.

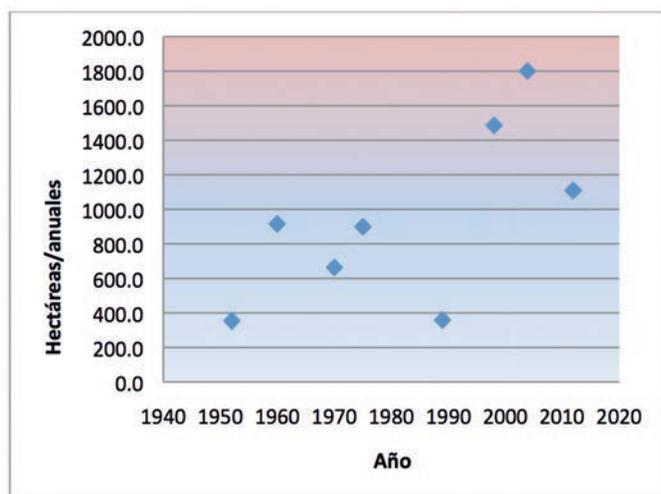


Figura 7.11. Tasa anual de crecimiento de la ciudad de Santiago

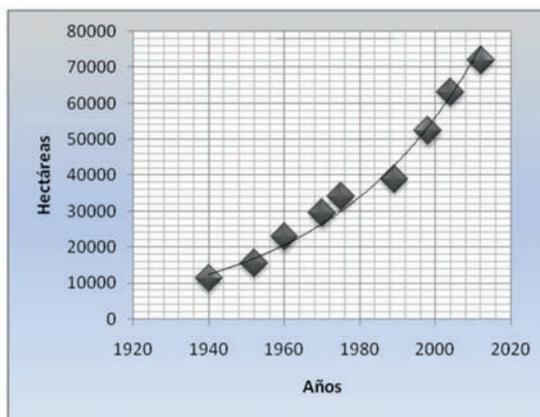


Figura 7.12. Superficie ocupada por la ciudad de Santiago y su crecimiento exponencial

→ Comentarios Finales

Los suelos de la Cordillera de la Costa y Precordillera de Los Andes son los más amenazados por la acción conjunta del ser humano y el cambio climático. Las zonas más críticas se encuentran en la Región Metropolitana, donde la mayor pluviometría constituye un factor de riesgo para los suelos.

Por las características del territorio nacional, la erosión de los suelos continuará siendo una amenaza creciente en la medida que se amplíe la frontera agropecuaria hacia el sur y la costa, como consecuencia de los nuevos escenarios climáticos que aumentarán el potencial agrícola de estos sectores. Este fenómeno continuará destruyendo el patrimonio natural de Chile, mientras la sociedad no tome conciencia de que se

trata de un problema grave e irreversible que amenaza a la agricultura y a los ecosistemas naturales.

Cuando la sociedad comprenda que está en juego su propia capacidad de producir alimentos y materias primas esenciales para la vida, habrá mayor interés por normar el tipo de uso del suelo, así como las prácticas de cultivo que garanticen la conservación del patrimonio.

Un factor adicional de degradación de los suelos lo constituye el acelerado ritmo de urbanización del espacio, particularmente en la región Metropolitana, lo que está poniendo en riesgo no sólo a la calidad de vida de sus habitantes, sino a los ecosistemas del entorno. El cambio climático podría traer lluvias más

intensas, acelerando el proceso de erosión de los suelos de la costa y la cordillera de los Andes, a la vez que acrecentando los riesgos para la población. Especial atención requerirían las cabeceras de las cuencas, debido a la deforestación y a la elevación de la línea de las nieves. Esto provocará mayores y más intensos escurrimientos de agua especialmente en invierno, pudiendo aumentar el riesgo de avalanchas e inundaciones.

Todo parece indicar que el cambio climático deberá mostrarnos el camino de la prudencia en materia de uso del territorio. En un ámbito de riego y de descapitalización del patrimonio natural, la gestión territorial deberá tomar especial importancia en las próximas décadas.

→ Referencias Bibliográficas

- ♦ Almorox J, De Antonio R, Saa A, Díaz Cruz M^a, Gascó J M^a. (1994). Métodos de Estimación de la Erosión Hídrica. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid, España.
- ♦ De Asis A.O. 2007. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear spectral mixture analysis of Landsat ETM data. ISPRS Journal of photogrammetry & remote Sensing , 309-324.
- ♦ Desmet P.J, Govers G. (1996). A GIS Procedure for Automatically Calculating the de USLE LS Factor Ontopographically Complex Landscapes Units. Journal of Soil and Water Conservation, 51:427-433.
- ♦ Gay, C. 1862. Agricultura Chilena. Primera Edición. Santiago.
- ♦ ICONA 1988. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdida de suelo.39p.
- ♦ Informe País Estado del Medio Ambiente en Chile. PNUMA (2005).
- ♦ Mitsova H. 1999. Using soil erosion modeling for improved conservation planning, a GIS-Based tutorial. Disponible en: <http://skagit.meas.ncsu.edu>. GIS tools for erosion/deposition modelling and multidimensional visualization. Part IV: Process erosion simulation geographic modelling and systems laboratory. University of Illinois. 20 p.
- ♦ Patriche C.C. 2006. Aspects regarding soil erosion spatial modeling using the USLE/RUSLE within GIS. Geographia Technica, 87-97.
- ♦ Wischmeier, W y D.D, Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook N° 537.



Capítulo 8

↳ Vulnerabilidad del
Sistema Agrícola

Paltos secos en el Valle de Petorca. Región de Valparaíso.

Introducción

➔ Los nuevos escenarios climáticos afectarán de diferente forma a las regiones agrícolas, dependiendo de las características ambientales, sociales, tecnológicas y económicas de esta actividad. El grado en que los cambios climáticos podrían afectar a la agricultura se resume en el concepto de vulnerabilidad. La vulnerabilidad es definida como el ámbito en el cual los sistemas sociales o naturales son susceptibles de sufrir daños provenientes del medio, en este caso, del Cambio Climático (IPCC, 2007). La vulnerabilidad es función de la sensibilidad de un sistema y del grado en el cual responderá a un cambio dado en el clima, incluyendo efectos beneficiosos o dañinos. La vulnerabilidad depende, entonces, de la capacidad de adaptación de una población a un nuevo escenario y de su resiliencia, es decir, de la capacidad de ésta para restituir las funciones alteradas por los nuevos escenarios climáticos. Ambos conceptos dependen básicamente de factores como disponibilidad de recursos, tecnología, la existencia de mercados, de conocimientos, aspectos culturales y la variedad de opciones que ofrece el potencial productivo de los recursos naturales.

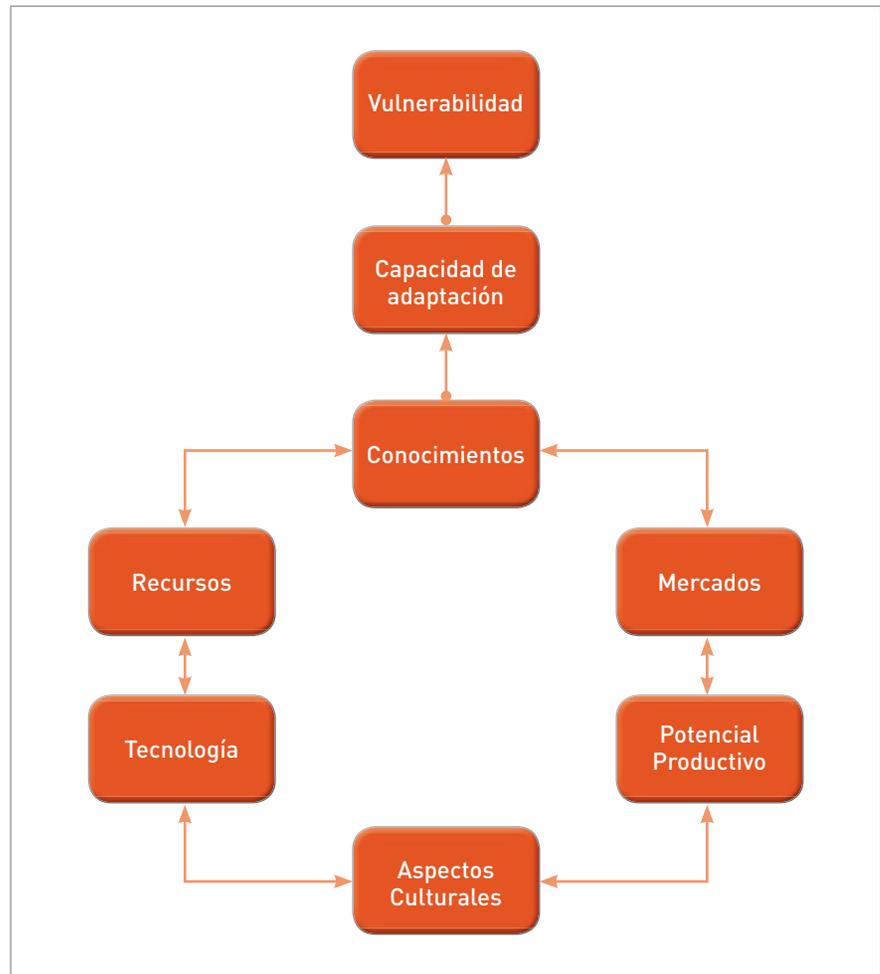


Figura 8.1: Vulnerabilidad de las comunidades frente a amenazas climáticas.

La región de Coquimbo presenta la mayor vulnerabilidad hídrica de la zona central, especialmente en zonas costeras, en donde se combina la condición de secano predominante y elevada aridez en el escenario futuro RCP 8.5 año 2050, sobre 11 meses secos al año. Las comunas costeras y con influencia marina de la región de Valparaíso corresponden a la zona con la segunda vulnerabilidad hídrica más elevada. En este sector se conjuga una elevada fracción de superficie en secano en el escenario actual y por otra parte, se verá afectada por la mayor disminución de las precipitaciones del país (en torno al 40%), junto a un alza de las temperaturas en torno a 2 a 3°C durante los meses de verano en el escenario RCP 8.5, aumentando así la cantidad de meses secos, desde 6 – 8 en el escenario actual a 7 – 9 meses en el escenario futuro. En el valle del Aconcagua se observa una vulnerabilidad hídrica media debido a la condición más árida en relación a los valles regados de más al sur, lo que es coherente con la percepción que existe sobre esta situación.

Las unidades de producción agrícola son menos vulnerables frente a los cambios climáticos, en la medida de que tengan acceso a los recursos hídricos, que le permiten independizarse de las variaciones estacionales de la lluvia.

➔ Índices de Fragmentación de la Tenencia de la Tierra (IF)

Normalmente la vulnerabilidad es mayor cuando la propiedad de la tierra está muy fragmentada y disminuye gradualmente hacia las propiedades de mayores dimensiones. Esto está asociado a la disponibilidad de recursos, los que generalmente son más limitados mientras más pequeña es la propiedad. De esta manera el índice considera más susceptibles a las comunas en donde domina el tipo de tenencia de pequeños agricultores.

Para el diseño de este índice se utilizó el valor de la "Hectárea de Riego Básico" definidas por el Ministerio de Agricultura. Este concepto se refiere a la Superficie equivalente a la potencialidad de producción de una hectárea física regada de clase I de capacidad de uso, del Valle del Río Maipo. Existen un coeficiente de conversión para cada comuna y cada zona agroclimática en el país. Existe un coeficiente de conversión para cada comuna y zona agroclimática del país, que puede ser obtenido a partir de una Tabla de Equivalencia de Hectáreas Físicas o Hectáreas de Riego Básico (en INDAP, 1993).

De acuerdo a la Ley Orgánica de INDAP, uno de los requisitos para ser usuario de este instituto es ex-

plotar una superficie no superior a 12 hectáreas de riego básico, cualquiera sea su régimen de tenencia, por lo tanto se consideró que bajo 12 ha de riego básico un propietario tiene vulnerabilidad máxima. Por otra parte, desde 200 hectáreas en adelante, la vulnerabilidad se consideró baja, ya que representa un tamaño suficientemente grande en función del régimen de tenencia de propiedad en Chile. El índice queda establecido de la siguiente manera:

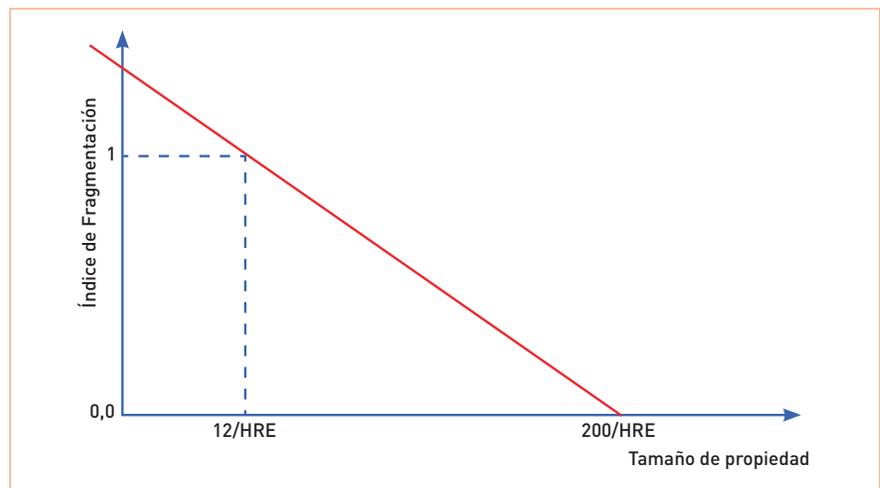


Figura 8.3. Relación entre el Índice de Fragmentación de tenencia de la tierra y el tamaño de propiedad.

$$IF = \frac{1}{\left(\frac{12}{HRE}\right) - \frac{200}{HRE}} * \left(Superficie - \frac{200}{HRE} \right)$$

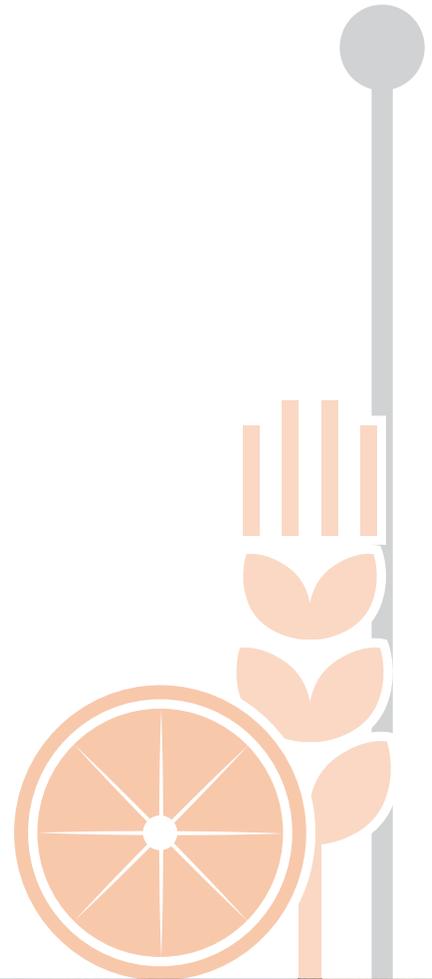
HRE= hectárea de riego básico.

El cálculo del Índice de Fragmentación final para cada comuna queda definido por:

$$IF = \sum_i^n \sum_j^m \beta_i (\alpha_j * IF_j)$$

→ Referencias Bibliográficas

- ♦ Fundación Chile. 2007. Agrogestión. [en línea]. Disponible en: <http://www.agrogestion.com/fichas.cfm>
- ♦ INDAP. 1993. Ley Orgánica del Instituto de Desarrollo Agropecuario (Ley 18910). Ministerio de Agricultura. 14 p.
- ♦ INDAP – PRODECOP, AGRIMED Universidad de Chile. 2001. Compendio de información ambiental, socioeconómica y silvoagropecuaria de la IV Región de Coquimbo. La Serena, Chile.
- ♦ IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ♦ PNUD. 2008. Desarrollo Humano rural en Chile. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Chile
- ♦ Santibáñez, F. 2005. Monitoreo de la desertificación mediante indicadores ambientales y sociales y métodos participativos: el sistema MONITOR. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 235-267.
- ♦ Santibáñez F, Santibáñez P. (2007) Trends in Land Degradation in Latin America and the Caribbean, the Role of Climate Change. Environmental Science and Engineering. Springer Berlin Heidelberg.



Paltos rebrotando en el Valle de Petorca. Región de Valparaíso.



Anexos

- Cartografía Climática de la Zona de Régimen Árido y Semiárido de Chile
- Parámetros Climáticos de localidades seleccionadas para el período línea base (1980-2010) y escenarios de cambio climático (RCP 8.5 2050)



→ Cartografía Climática de la Zona de Régimen Árido y Semiárido de Chile

A continuación se presentan las cartografías climáticas de temperatura máxima de enero, temperatura mínima de julio, precipitación anual, horas de frío base 7°C, días grado anuales base 10°C, número de días cálidos, número total de heladas, evapotranspiración de enero,

evapotranspiración anual, déficit hídrico anual e índice de aridez. Estas variables fueron modeladas para el periodo comprendido entre los años 1980 - 2010, y para el escenario futuro al año 2050 para la trayectoria de concentración RCP 8.5.

→ Escenario de Cambio Climático RCP

Los escenarios de cambio climático han sido generados considerando los nuevos RCP's (Representative Concentration Pathways) o trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero representativas adoptadas por el IPCC por su Quinto Informe de Evaluación (AR5). Dichos escenarios representan 4 trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero, las cuales a diferencia de las utilizadas con anterioridad, representan el efecto de distintas concentraciones de gases en la dinámica de la atmósfera y no sólo los volúmenes de emisiones de estos.

La trayectoria RCP,s utilizada para la elaboración de modelos climáticos y la evaluación de impactos en

el presente atlas, corresponde al RCP 8.5 para el año 2050, lo que significa considerar que el rango de valores de forzamiento radiativo para el año 2100, en este modelo es equivalente a 8,5 W/m². Esto significa que para entonces la atmosfera terrestre absorberá y convertirá en calor 8,5 Watts por cada m² de superficie, los que en el pasado escapaban al espacio exterior. Los 4 posibles escenarios futuros (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5) corresponden a posibles rangos aumentos de forzamiento radiativo en el año 2100 de 2,6, 4,5, 6,0, y 8,5 W/m² respectivamente, por lo cual el RCP 8.5 es el escenario más extremo y el cual ha demostrado ser el de mayor probabilidad de ocurrencia según las tendencias actuales de las emisiones de gases por parte de la humanidad.



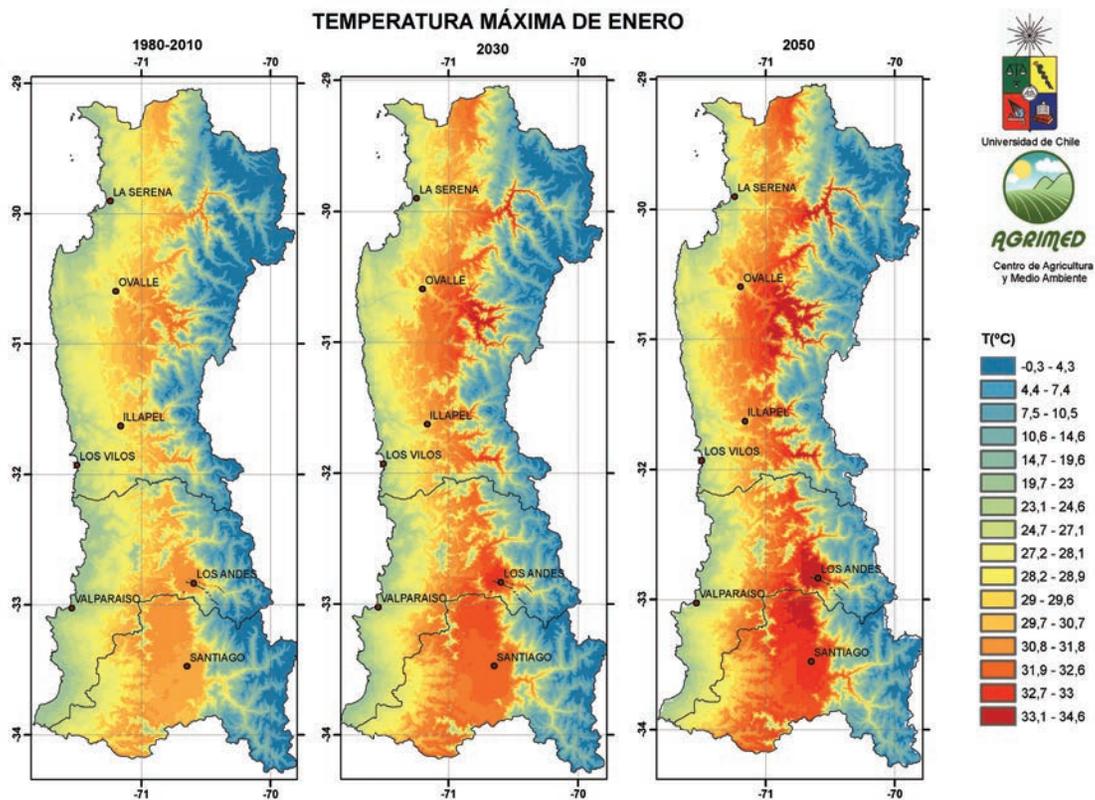


Figura A1. Temperatura máxima de enero de la Zona Central para la línea base y para los escenarios 2030 y 2050.

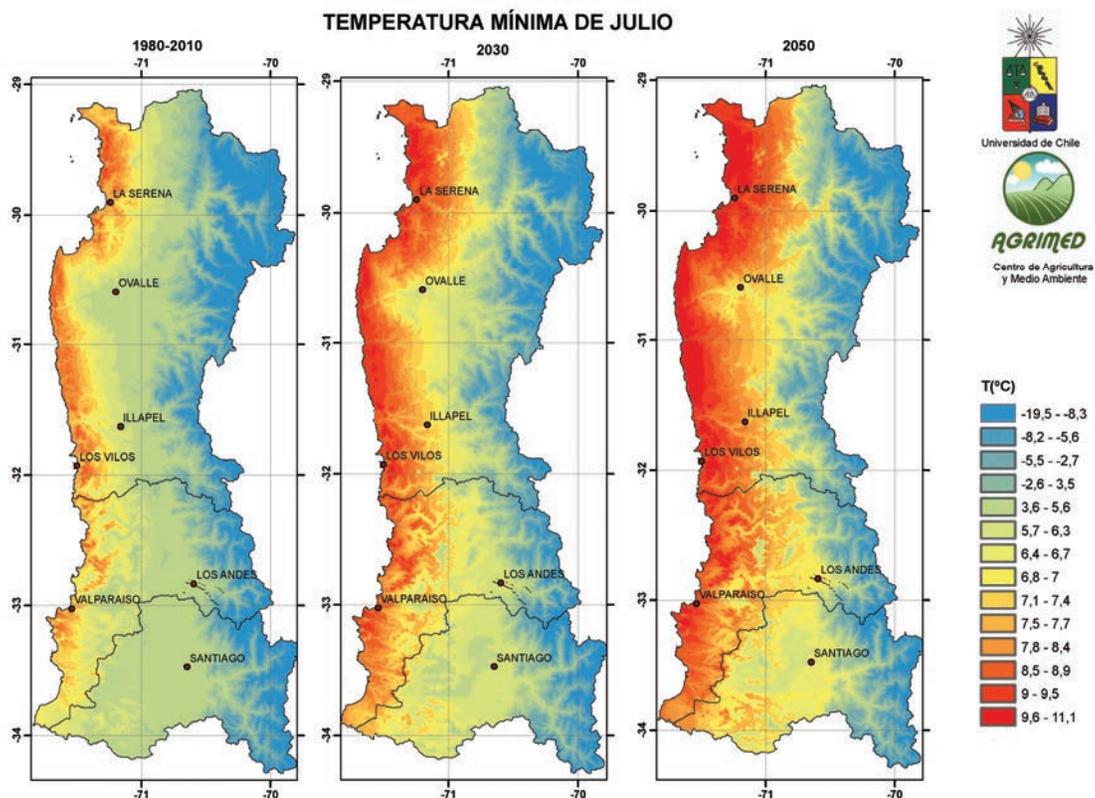


Figura A2. Temperatura mínima de julio de la Zona Central para la línea base y para los escenarios 2030 y 2050.

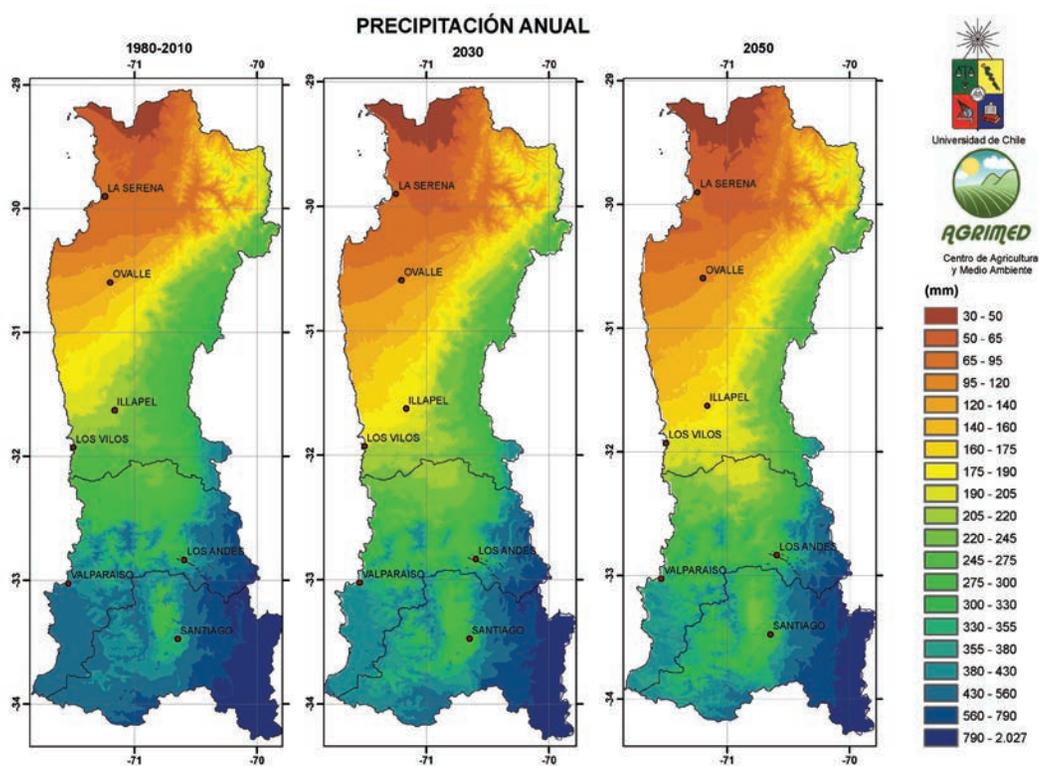


Figura A3. Precipitación anual de la Zona Central para la línea base y para los escenarios 2030 y 2050.

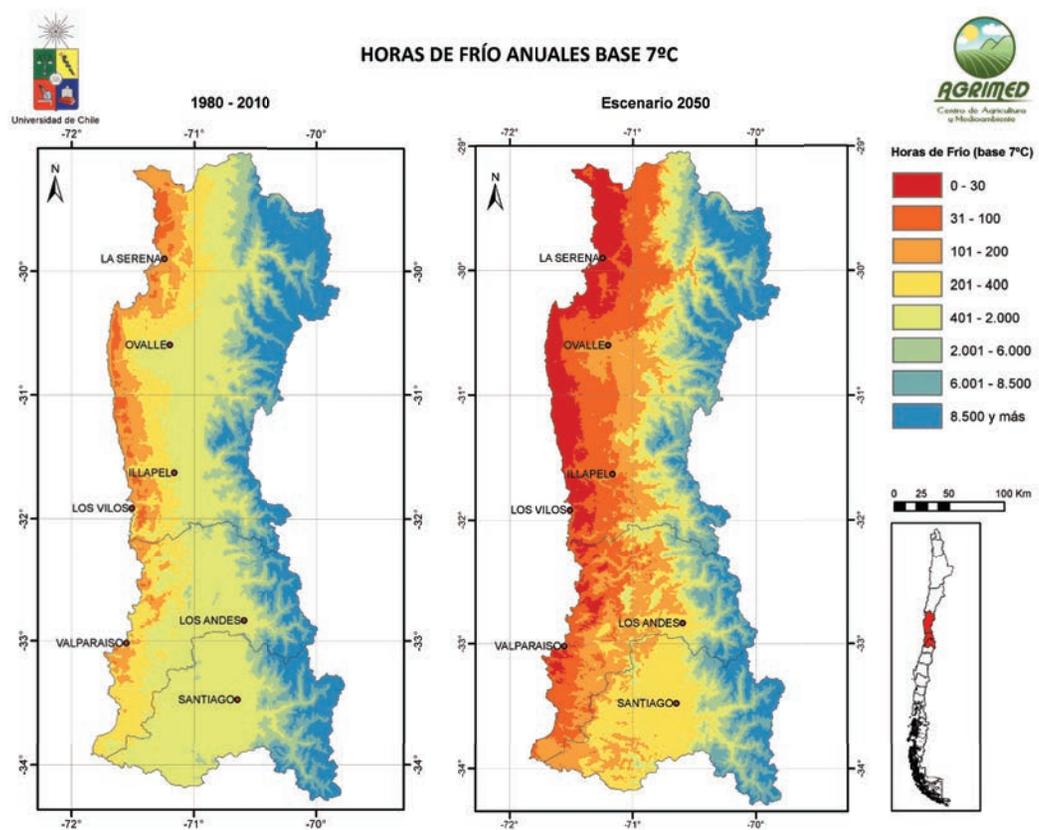


Figura A4. Horas de frío de la Zona Central para la línea base y para el escenario 2050.

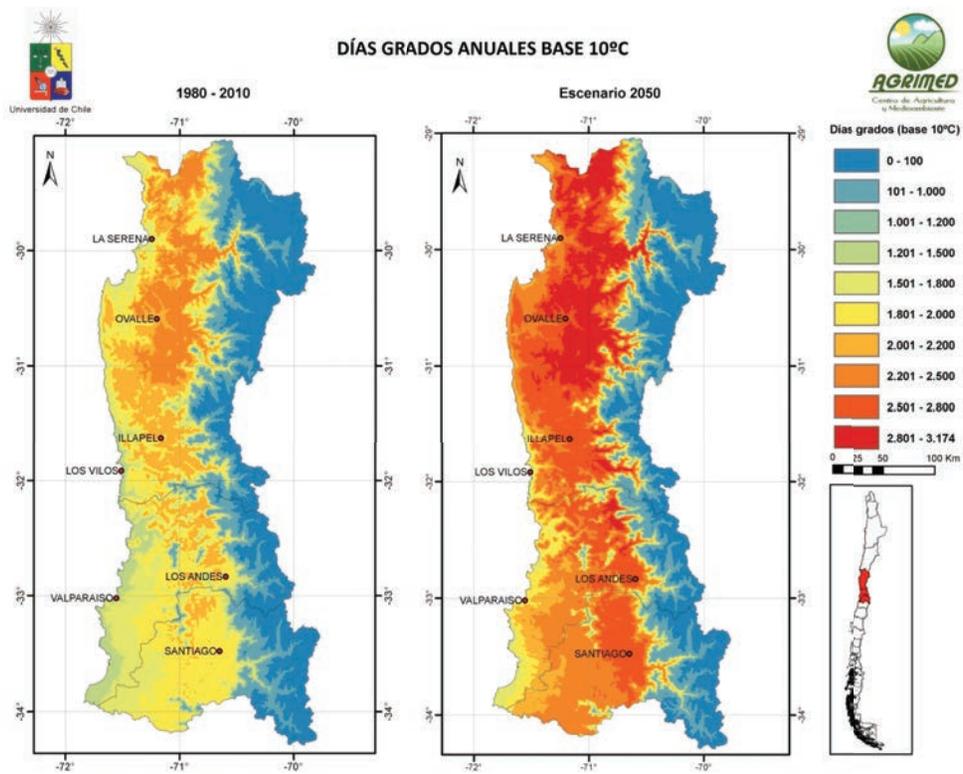


Figura A5. Cambios en el los días grados de la Zona Central para la línea base y para los escenarios 2030 y 2050.

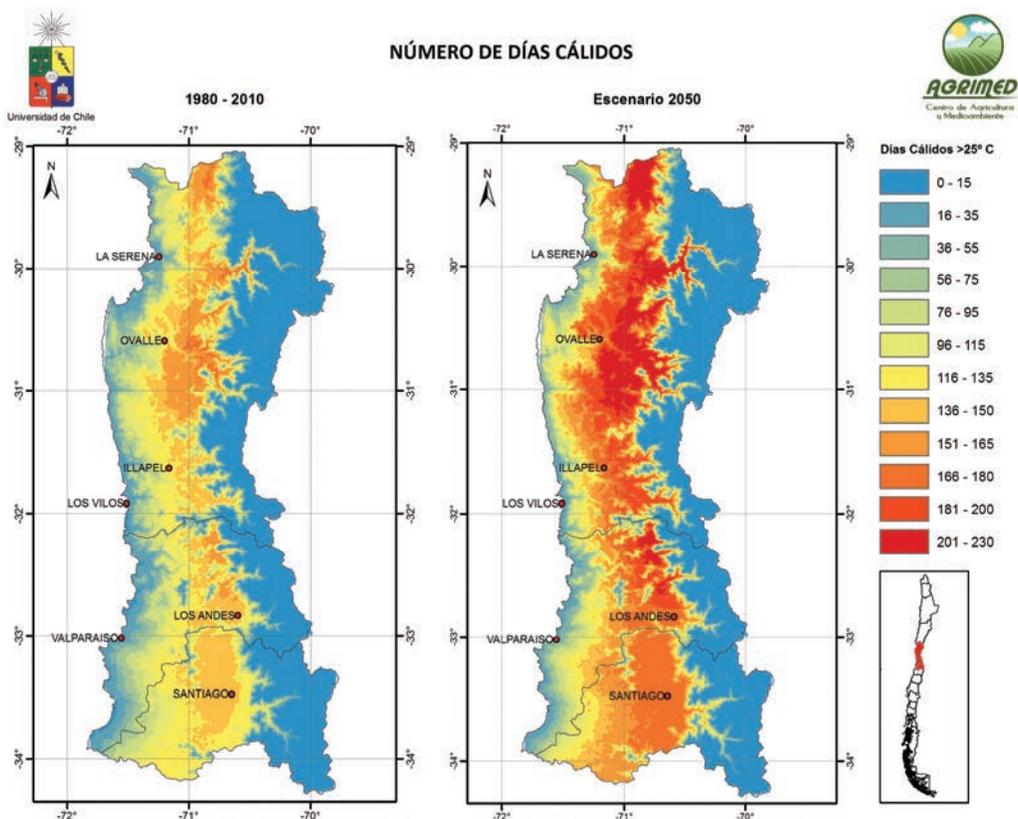


Figura A6. Cambios en el número de días cálidos entre línea base y escenario 2050



Universidad de Chile



AGRIMED
Centro de Agricultura
y Medioambiente

NÚMERO TOTAL DE HELADAS

1980 - 2010

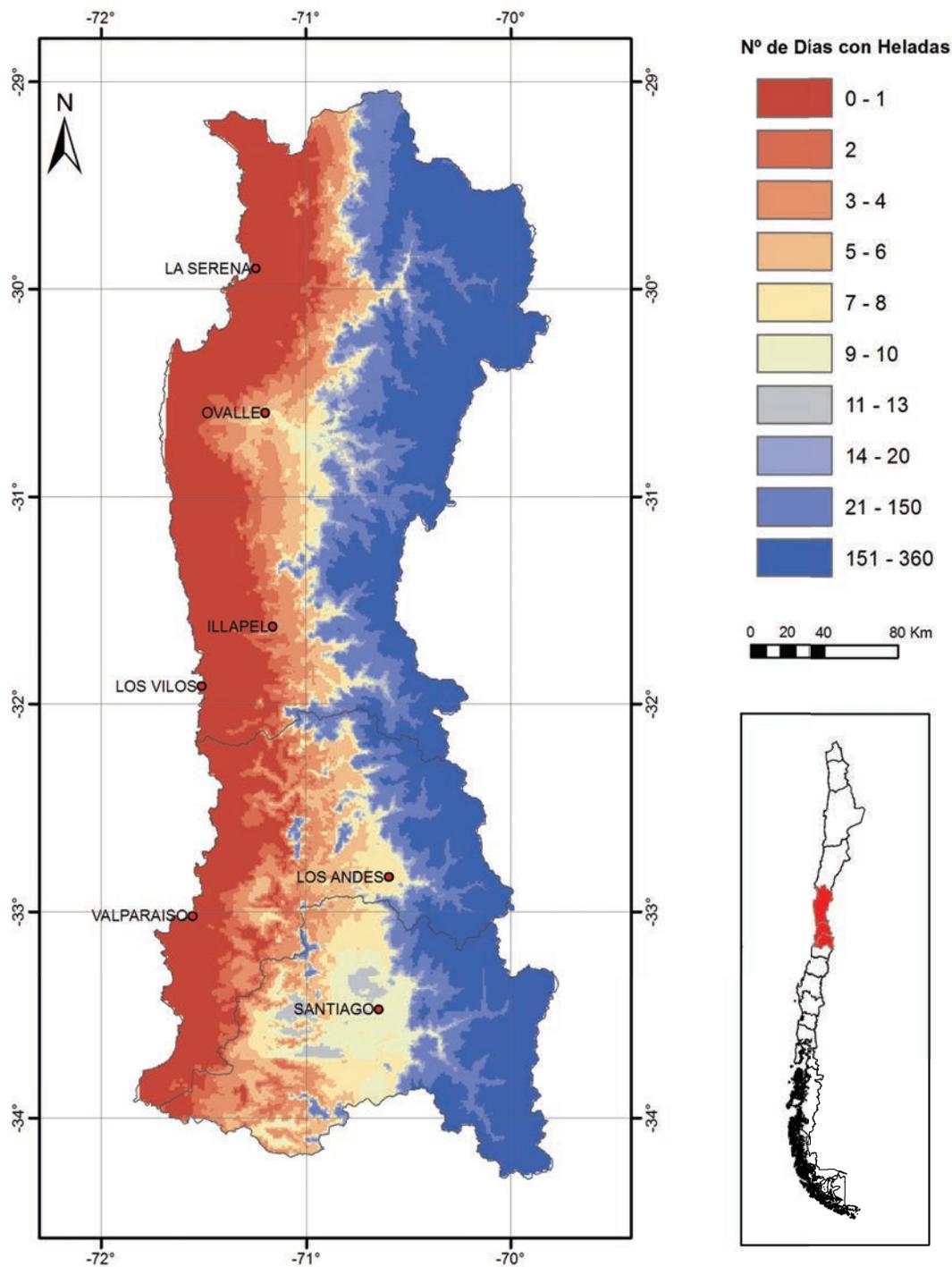


Figura A7. Número de heladas anual periodo 1980 - 2010.

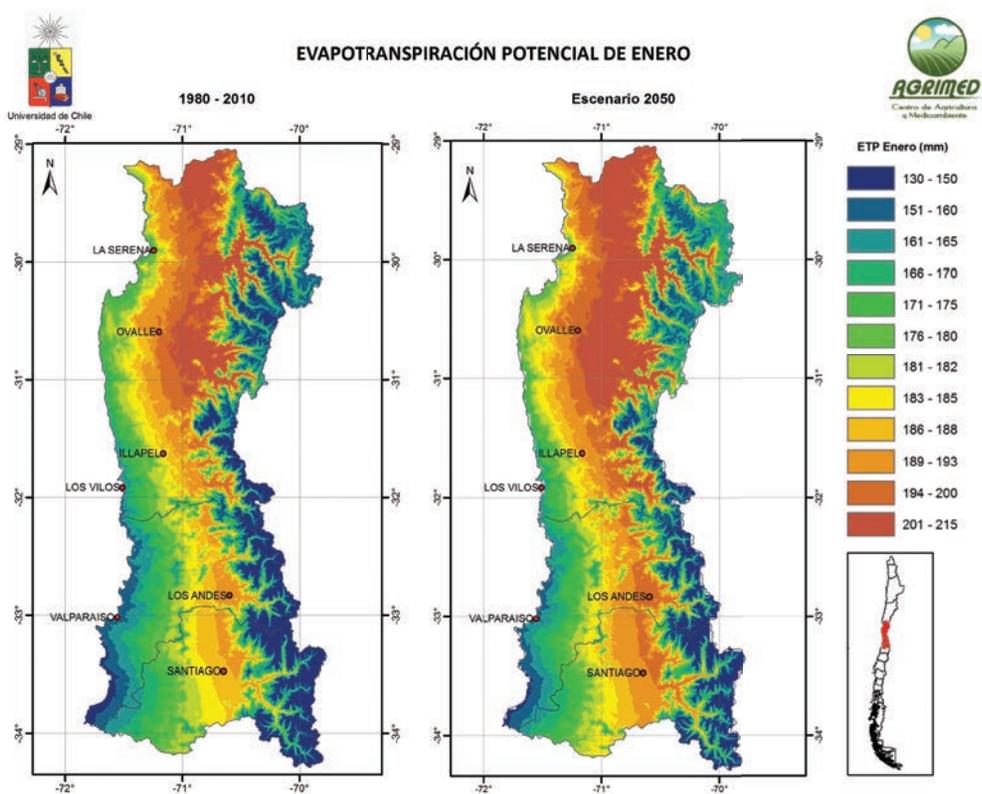


Figura A8. Cambios en la evapotranspiración potencial de enero entre línea base y escenario 2050

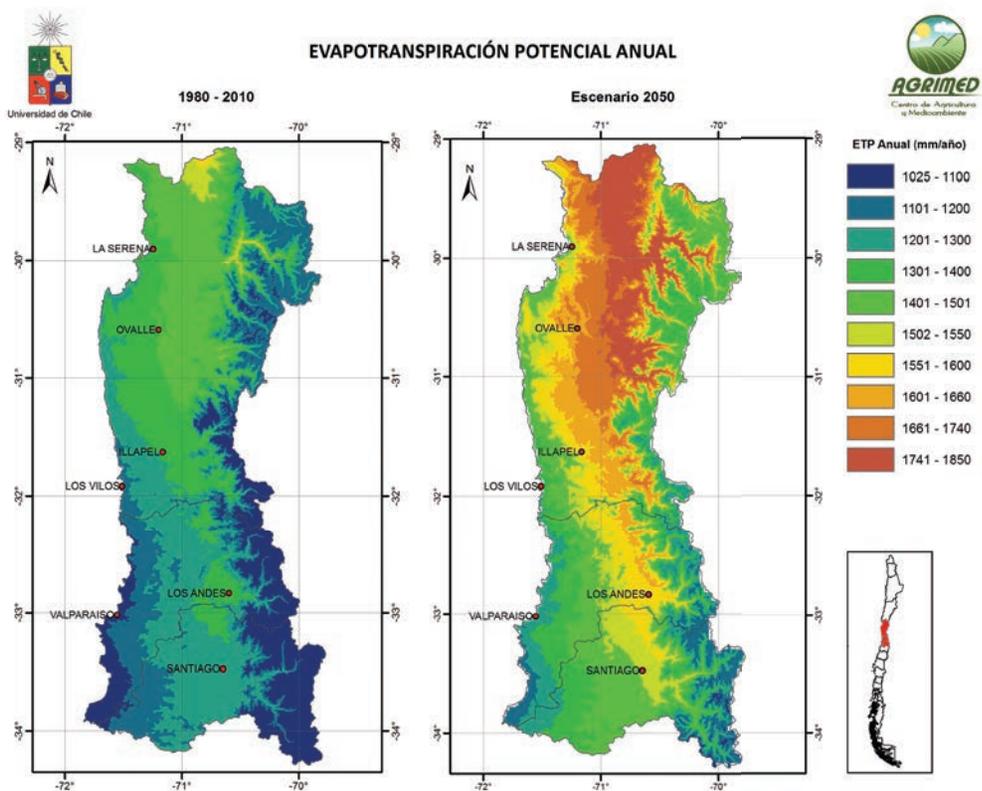


Figura A9. Cambios en la evapotranspiración potencial anual entre línea base y escenario 2050

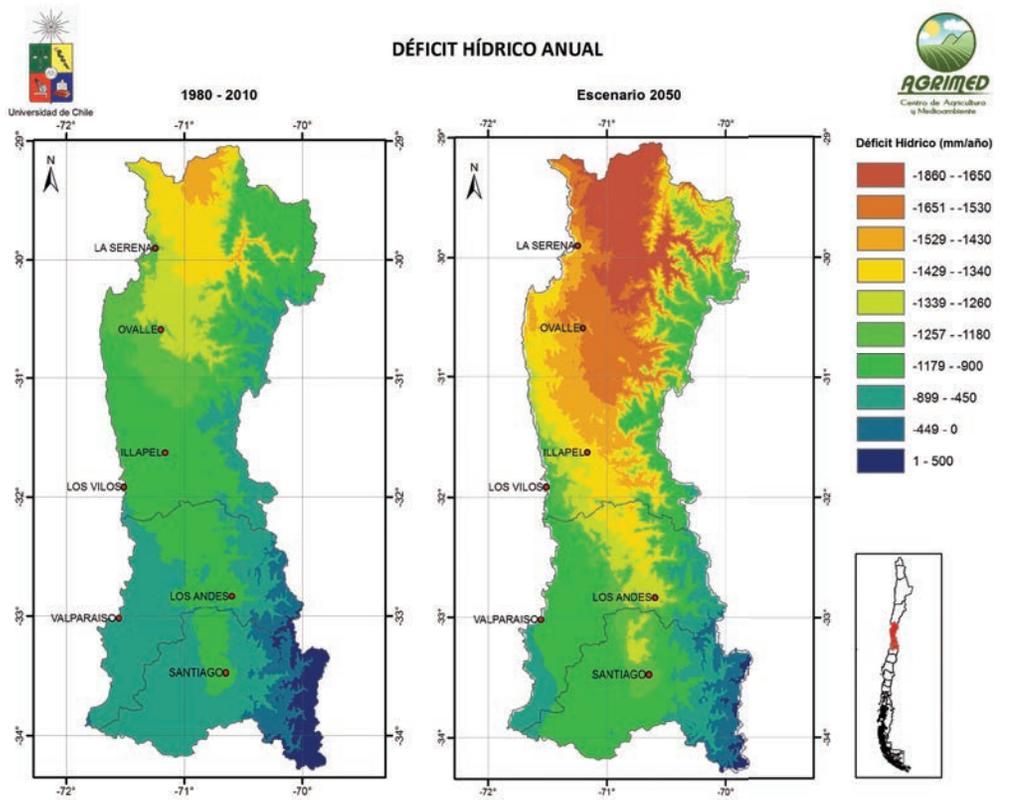


Figura A10. Cambios en el déficit hídrico anual entre línea base y escenario 2050

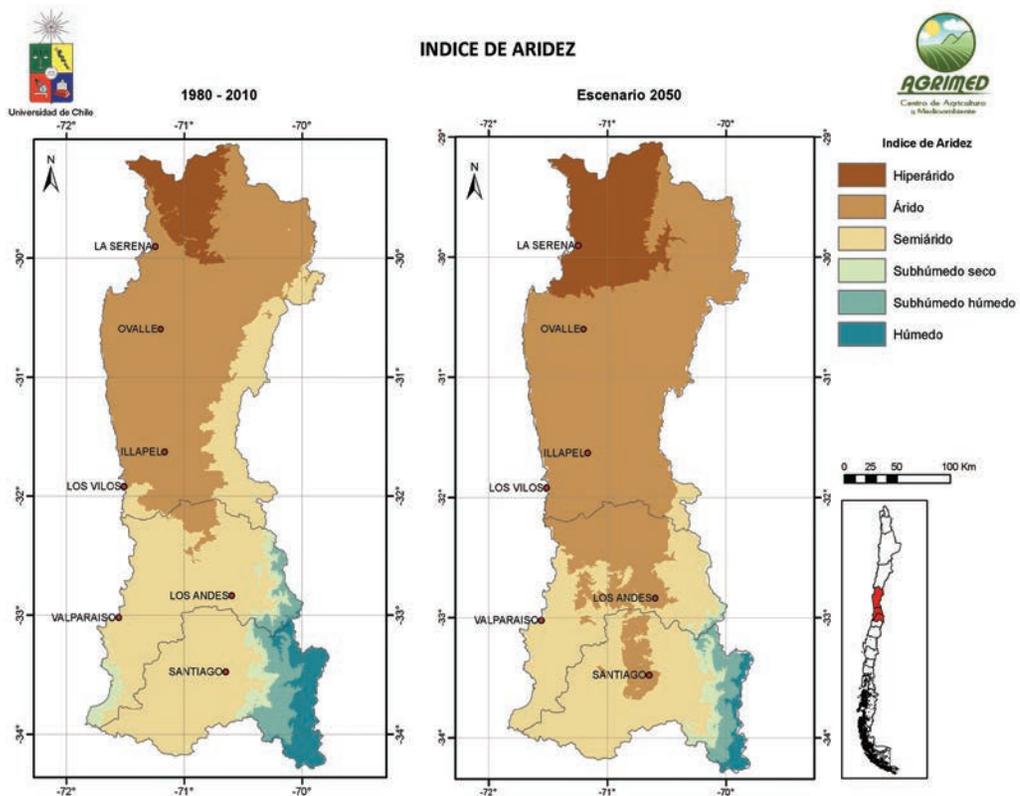


Figura A11.: Índice de aridez para línea base y escenario 2050

Parámetros climáticos actuales y variaciones esperadas para el 2050 en localidades seleccionadas

→ La Serena (Lat-29.91, Lon -71.25)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	21.6	21.1	19.9	18.2	16.5	15.3	14.8	14.8	15.8	17.5	19.5	21	18	°C
T. MIN	14.4	13.9	12.7	10.9	9.2	8	7.5	8	8.8	10.6	12.4	13.9	10.9	°C
T. MED	17.2	16.8	15.6	13.9	12.3	11.1	10.6	10.9	11.8	13.4	15.2	16.7	13.8	°C
Días GRADO	216	203	167	118	74	55	49	50	64	102	157	200	1454	D.G
DG.ACUM.	675	877	1044	1161	1235	1290	1339	1390	1454	102	259	459	1454	D.G
D-CÁLIDOS	4	4	2	0	0	0	0	0	0	0	1	3	15	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	11	43	63	45	19	0	0	0	182	Horas
HRS.FRES	0	0	5	39	117	316	367	332	196	56	8	0	1436	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	11	54	117	163	181	182	182	182	182	Horas
R. SOLAR	538	516	455	371	288	227	205	227	288	372	455	516	372	Ly/día
H. RELAT.	77	77	78	79	79	80	80	79	79	78	77	77	78	%
PRECIPIT.	0	0.3	0.2	2.5	17.5	22.2	17.4	15.1	3.7	1.9	0.4	0.2	81.4	mm
EVAP.POT.	168	159.4	136	104	72	48.6	40	48.6	72	104	136	159.4	1248	mm
DEF.HIDR.	168	159.1	135.8	101.5	54.5	26.4	22.6	33.5	68.3	102.1	135.6	159.2	1166.6	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.02	0.24	0.46	0.44	0.31	0.05	0.02	0	0	0.07	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0.2	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	23.3	22.9	21.6	20	18.3	17.1	16.7	16.7	17.7	19.3	21.2	22.7	19.8	°C
T. MIN	16.1	15.7	14.4	12.7	11.1	9.8	9.4	9.8	10.7	12.4	14.2	15.6	12.7	°C
T. MED	18.8	18.4	17.2	15.6	14.1	12.9	12.5	12.7	13.5	15.1	16.9	18.3	15.5	°C
Días GRADO	264	252	217	169	122	86	78	81	106	154	207	249	1984	D.G
DG.ACUM.	874	1126	1342	1512	1633	1719	1797	1878	1984	154	361	610	1984	D.G
D-CÁLIDOS	9	8	5	2	0	0	0	0	0	1	4	7	36	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	0	4	9	4	0	0	0	0	17	Horas
HRS.FRES	0	0	0	4	35	26	93	27	50	8	0	0	245	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	0	4	12	16	17	17	17	17	17	Horas
PRECIPIT.	0	0.3	0.2	2	14.1	17.9	14.1	12.2	3	1.5	0.3	0.1	65.7	mm
EVAP.POT.	196.6	186.6	159.3	122.1	84.8	57.6	47.6	57.6	84.9	122.1	159.4	186.6	1465.2	mm
DEF.HIDR.	196.6	186.3	159.1	120.1	70.7	39.7	33.5	45.4	81.9	120.6	159.1	186.5	1399.5	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.02	0.17	0.31	0.3	0.21	0.04	0.01	0	0	0.04	pp/etp

→ Monte Grande (Lat-30.1, Lon-70.5)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.9	30	27.4	23.9	20.5	17.9	17	17.5	19.8	23.3	27	29.8	23.8	°C
T. MIN	11.6	11.1	9.7	7.7	5.8	4.4	3.9	4.4	5.4	7.4	9.4	11	7.7	°C
T. MED	20.3	19.6	17.7	15.1	12.6	10.7	10	10.5	12.1	14.6	17.4	19.5	15	°C
Días GRADO	309	288	246	157	98	68	59	64	90	144	232	285	2039	D.G
DG.ACUM.	970	1258	1504	1661	1760	1827	1886	1950	2039	144	376	661	2039	D.G
D-CÁLIDOS	28	27	22	11	2	0	0	0	2	9	21	27	151	Días
HRS.FRIO	0	0	2	24	91	227	276	234	119	32	4	0	1009	Horas
HRS.FRES	9	14	23	161	321	52	95	54	348	196	40	15	1328	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	91	318	594	828	947	979	983	983	1009	Horas
R. SOLAR	656	626	545	434	324	243	213	243	324	435	545	626	435	Ly/día
H. RELAT.	48	48	48	49	49	49	49	48	48	48	48	48	48	%
PRECIPIT.	0.1	0.4	0.3	3.1	20.8	26.4	20.8	18	4.5	2.3	0.5	0.3	97.5	mm
EVAP.POT.	188	178.1	151	114	77	49.9	40	49.9	77	114	151	178.1	1368	mm
DEF.HIDR.	187.9	177.7	150.7	110.9	56.2	23.5	19.2	31.9	72.5	111.7	150.5	177.8	1270.5	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.03	0.27	0.53	0.52	0.36	0.06	0.02	0	0	0.07	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0.1	1.1	3.6	5.1	3.7	1.6	0.2	0	0	15.3	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	33.4	32.5	30	26.6	23.2	20.7	19.8	20.3	22.5	25.9	29.6	32.4	26.4	°C
T. MIN	14	13.5	12.1	10.3	8.4	7.1	6.6	7.1	8.1	9.9	11.9	13.4	10.2	°C
T. MED	22.6	22	20.1	17.6	15.1	13.3	12.6	13.1	14.6	17.1	19.8	21.9	17.5	°C
Días GRADO	379	359	304	229	155	109	95	104	141	224	294	356	2748	D.G
DG.ACUM.	1253	1612	1915	2144	2299	2408	2503	2607	2748	224	518	874	2748	D.G
D-CÁLIDOS	29	29	27	20	9	3	1	2	7	18	27	29	202	Días
HRS.FRIO	0	0	0	1	14	47	67	48	21	2	0	0	200	Horas
HRS.FRES	0	0	5	31	115	251	296	259	154	7	7	0	1126	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	14	61	129	177	198	199	199	199	200	Horas
PRECIPIT.	0.1	0.4	0.3	2.6	17.8	22.6	17.8	15.4	3.8	2	0.4	0.2	83.4	mm
EVAP.POT.	235	222.7	189	143.1	97.1	63.5	51.2	63.5	97.2	143.1	189.1	222.7	1717.2	mm
DEF.HIDR.	234.9	222.3	188.7	140.5	79.3	40.9	33.4	48.1	93.4	141.1	188.7	222.5	1633.8	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.02	0.18	0.36	0.35	0.24	0.04	0.01	0	0	0.05	pp/etp

→ Andacollo (Lat-30.24, Lon-71.08)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	28.8	28.1	26.1	23.4	20.7	18.7	18	18.3	20	22.7	25.7	28	23.2	°C
T. MIN	13.1	12.7	11.4	9.7	8.1	6.8	6.4	6.8	7.7	9.4	11.2	12.6	9.7	°C
T. MED	20	19.4	17.9	15.8	13.7	12.2	11.7	12	13.2	15.3	17.6	19.4	15.7	°C
Días GRADO	300	283	238	177	117	85	76	81	105	160	227	281	2129	D.G
DG.ACUM.	968	1252	1489	1666	1783	1868	1944	2024	2129	160	388	668	2129	D.G
D-CÁLIDOS	25	24	19	10	3	1	0	0	2	7	17	24	132	Días
HRS.FRIO	0	0	0	3	24	64	88	67	33	5	0	0	285	Horas
HRS.FRES	1	3	14	23	179	303	342	313	222	57	18	3	1477	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	24	88	176	243	276	282	282	282	285	Horas
R. SOLAR	602	577	508	415	321	253	228	253	322	415	509	577	415	Ly/día
H. RELAT.	66	66	67	68	68	69	69	68	68	67	66	66	67	%
PRECIPIT.	0.1	0.4	0.3	3.1	20.7	26.2	20.7	17.9	4.5	2.4	0.5	0.3	97.1	mm
EVAP.POT.	189	179.3	152.7	116.5	80.2	53.7	44	53.7	80.3	116.5	152.8	179.3	1398	mm
DEF.HIDR.	188.9	178.9	152.4	113.4	59.5	27.5	23.3	35.8	75.8	114.1	152.3	179	1300.9	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.03	0.26	0.49	0.47	0.33	0.06	0.02	0	0	0.07	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0	0.3	0.6	0.3	0.1	0	0	0	1.4	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.6	29.9	28	25.3	22.7	20.8	20.1	20.4	22.1	24.7	27.5	29.8	25.2	°C
T. MIN	14.8	14.4	13.2	11.7	10.1	9	8.6	9	9.8	11.3	13	14.3	11.6	°C
T. MED	21.7	21.1	19.7	17.7	15.7	14.2	13.7	14	15.2	17.2	19.3	21.1	17.6	°C
Días GRADO	350	334	291	231	171	127	114	121	155	216	280	332	2722	D.G
DG.ACUM.	1178	1512	1803	2034	2205	2332	2446	2567	2722	216	496	828	2722	D.G
D-CÁLIDOS	28	27	24	16	7	3	2	2	6	14	23	27	178	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	1	10	16	10	3	0	0	0	40	Horas
HRS.FRES	0	0	1	11	45	95	137	98	24	17	1	0	429	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	1	11	27	37	40	40	40	40	40	Horas
PRECIPIT.	0.1	0.4	0.3	2.5	16.7	21.2	16.7	14.4	3.6	1.9	0.4	0.2	78.4	mm
EVAP.POT.	223	211.6	180.5	138.1	95.6	64.6	53.2	64.6	95.7	138.1	180.6	211.6	1657.2	mm
DEF.HIDR.	222.9	211.2	180.2	135.6	78.9	43.4	36.5	50.2	92.1	136.2	180.2	211.4	1578.8	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.02	0.17	0.33	0.31	0.22	0.04	0.01	0	0	0.05	pp/etp

→ Ovalle (Lat-30.60, Lon-71.20)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	28.4	27.6	25.6	22.8	20	18	17.2	17.5	19.3	22.1	25.2	27.5	22.6	°C
T. MIN	13.5	12.9	11.2	9	6.7	5.1	4.5	5.1	6.4	8.6	11	12.8	8.9	°C
T. MED	20	19.4	17.6	15.2	12.8	11	10.4	10.8	12.3	14.7	17.3	19.3	15	°C
Días GRADO	300	281	228	156	99	70	62	66	89	141	218	278	1988	D.G
DG.ACUM.	938	1218	1446	1602	1701	1771	1833	1899	1988	141	359	637	1988	D.G
D-CÁLIDOS	25	23	17	8	2	0	0	0	1	6	16	23	120	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	9	61	173	233	180	80	13	0	0	749	Horas
HRS.FRES	0	2	17	84	284	396	48	405	317	113	21	2	1687	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	61	234	467	647	727	740	740	740	749	Horas
R. SOLAR	622	596	526	430	334	264	238	264	334	430	526	596	430	Ly/día
H. RELAT.	61	61	63	64	66	67	67	66	65	63	62	61	64	%
PRECIPIT.	0.2	0.7	0.6	4.7	29.3	36.8	29.2	25.2	6.6	3.5	0.9	0.5	138.2	mm
EVAP.POT.	199	188.7	160.5	122	83.5	55.3	45	55.3	83.5	122	160.5	188.7	1464	mm
DEF.HIDR.	198.8	188	159.9	117.3	54.2	18.5	15.8	30.1	76.9	118.5	159.6	188.2	1325.8	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.04	0.35	0.67	0.65	0.46	0.08	0.03	0	0	0.09	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.4	2.1	3.5	2.2	0.6	0	0	0	8.8	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.2	29.5	27.5	24.7	22	20	19.3	19.6	21.4	24.1	27	29.3	24.6	°C
T. MIN	15.2	14.6	13.1	10.9	8.8	7.3	6.7	7.3	8.4	10.6	12.8	14.6	10.9	°C
T. MED	21.7	21.1	19.4	17	14.7	13	12.4	12.8	14.2	16.5	19	21	16.9	°C
Días GRADO	350	332	281	211	142	102	91	97	129	196	271	329	2532	D.G
DG.ACUM.	1146	1478	1759	1970	2113	2215	2306	2403	2532	196	467	796	2532	D.G
D-CÁLIDOS	27	27	23	14	5	2	1	1	4	12	21	26	164	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	0	11	44	66	46	17	0	0	0	185	Horas
HRS.FRES	0	0	1	22	100	252	300	260	136	31	2	0	1105	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	11	55	122	168	184	185	185	185	185	Horas
PRECIPIT.	0.2	0.6	0.5	3.8	23.5	29.6	23.5	20.2	5.3	2.8	0.7	0.4	111.1	mm
EVAP.POT.	234.8	222.7	189.7	144.6	99.6	66.6	54.5	66.6	99.6	144.7	189.7	222.7	1735.8	mm
DEF.HIDR.	234.6	222.1	189.2	140.8	76.1	37	31	46.4	94.3	141.9	189	222.3	1624.7	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.03	0.24	0.44	0.43	0.3	0.05	0.02	0	0	0.06	pp/etp

→ Monte Patria (Lat-30.70, Lon-70.96)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30	29.2	26.8	23.7	20.5	18.2	17.4	17.8	19.9	23	26.4	29	23.5	°C
T. MIN	13.4	12.8	11	8.7	6.3	4.6	4	4.6	6	8.3	10.8	12.7	8.6	°C
T. MED	20.7	20	18.1	15.5	12.8	10.9	10.2	10.7	12.3	15	17.8	19.9	15.3	°C
Días GRADO	322	301	243	165	102	71	62	67	93	151	233	298	2108	D.G
DG.ACUM.	1003	1304	1547	1712	1814	1886	1948	2015	2108	151	383	681	2108	D.G
D-CÁLIDOS	27	26	21	11	2	0	0	0	2	8	20	26	143	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	11	73	207	263	214	85	16	0	0	868	Horas
HRS.FRES	0	2	18	98	295	34	86	35	325	126	22	2	1044	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	73	279	542	756	841	857	857	857	868	Horas
R. SOLAR	647	620	545	444	342	268	241	268	343	444	546	620	444	Ly/día
H. RELAT.	54	54	56	57	59	60	60	59	58	56	55	54	57	%
PRECIPIT.	0.2	0.7	0.7	4.8	29.5	37.1	29.4	25.4	6.8	3.6	1	0.6	139.8	mm
EVAP.POT.	219	207.7	176.7	134.5	92.2	61.3	50	61.3	92.3	134.5	176.8	207.7	1614	mm
DEF.HIDR.	218.8	207	176	129.7	62.7	24.2	20.6	35.9	85.5	130.9	175.8	207.1	1474.2	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.04	0.32	0.61	0.59	0.41	0.07	0.03	0	0	0.09	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.6	3.1	4.8	3.2	0.9	0	0	0	12.6	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	31.9	31.1	28.8	25.8	22.7	20.5	19.7	20.1	22.1	25.1	28.4	31	25.6	°C
T. MIN	15.2	14.6	13	10.8	8.7	7.1	6.5	7.1	8.3	10.5	12.8	14.5	10.8	°C
T. MED	22.5	21.8	20	17.5	15	13.2	12.5	13	14.5	17	19.7	21.7	17.4	°C
Días GRADO	375	355	300	225	151	107	94	102	137	210	290	352	2696	D.G
DG.ACUM.	1226	1581	1881	2106	2257	2364	2457	2559	2696	210	500	852	2696	D.G
D-CÁLIDOS	29	28	26	18	7	2	1	2	6	15	25	28	188	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	0	12	48	72	50	18	0	0	0	200	Horas
HRS.FRES	0	0	1	22	105	255	303	263	140	31	2	0	1124	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	12	60	132	181	199	200	200	200	200	Horas
PRECIPIT.	0.2	0.6	0.5	3.7	22.6	28.5	22.5	19.4	5.2	2.8	0.8	0.4	107.2	mm
EVAP.POT.	260.6	247.3	210.8	161	111.3	74.8	61.5	74.8	111.3	161.1	210.8	247.3	1932.6	mm
DEF.HIDR.	260.4	246.7	210.3	157.3	88.7	46.3	39	55.4	106.1	158.3	210	246.9	1825.4	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.02	0.2	0.38	0.37	0.26	0.05	0.02	0	0	0.06	pp/etp

→ Punitaqui (Lat-30.83, Lon-71.26)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	26.9	26.2	24.4	21.9	19.4	17.6	16.9	17.1	18.7	21.2	24	26.1	21.7	°C
T. MIN	14.2	13.6	11.8	9.5	7.1	5.4	4.8	5.4	6.8	9.1	11.6	13.5	9.4	°C
T. MED	19.6	19	17.3	15	12.7	11	10.4	10.8	12.2	14.5	17	18.9	14.9	°C
Días GRADO	289	270	219	149	94	68	60	64	85	134	209	267	1909	D.G
DG.ACUM.	900	1170	1389	1538	1633	1700	1760	1824	1909	134	344	611	1909	D.G
D-CÁLIDOS	21	19	13	5	1	0	0	0	1	4	11	19	94	Días
HRS.FRIO	0	0	0	5	50	148	216	155	67	8	0	0	649	Horas
HRS.FRES	0	0	10	49	272	392	21	402	308	84	14	0	1552	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	50	198	414	569	636	645	645	645	649	Horas
R. SOLAR	601	575	504	407	310	239	213	239	310	407	504	575	407	Ly/día
H. RELAT.	63	63	65	66	68	69	69	68	67	65	64	63	66	%
PRECIPIT.	0.3	0.9	0.8	5.4	32.4	40.7	32.3	27.8	7.5	4	1.1	0.6	153.8	mm
EVAP.POT.	197	186.6	158.2	119.5	80.7	52.4	42	52.4	80.8	119.5	158.3	186.6	1434	mm
DEF.HIDR.	196.7	185.7	157.4	114.1	48.3	11.7	9.7	24.6	73.3	115.5	157.2	186	1280.2	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.05	0.4	0.78	0.77	0.53	0.09	0.03	0	0	0.11	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.2	1.6	2.8	1.6	0.4	0	0	0	6.6	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	28.7	28.1	26.3	23.9	21.5	19.7	19.1	19.3	20.8	23.2	25.9	27.9	23.7	°C
T. MIN	16	15.4	13.7	11.4	9.2	7.5	6.9	7.5	8.8	11.1	13.5	15.3	11.4	°C
T. MED	21.3	20.7	19.1	16.9	14.6	13	12.4	12.8	14.1	16.4	18.8	20.7	16.7	°C
Días GRADO	340	322	273	206	139	101	90	95	125	191	263	320	2467	D.G
DG.ACUM.	1115	1437	1710	1917	2056	2156	2246	2341	2467	191	455	774	2467	D.G
D-CÁLIDOS	25	24	19	11	4	1	1	1	3	9	18	24	141	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	8	39	60	40	12	0	0	0	159	Horas
HRS.FRES	0	0	0	16	78	241	293	249	111	23	0	0	1011	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	8	46	107	147	159	159	159	159	159	Horas
PRECIPIT.	0.3	0.7	0.6	4.4	26.2	32.9	26.1	22.5	6.1	3.3	0.9	0.5	124.5	mm
EVAP.POT.	232.5	220.4	187.2	141.8	96.5	63.3	51.2	63.3	96.5	141.9	187.2	220.4	1702.2	mm
DEF.HIDR.	232.2	219.7	186.6	137.4	70.3	30.4	25.1	40.8	90.4	138.6	186.3	219.9	1577.7	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.03	0.27	0.52	0.51	0.36	0.06	0.02	0	0	0.07	pp/etp

→ Combarbalá (Lat-31.18, Lon-71.01)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.5	29.7	27.7	24.9	22.1	20.1	19.3	19.6	21.4	24.2	27.3	29.6	24.7	°C
T. MIN	13.2	12.7	11.2	9.2	7.2	5.7	5.2	5.7	6.8	8.8	10.9	12.6	9.1	°C
T. MED	20.9	20.3	18.6	16.3	14	12.3	11.7	12.1	13.5	15.8	18.2	20.2	16.1	°C
Días GRADO	326	308	257	192	127	93	83	89	116	175	247	305	2318	D.G
DG.ACUM.	1053	1361	1618	1810	1937	2030	2114	2203	2318	175	422	727	2318	D.G
D-CÁLIDOS	28	27	23	15	6	2	1	1	4	12	22	27	168	Días
HRS.FRIO	0	0	0	6	39	99	146	102	52	9	0	0	454	Horas
HRS.FRES	1	2	15	61	223	332	366	340	256	88	19	3	1705	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	39	139	284	387	439	448	448	448	454	Horas
R. SOLAR	644	616	539	435	330	254	226	254	331	435	540	616	435	Ly/día
H. RELAT.	53	53	54	54	55	55	55	54	54	53	53	53	54	%
PRECIPIT.	0.6	1.3	1.3	7.6	43.7	54.6	43.5	37.3	10.5	5.8	1.7	1	208.9	mm
EVAP.POT.	202	191.3	162.2	122.5	82.7	53.7	43	53.7	82.8	122.5	162.3	191.3	1470	mm
DEF.HIDR.	201.4	190	160.9	114.9	39	0	0	16.4	72.3	116.7	160.6	190.3	1262.5	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0.9	0.5	0	0	0	0	0	1.4	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.06	0.53	1.02	1.01	0.7	0.13	0.05	0.01	0	0.14	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.2	1.2	2	1.2	0.3	0	0	0	5	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	32.4	31.7	29.7	26.9	24.2	22.2	21.5	21.8	23.6	26.3	29.2	31.5	26.8	°C
T. MIN	15.1	14.6	13.2	11.3	9.5	8.1	7.6	8.1	9.1	11	13	14.5	11.3	°C
T. MED	22.7	22.1	20.5	18.3	16.1	14.5	13.9	14.3	15.6	17.8	20.1	22	18.2	°C
Días GRADO	380	363	315	249	186	137	123	131	169	234	304	360	2950	D.G
DG.ACUM.	1278	1641	1956	2204	2390	2527	2650	2781	2950	234	538	898	2950	D.G
D-CÁLIDOS	29	29	27	21	12	6	4	5	10	19	26	29	217	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	4	21	32	21	7	0	0	0	85	Horas
HRS.FRES	0	0	1	14	43	155	205	161	73	20	1	0	673	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	4	25	57	78	85	85	85	85	85	Horas
PRECIPIT.	0.5	1	1	6.1	35.1	44	35	30.1	8.5	4.6	1.4	0.8	168.1	mm
EVAP.POT.	240.4	227.8	193.4	146.4	99.5	65.1	52.5	65.1	99.5	146.5	193.4	227.8	1757.4	mm
DEF.HIDR.	239.9	226.8	192.4	140.3	64.4	21.1	17.5	35	91	141.9	192	227	1589.3	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.04	0.35	0.68	0.67	0.46	0.09	0.03	0	0	0.1	pp/etp

→ Illapel (Lat-31.63, Lon-71.16)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	27.1	26.4	24.5	22	19.4	17.6	16.9	17.1	18.8	21.3	24.1	26.3	21.8	°C
T. MIN	12.3	11.8	10.6	8.8	7.1	5.9	5.4	5.9	6.7	8.5	10.3	11.8	8.8	°C
T. MED	18.8	18.3	16.8	14.7	12.7	11.2	10.6	11	12.2	14.2	16.4	18.2	14.6	°C
Días GRADO	264	248	203	142	95	69	62	65	85	129	193	245	1801	D.G
DG.ACUM.	831	1079	1283	1425	1520	1589	1651	1716	1801	129	322	567	1801	D.G
D-CÁLIDOS	22	20	13	5	1	0	0	0	1	4	12	19	97	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	11	51	108	162	112	68	16	1	0	528	Horas
HRS.FRES	5	9	30	99	272	375	409	385	308	133	36	10	2072	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	51	159	320	432	500	516	517	517	528	Horas
R. SOLAR	589	564	495	401	307	238	213	238	307	401	495	564	401	Ly/día
H. RELAT.	64	64	65	66	66	67	67	66	66	65	64	64	65	%
PRECIPIT.	0.8	1.5	1.6	8.1	43.4	54.1	43.2	37.1	11	6.1	2.1	1.3	210.3	mm
EVAP.POT.	188	178.4	152	116	80	53.6	44	53.6	80	116	152	178.4	1392	mm
DEF.HIDR.	187.2	176.9	150.4	107.9	36.6	0	0.8	16.5	69	109.9	149.9	177.1	1182.2	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0.5	mm
IND.HUMED.	0	0	0.01	0.07	0.54	1.01	0.98	0.69	0.14	0.05	0.01	0	0.15	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.2	1	1.7	1.1	0.4	0	0	0	4.4	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	29	28.3	26.5	23.9	21.4	19.6	18.9	19.1	20.8	23.3	26	28.2	23.8	°C
T. MIN	14.1	13.7	12.4	10.8	9.1	7.9	7.5	7.9	8.8	10.4	12.2	13.6	10.7	°C
T. MED	20.6	20	18.6	16.6	14.6	13.1	12.6	12.9	14.1	16.1	18.3	20	16.5	°C
Días GRADO	317	301	258	198	138	102	91	96	124	183	248	299	2354	D.G
DG.ACUM.	1046	1348	1605	1803	1941	2042	2133	2230	2354	183	430	729	2354	D.G
D-CÁLIDOS	26	25	20	11	4	1	1	1	3	9	18	24	143	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	0	8	29	42	30	13	0	0	0	122	Horas
HRS.FRES	0	0	4	27	80	210	258	218	113	36	6	0	953	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	8	37	79	109	122	122	122	122	122	Horas
PRECIPIT.	0.6	1.2	1.3	6.5	34.8	43.4	34.7	29.7	8.8	4.9	1.7	1	168.6	mm
EVAP.POT.	223.7	212.3	181	138.2	95.5	64.2	52.8	64.2	95.5	138.3	181	212.3	1659	mm
DEF.HIDR.	223.1	211.1	179.7	131.7	60.7	20.8	18.1	34.5	86.7	133.4	179.3	211.3	1490.4	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.05	0.36	0.68	0.66	0.46	0.09	0.04	0	0	0.1	pp/etp

→ Salamanca (Lat-31.79, Lon-70.95)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.5	29.7	27.4	24.3	21.2	18.9	18.1	18.5	20.5	23.6	27	29.5	24.1	°C
T. MIN	12.1	11.5	10	7.9	5.8	4.3	3.7	4.3	5.4	7.5	9.7	11.5	7.8	°C
T. MED	20.3	19.7	17.9	15.4	12.9	11.1	10.4	10.9	12.4	14.9	17.5	19.6	15.2	°C
Días GRADO	310	290	254	164	106	76	67	72	97	150	239	288	2114	D.G
DG.ACUM.	987	1277	1530	1694	1800	1877	1944	2017	2114	150	389	676	2114	D.G
D-CÁLIDOS	28	27	22	13	4	1	0	1	2	10	21	27	155	Días
HRS.FRIO	0	0	1	21	89	221	268	228	115	29	2	0	975	Horas
HRS.FRES	5	10	0	146	310	60	101	62	336	181	19	11	1241	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	89	311	579	807	922	951	953	953	975	Horas
R. SOLAR	608	582	509	411	312	240	214	240	313	411	510	582	411	Ly/día
H. RELAT.	58	58	57	56	56	55	55	55	55	56	57	58	56	%
PRECIPIT.	1	1.8	2	9.3	48.7	60.5	48.4	41.5	12.5	6.9	2.5	1.5	236.6	mm
EVAP.POT.	193	183	155.7	118.5	81.2	54	44	54	81.3	118.5	155.8	183	1422	mm
DEF.HIDR.	192	181.2	153.7	109.2	32.5	0	0	12.5	68.8	111.6	153.3	181.5	1196.3	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	6.5	4.4	0	0	0	0	0	10.9	mm
IND.HUMED.	0	0	0.01	0.08	0.6	1.12	1.1	0.77	0.15	0.06	0.02	0	0.17	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0.1	1.2	3.9	5.7	4.1	1.6	0.1	0	0	16.7	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	32.6	31.8	29.6	26.5	23.5	21.3	20.5	20.9	22.9	25.9	29.1	31.7	26.4	°C
T. MIN	14.1	13.6	12.1	10	8	6.5	6	6.5	7.6	9.7	11.8	13.5	10	°C
T. MED	22.3	21.7	19.9	17.5	15.1	13.3	12.7	13.1	14.6	17	19.6	21.6	17.3	°C
Días GRADO	369	350	297	224	154	112	100	107	141	218	287	347	2704	D.G
DG.ACUM.	1220	1570	1866	2091	2245	2357	2457	2564	2704	218	504	851	2704	D.G
D-CÁLIDOS	29	29	27	20	10	4	2	3	8	18	26	29	204	Días
HRS.FRIO	0	0	0	1	20	62	89	64	28	3	0	0	266	Horas
HRS.FRES	0	0	6	36	145	273	313	280	182	26	8	0	1270	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	20	82	171	235	262	265	265	265	266	Horas
PRECIPIT.	0.8	1.4	1.6	7.5	39.1	48.6	38.9	33.3	10.1	5.6	2	1.2	190.1	mm
EVAP.POT.	233.5	221.5	188.8	144	99.3	66.6	54.6	66.6	99.3	144.1	188.8	221.5	1728.6	mm
DEF.HIDR.	232.7	220.1	187.2	136.5	60.2	18	15.7	33.3	89.2	138.5	186.8	220.3	1538.5	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0	0.05	0.39	0.73	0.71	0.5	0.1	0.04	0.01	0	0.11	pp/etp

→ Cuncumén (Lat-31.90, Lon-70.62)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	31.1	30	27	23	18.9	16	14.9	15.5	18.3	22.3	26.6	29.9	22.8	°C
T. MIN	12	11.5	10	8	6	4.5	4	4.5	5.6	7.6	9.7	11.4	7.9	°C
T. MED	20.6	19.8	17.7	14.8	11.9	9.8	9	9.6	11.4	14.3	17.4	19.7	14.7	°C
Días GRADO	317	294	247	147	83	52	42	48	75	134	232	291	1963	D.G
DG.ACUM.	975	1269	1516	1662	1746	1797	1840	1888	1963	134	366	657	1963	D.G
D-CÁLIDOS	28	27	21	8	1	0	0	0	0	6	20	27	140	Días
HRS.FRÍO	0	0	1	21	88	253	312	263	119	29	2	0	1090	Horas
HRS.FRES	6	10	0	154	341	49	103	51	370	191	19	11	1305	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	88	342	654	917	1036	1065	1067	1067	1090	Horas
R. SOLAR	630	602	525	421	316	240	212	240	317	421	526	602	421	Ly/día
H. RELAT.	51	51	51	50	50	49	49	49	49	49	50	51	50	%
PRECIPIT.	1.2	2.1	2.4	10.8	55.9	69.4	55.6	47.6	14.5	8.1	3	1.9	272.5	mm
EVAP.POT.	185	175.2	148.5	112	75.5	48.8	39	48.8	75.5	112	148.5	175.2	1344	mm
DEF.HIDR.	183.8	173.1	146.1	101.2	19.6	0	0	1.2	61	103.9	145.5	173.3	1108.7	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	20.6	16.6	0	0	0	0	0	37.2	mm
IND.HUMED.	0	0.01	0.02	0.1	0.74	1.42	1.43	0.98	0.19	0.07	0.02	0.01	0.2	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0.1	0.9	3.3	4.8	3.4	1.3	0.1	0	0	13.9	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	33.7	32.6	29.6	25.5	21.5	18.5	17.4	18	20.8	24.9	29.2	32.5	25.4	°C
T. MIN	14.5	14	12.5	10.5	8.5	7	6.5	7	8.1	10.1	12.2	13.9	10.4	°C
T. MED	23	22.2	20.1	17.2	14.3	12.2	11.4	12	13.8	16.7	19.8	22.1	17.1	°C
Días GRADO	390	367	303	216	131	84	70	79	118	201	293	364	2619	D.G
DG.ACUM.	1250	1617	1920	2137	2268	2351	2421	2500	2619	201	495	859	2619	D.G
D-CÁLIDOS	30	29	27	17	4	1	0	0	3	15	26	29	180	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	0	16	59	88	61	23	1	0	0	248	Horas
HRS.FRES	0	0	3	29	128	297	351	307	174	39	5	0	1333	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	16	74	163	224	246	248	248	248	248	Horas
PRECIPIT.	1	1.8	2	9.1	46.8	58.1	46.6	39.9	12.2	6.8	2.5	1.6	228.4	mm
EVAP.POT.	233.1	220.8	187	140.9	94.9	61.1	48.8	61.1	94.9	141	187	220.8	1691.4	mm
DEF.HIDR.	232.1	219	185	131.8	48.1	3	2.2	21.2	82.7	134.2	184.5	219.2	1463	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0.01	0.06	0.49	0.95	0.95	0.65	0.13	0.05	0.01	0	0.14	pp/etp

→ Los Vilos (Lat-31.91, Lon-71.51)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	20.2	19.7	18.4	16.7	14.9	13.7	13.2	13.2	14.3	16	18	19.6	16.5	°C
T. MIN	12.4	12	11	9.7	8.3	7.4	7	7.4	8	9.3	10.8	12	9.6	°C
T. MED	15.6	15.2	14.1	12.6	11.1	10	9.6	9.8	10.6	12.1	13.8	15.1	12.5	°C
Días GRADO	167	155	123	80	53	39	34	35	45	69	113	152	1064	D.G
DG.ACUM.	501	656	779	858	911	950	984	1019	1064	69	182	334	1064	D.G
D-CÁLIDOS	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	Días
HRS.FRIO	0	0	0	5	33	79	105	83	48	10	0	0	363	Horas
HRS.FRES	7	12	36	52	289	421	465	442	351	112	45	14	2247	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	33	111	216	299	347	358	358	358	363	Horas
R. SOLAR	512	490	432	351	271	213	191	213	271	352	432	490	352	Ly/día
H. RELAT.	77	77	79	81	82	84	84	83	82	80	78	77	80	%
PRECIPIT.	1	1.8	2.1	9.4	48.2	59.8	47.9	41	12.6	7	2.5	1.6	234.9	mm
EVAP.POT.	157	149	127.2	97.5	67.7	46	38	46	67.8	97.5	127.3	149	1170	mm
DEF.HIDR.	156	147.2	125.1	88.1	19.5	0	0	5	55.2	90.5	124.8	147.4	958.8	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	13.8	9.9	0	0	0	0	0	23.7	mm
IND.HUMED.	0	0.01	0.02	0.1	0.71	1.3	1.26	0.89	0.19	0.07	0.02	0.01	0.2	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0.2	0.1	0	0	0	0.7	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	21.6	21.2	20	18.4	16.8	15.6	15.2	15.2	16.1	17.7	19.6	21	18.2	°C
T. MIN	13.8	13.5	12.5	11.2	10	9	8.7	9	9.6	10.9	12.3	13.4	11.2	°C
T. MED	16.9	16.5	15.5	14.2	12.8	11.8	11.4	11.6	12.3	13.7	15.2	16.4	14	°C
Días GRADO	207	196	166	125	83	63	57	58	72	110	156	193	1486	D.G
DG.ACUM.	666	862	1028	1153	1235	1299	1356	1414	1486	110	266	459	1486	D.G
D-CÁLIDOS	4	4	2	0	0	0	0	0	0	0	1	3	15	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	3	15	23	16	7	0	0	0	64	Horas
HRS.FRES	0	1	6	30	5	170	237	184	73	44	9	1	760	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	3	18	41	57	64	64	64	64	64	Horas
PRECIPIT.	0.8	1.5	1.7	7.6	38.9	48.2	38.7	33.1	10.2	5.7	2.1	1.3	189.8	mm
EVAP.POT.	179	170	145.6	112.3	78.9	54.5	45.6	54.5	78.9	112.3	145.6	170	1347.5	mm
DEF.HIDR.	178.2	168.5	143.9	104.7	40	6.3	6.9	21.4	68.7	106.6	143.5	168.7	1157.7	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0.01	0.07	0.49	0.88	0.85	0.61	0.13	0.05	0.01	0	0.14	pp/etp

→ Petorca (Lat-32.25, Lon-70.93)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	29.7	28.9	26.6	23.4	20.3	18	17.2	17.6	19.7	22.8	26.1	28.7	23.3	°C
T. MIN	11.9	11.5	10.2	8.5	6.9	5.6	5.2	5.6	6.5	8.2	10	11.4	8.5	°C
T. MED	19.9	19.2	17.6	15.3	13	11.3	10.7	11.1	12.5	14.8	17.2	19.2	15.1	°C
Días GRADO	296	277	227	160	103	73	64	69	93	145	229	275	2011	D.G
DG.ACUM.	945	1222	1449	1609	1712	1785	1849	1917	2011	145	374	649	2011	D.G
D-CÁLIDOS	27	26	20	10	2	0	0	0	1	8	19	25	138	Días
HRS.FRÍO	0	0	1	13	55	119	176	125	72	19	1	0	581	Horas
HRS.FRES	7	11	33	108	271	374	409	384	304	142	2	12	2058	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	55	174	350	475	547	566	568	568	581	Horas
R. SOLAR	598	572	502	406	310	240	214	240	310	406	502	572	406	Ly/día
H. RELAT.	60	61	63	66	68	70	71	70	68	65	62	61	65	%
PRECIPIT.	1.3	2.1	2.5	10.2	50	61.9	49.8	42.5	13.5	7.6	3	1.9	246.3	mm
EVAP.POT.	189	179	151.5	114	76.5	49	39	49	76.5	114	151.5	179	1368	mm
DEF.HIDR.	187.7	176.9	149	103.8	26.5	0	0	6.5	63	106.4	148.5	177.1	1145.4	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	12.9	10.8	0	0	0	0	0	23.7	mm
IND.HUMED.	0	0.01	0.02	0.09	0.65	1.26	1.28	0.87	0.18	0.07	0.02	0.01	0.18	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.3	1.3	2	1.3	0.5	0	0	0	5.5	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	31.8	31	28.7	25.6	22.6	20.3	19.5	19.9	21.9	25	28.3	30.9	25.5	°C
T. MIN	13.9	13.5	12.3	10.6	9	7.8	7.4	7.8	8.6	10.3	12	13.4	10.6	°C
T. MED	21.8	21.2	19.6	17.3	15.1	13.4	12.8	13.2	14.6	16.8	19.2	21.1	17.2	°C
Días GRADO	355	337	287	220	153	110	97	105	139	205	277	334	2618	D.G
DG.ACUM.	1171	1507	1795	2015	2168	2278	2375	2479	2618	205	482	816	2618	D.G
D-CÁLIDOS	29	28	25	17	7	2	1	2	5	15	24	28	184	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	0	8	29	43	31	13	1	0	0	125	Horas
HRS.FRES	0	0	5	26	83	206	253	213	113	35	7	0	941	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	8	38	81	111	124	125	125	125	125	Horas
PRECIPIT.	1	1.7	2	8.3	40.6	50.2	40.4	34.5	10.9	6.1	2.4	1.5	199.6	mm
EVAP.POT.	228.7	216.6	183.5	138.3	93.2	60.1	48	60.1	93.2	138.4	183.5	216.6	1660.2	mm
DEF.HIDR.	227.7	214.9	181.5	130	52.6	9.9	7.6	25.6	82.3	132.3	181.1	215.1	1460.6	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	mm
IND.HUMED.	0	0	0.01	0.06	0.44	0.84	0.84	0.57	0.12	0.04	0.01	0	0.12	pp/etp

→ La Ligua (Lat-32.45, Lon-71.23)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	26.4	25.7	23.6	20.9	18.1	16.1	15.4	15.7	17.5	20.2	23.2	25.5	20.7	°C
T. MIN	9.7	9.3	8.3	6.9	5.5	4.5	4.1	4.5	5.1	6.5	8	9.3	6.8	°C
T. MED	17.2	16.7	15.3	13.3	11.3	9.8	9.3	9.6	10.8	12.8	14.9	16.6	13.1	°C
Días GRADO	228	207	159	110	73	53	46	49	66	100	150	204	1445	D.G
DG.ACUM.	681	888	1048	1157	1231	1284	1330	1379	1445	100	250	453	1445	D.G
D-CÁLIDOS	20	17	10	3	0	0	0	0	0	2	9	17	79	Días
HRS.FRIO	2	5	16	52	133	255	295	264	179	68	20	5	1294	Horas
HRS.FRES	22	50	121	260	377	54	91	56	405	293	148	55	1932	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	133	387	682	946	1125	1193	1214	1219	1294	Horas
R. SOLAR	534	511	448	362	276	213	190	213	276	362	448	511	362	Ly/día
H. RELAT.	80	81	82	84	86	87	88	87	85	83	82	80	84	%
PRECIPIT.	1.8	3	3.4	13.9	66.1	81.5	65.7	56	18.2	10.3	4.1	2.7	326.7	mm
EVAP.POT.	162	152.8	127.7	93.5	59.2	34.2	25	34.2	59.3	93.5	127.8	152.8	1122	mm
DEF.HIDR.	160.2	149.8	124.3	79.6	0	0	0	0	41.1	83.2	123.7	150.1	912	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	6.9	47.3	40.7	21.8	0	0	0	0	116.7	mm
IND.HUMED.	0.01	0.02	0.03	0.15	1.12	2.38	2.63	1.64	0.31	0.11	0.03	0.02	0.29	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0.3	1.5	3.4	4.5	3.5	2.1	0.5	0	0	16	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	28	27.3	25.3	22.6	19.9	17.9	17.2	17.5	19.2	21.9	24.9	27.2	22.4	°C
T. MIN	11.3	10.9	9.9	8.6	7.2	6.3	5.9	6.3	6.9	8.2	9.7	10.9	8.5	°C
T. MED	18.8	18.2	16.8	14.9	13	11.5	11	11.3	12.5	14.4	16.5	18.2	14.8	°C
Días GRADO	263	247	213	148	101	74	66	70	91	134	200	245	1852	D.G
DG.ACUM.	842	1090	1303	1451	1551	1625	1691	1761	1852	134	334	579	1852	D.G
D-CÁLIDOS	24	22	16	7	2	0	0	0	1	5	14	22	114	Días
HRS.FRIO	0	0	2	13	45	96	108	100	61	19	3	0	448	Horas
HRS.FRES	14	19	4	111	256	350	382	360	292	149	25	20	1983	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	45	142	250	350	411	430	433	433	448	Horas
PRECIPIT.	1.5	2.5	2.9	11.7	55.5	68.5	55.2	47.1	15.3	8.6	3.4	2.3	274.5	mm
EVAP.POT.	187.9	177.3	148.3	108.7	69.1	40.1	29.5	40.1	69.1	108.7	148.3	177.3	1304.4	mm
DEF.HIDR.	186.4	174.8	145.4	97	13.6	0	0	0	53.8	100.1	144.9	175	1091	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	28.4	25.7	7	0	0	0	0	61.1	mm
IND.HUMED.	0	0.01	0.02	0.11	0.8	1.71	1.87	1.17	0.22	0.08	0.02	0.01	0.21	pp/etp

→ San Felipe (Lat-32.75, Lon-70.72)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.8	29.8	27	23.1	19.3	16.5	15.5	16.1	18.7	22.5	26.5	29.7	23	°C
T. MIN	11.8	11.3	10	8.2	6.5	5.2	4.7	5.2	6.1	7.9	9.8	11.3	8.2	°C
T. MED	20.3	19.6	17.7	15	12.3	10.4	9.6	10.1	11.8	14.5	17.3	19.5	14.9	°C
Días GRADO	310	289	230	152	90	58	48	54	81	138	232	286	1966	D.G
DG.ACUM.	966	1255	1485	1636	1726	1783	1832	1885	1966	138	370	656	1966	D.G
D-CÁLIDOS	28	27	21	9	1	0	0	0	1	7	20	27	140	Días
HRS.FRIO	0	0	1	17	75	190	251	198	99	24	2	0	858	Horas
HRS.FRES	7	12	36	131	311	426	34	437	343	171	17	13	1938	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	75	265	516	714	813	838	840	840	858	Horas
R. SOLAR	600	574	502	404	307	235	209	235	307	405	502	574	405	Ly/día
H. RELAT.	60	61	65	69	74	77	78	76	73	68	64	61	69	%
PRECIPIT.	1.5	2.2	2.8	10	46.2	56.9	46	39.2	13.1	7.4	3.2	2.1	230.6	mm
EVAP.POT.	190	179.1	149.5	109	68.5	38.9	28	38.9	68.5	109	149.5	179.1	1308	mm
DEF.HIDR.	188.5	176.9	146.7	99	22.3	0	0	0	55.4	101.6	146.3	177	1113.8	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	18	18	0.3	0	0	0	0	36.4	mm
IND.HUMED.	0	0.01	0.02	0.09	0.67	1.46	1.64	1.01	0.19	0.07	0.02	0.01	0.18	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.5	2	3	2.1	0.8	0.1	0	0	8.5	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	33	32	29.1	25.3	21.4	18.6	17.6	18.2	20.8	24.6	28.7	31.8	25.1	°C
T. MIN	13.8	13.3	12	10.3	8.5	7.3	6.8	7.3	8.2	9.9	11.8	13.3	10.2	°C
T. MED	22.3	21.6	19.7	17	14.3	12.4	11.7	12.2	13.8	16.5	19.3	21.5	16.9	°C
Días GRADO	370	349	290	210	131	87	73	82	119	201	280	346	2538	D.G
DG.ACUM.	1197	1546	1836	2046	2178	2264	2337	2419	2538	201	481	827	2538	D.G
D-CÁLIDOS	29	29	26	16	4	1	0	0	3	14	25	29	176	Días
HRS.FRIO	0	0	0	1	15	50	73	52	22	2	0	0	215	Horas
HRS.FRES	0	0	6	34	124	279	330	289	170	7	8	1	1248	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	15	65	138	190	212	214	214	214	215	Horas
PRECIPIT.	1.1	1.7	2.1	7.6	35.3	43.4	35.1	29.9	10	5.7	2.4	1.6	175.9	mm
EVAP.POT.	231.8	218.5	182.3	132.8	83.4	47.2	33.9	47.2	83.4	132.9	182.3	218.5	1594.2	mm
DEF.HIDR.	230.7	216.8	180.2	125.2	48.1	3.8	0	17.3	73.4	127.2	179.9	216.9	1419.5	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0	1.2	0	0	0	0	0	1.2	mm
IND.HUMED.	0	0	0.01	0.06	0.42	0.92	1.04	0.63	0.12	0.04	0.01	0	0.11	pp/etp

→ Los Andes (Lat-32.83, Lon-70.60)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.9	29.8	26.8	22.7	18.7	15.7	14.6	15.2	18	22.1	26.4	29.7	22.6	°C
T. MIN	11.8	11.3	10	8.2	6.5	5.2	4.7	5.2	6.1	7.9	9.8	11.3	8.2	°C
T. MED	20.4	19.6	17.6	14.8	12	10	9.2	9.8	11.5	14.3	17.3	19.5	14.7	°C
Días GRADO	312	289	228	146	83	51	41	47	74	133	229	286	1918	D.G
DG.ACUM.	960	1249	1477	1623	1706	1756	1797	1844	1918	133	362	648	1918	D.G
D-CÁLIDOS	28	27	21	7	1	0	0	0	0	6	20	27	137	Días
HRS.FRIO	0	0	1	18	80	206	271	215	105	25	2	0	923	Horas
HRS.FRES	7	12	36	136	324	448	37	462	356	176	17	13	2025	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	80	285	557	772	877	902	904	904	923	Horas
R. SOLAR	596	570	499	401	304	233	207	233	304	402	499	570	402	Ly/día
H. RELAT.	58	59	63	68	72	76	77	75	72	67	62	59	67	%
PRECIPIT.	1.8	2.7	3.4	12	55	67.5	54.7	46.5	15.7	9	3.9	2.6	274.8	mm
EVAP.POT.	190	179.4	150.5	111	71.5	42.6	32	42.6	71.5	111	150.5	179.4	1332	mm
DEF.HIDR.	188.2	176.7	147.1	99	16.5	0	0	0	55.8	102	146.6	176.8	1108.7	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	24.9	22.7	3.9	0	0	0	0	51.5	mm
IND.HUMED.	0	0.02	0.02	0.11	0.77	1.59	1.71	1.09	0.22	0.08	0.03	0.01	0.21	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.5	2	3	2.1	0.8	0.1	0	0	8.5	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	33.3	32.2	29.1	25	20.8	17.8	16.7	17.4	20.2	24.3	28.7	32.1	24.8	°C
T. MIN	14.2	13.7	12.3	10.5	8.6	7.3	6.8	7.3	8.3	10.1	12.1	13.6	10.4	°C
T. MED	22.7	21.9	19.8	17	14.1	12	11.2	11.8	13.6	16.4	19.5	21.8	16.8	°C
Días GRADO	380	357	294	209	124	78	64	73	112	193	284	355	2525	D.G
DG.ACUM.	1213	1570	1865	2073	2198	2275	2340	2413	2525	193	478	833	2525	D.G
D-CÁLIDOS	29	29	26	15	3	0	0	0	2	13	25	29	172	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	14	53	80	55	21	1	0	0	225	Horas
HRS.FRES	0	0	4	30	121	296	352	306	170	41	6	0	1326	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	14	67	147	202	224	225	225	225	225	Horas
PRECIPIT.	1.4	2.1	2.6	9.4	43	52.8	42.8	36.4	12.3	7	3.1	2	214.9	mm
EVAP.POT.	235.6	222.4	186.4	137.1	87.9	51.9	38.7	51.9	87.9	137.2	186.4	222.4	1645.8	mm
DEF.HIDR.	234.2	220.3	183.8	127.7	44.9	0	0	15.5	75.6	130.2	183.3	220.4	1435.9	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	0.9	4.1	0	0	0	0	0	5	mm
IND.HUMED.	0	0	0.01	0.07	0.49	1.02	1.11	0.7	0.14	0.05	0.02	0	0.13	pp/etp

→ Quillota (Lat-32.88, Lon-71.25)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	26.7	26	24.2	21.8	19.3	17.6	16.9	17.1	18.7	21.1	23.8	25.9	21.6	°C
T. MIN	10.7	10.3	9.1	7.5	5.9	4.7	4.3	4.7	5.5	7.1	8.8	10.2	7.4	°C
T. MED	17.9	17.3	15.9	14	12.1	10.6	10.1	10.4	11.6	13.5	15.6	17.2	13.9	°C
Días GRADO	236	220	180	126	87	65	59	62	79	114	169	217	1613	D.G
DG.ACUM.	736	957	1136	1262	1349	1415	1473	1535	1613	114	283	501	1613	D.G
D-CÁLIDOS	20	18	12	5	1	0	0	0	1	3	11	18	91	Días
HRS.FRÍO	0	1	7	33	93	210	252	218	124	45	9	1	993	Horas
HRS.FRES	24	33	70	207	338	26	66	27	366	243	88	34	1522	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	93	303	556	773	897	942	951	952	993	Horas
R. SOLAR	560	535	467	374	282	214	189	214	282	375	467	535	375	Ly/día
H. RELAT.	80	81	82	84	86	87	88	87	85	83	82	80	84	%
PRECIPIT.	2.2	3.5	4.3	15.4	69.6	85.4	69.2	58.9	20.1	11.4	5	3.3	348.3	mm
EVAP.POT.	180	169.4	140.5	101	61.5	32.6	22	32.6	61.5	101	140.5	169.4	1212	mm
DEF.HIDR.	177.8	165.9	136.2	85.6	0	0	0	0	41.4	89.6	135.5	166.1	998.1	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	8.1	52.8	47.2	26.3	0	0	0	0	134.4	mm
IND.HUMED.	0.01	0.02	0.03	0.15	1.13	2.62	3.15	1.81	0.33	0.11	0.04	0.02	0.29	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0.1	1	2.8	4	2.9	1.5	0.2	0	0	12.6	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	28.3	27.7	25.9	23.5	21.1	19.3	18.7	18.9	20.4	22.8	25.5	27.5	23.3	°C
T. MIN	12.4	12	10.8	9.2	7.6	6.4	6	6.4	7.2	8.8	10.5	11.9	9.1	°C
T. MED	19.4	18.9	17.5	15.6	13.7	12.3	11.8	12.1	13.2	15.1	17.2	18.8	15.5	°C
Días GRADO	283	268	226	170	118	90	81	85	107	154	216	265	2060	D.G
DG.ACUM.	918	1185	1411	1581	1698	1788	1869	1953	2060	154	370	635	2060	D.G
D-CÁLIDOS	24	23	18	10	3	1	1	1	2	8	17	23	131	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	6	33	77	104	80	44	10	0	0	355	Horas
HRS.FRES	4	7	23	66	211	313	346	322	248	96	29	8	1673	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	33	110	214	294	338	349	349	349	355	Horas
PRECIPIT.	1.8	2.8	3.5	12.4	56.1	68.8	55.7	47.4	16.2	9.2	4	2.7	280.6	mm
EVAP.POT.	208.8	196.6	163.1	117.4	71.7	38.2	26	38.2	71.7	117.4	163.1	196.6	1408.8	mm
DEF.HIDR.	207	193.8	159.6	105	15.6	0	0	0	55.5	108.2	159.1	193.9	1197.6	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	30.6	29.7	9.2	0	0	0	0	69.4	mm
IND.HUMED.	0	0.01	0.02	0.11	0.78	1.8	2.14	1.24	0.23	0.08	0.02	0.01	0.2	pp/etp

→ Valparaíso (Lat-33.05, Lon-71.62)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	20.4	20	18.9	17.4	15.9	14.8	14.4	14.4	15.2	16.7	18.5	19.9	17.2	°C
T. MIN	14.2	13.9	13	11.7	10.5	9.6	9.3	9.6	10.1	11.4	12.7	13.8	11.7	°C
T. MED	16.5	16.2	15.2	13.9	12.6	11.7	11.3	11.5	12.1	13.4	14.9	16.1	13.8	°C
Días GRADO	196	185	157	118	79	57	51	52	63	102	147	182	1389	D.G
DG.ACUM.	627	812	969	1086	1165	1222	1273	1325	1389	102	249	431	1389	D.G
D-CÁLIDOS	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	7	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	1	7	13	8	2	0	0	0	30	Horas
HRS.FRES	0	0	3	21	69	83	159	90	96	33	5	0	559	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	1	8	20	28	30	30	30	30	30	Horas
R. SOLAR	515	491	427	338	250	186	162	186	250	339	427	491	339	Ly/día
H. RELAT.	80	81	82	84	86	87	88	87	85	83	82	80	84	%
PRECIPIT.	2.8	4.2	5.3	18.1	79.7	97.5	79.2	67.4	23.5	13.4	6	4	401.1	mm
EVAP.POT.	150	141.3	117.5	85	52.5	28.7	20	28.7	52.5	85	117.5	141.3	1020	mm
DEF.HIDR.	147.2	137.1	112.2	66.9	0	0	0	0	29	71.6	111.5	137.3	812.8	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	27.2	68.8	59.2	38.7	0	0	0	0	193.9	mm
IND.HUMED.	0.02	0.03	0.05	0.21	1.52	3.4	3.96	2.35	0.45	0.16	0.05	0.03	0.39	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	21.8	21.4	20.3	18.8	17.4	16.3	15.9	15.9	16.7	18.2	19.9	21.3	18.7	°C
T. MIN	15.3	15	14.2	13.1	12	11.2	10.9	11.2	11.6	12.7	13.9	14.9	13	°C
T. MED	17.7	17.4	16.5	15.3	14	13.1	12.8	12.9	13.5	14.8	16.1	17.3	15.1	°C
Días GRADO	231	222	195	158	121	94	84	87	106	143	184	219	1843	D.G
DG.ACUM.	777	999	1194	1351	1472	1566	1650	1737	1843	143	327	546	1843	D.G
D-CÁLIDOS	5	4	2	1	0	0	0	0	0	0	2	4	18	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Horas
HRS.FRES	0	0	0	2	16	40	53	42	26	5	0	0	186	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Horas
PRECIPIT.	2.2	3.3	4.1	14.1	62.4	76.4	62	52.8	18.4	10.5	4.7	3.2	314.1	mm
EVAP.POT.	150	141.5	118.2	86.5	54.7	31.5	23	31.5	54.8	86.5	118.3	141.5	1038	mm
DEF.HIDR.	147.8	138.2	114.1	72.4	0	0	0	0	36.4	76	113.6	138.3	836.7	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	7.7	44.9	39	21.3	0	0	0	0	112.8	mm
IND.HUMED.	0.01	0.02	0.03	0.16	1.14	2.42	2.7	1.68	0.34	0.12	0.04	0.02	0.3	pp/etp

→ Quilpué (Lat-33.05, Lon-71.43)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	24.4	23.8	22.2	20	17.8	16.2	15.6	15.7	17.1	19.3	21.8	23.7	19.8	°C
T. MIN	12.2	11.8	10.7	9.2	7.8	6.7	6.3	6.7	7.4	8.9	10.5	11.7	9.2	°C
T. MED	17.5	17	15.7	14	12.2	10.9	10.5	10.7	11.7	13.5	15.4	16.9	13.8	°C
Días GRADO	224	210	172	119	80	59	53	55	71	106	162	207	1519	D.G
DG.ACUM.	699	910	1081	1200	1280	1340	1392	1447	1519	106	268	475	1519	D.G
D-CÁLIDOS	13	11	6	2	0	0	0	0	0	1	5	10	48	Días
HRS.FRIO	0	0	0	8	38	89	119	93	53	13	0	0	414	Horas
HRS.FRES	7	11	32	81	261	372	407	384	305	118	40	12	2031	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	38	128	246	340	393	406	406	406	414	Horas
R. SOLAR	551	526	457	363	270	201	176	201	270	364	457	526	364	Ly/día
H. RELAT.	80	80	82	83	85	86	86	85	84	82	81	80	83	%
PRECIPIT.	2.8	4	5.1	17.7	78.4	95.9	77.9	66.2	23	13.2	5.9	3.9	394	mm
EVAP.POT.	168	158.2	131.5	95	58.5	31.8	22	31.8	58.5	95	131.5	158.2	1140	mm
DEF.HIDR.	165.2	154.2	126.4	77.3	0	0	0	0	35.5	81.8	125.6	154.3	920.3	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	19.9	64.1	55.9	34.4	0	0	0	0	174.3	mm
IND.HUMED.	0.02	0.03	0.04	0.19	1.34	3.02	3.54	2.08	0.39	0.14	0.04	0.02	0.35	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.1	0.4	0.7	0.4	0.1	0	0	0	1.7	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	25.7	25.1	23.6	21.5	19.4	17.9	17.3	17.4	18.7	20.8	23.2	25	21.3	°C
T. MIN	13.7	13.3	12.3	10.8	9.4	8.4	8	8.4	9	10.5	12	13.2	10.8	°C
T. MED	18.8	18.4	17.1	15.4	13.8	12.5	12.1	12.3	13.3	14.9	16.8	18.3	15.3	°C
Días GRADO	264	251	214	163	112	85	76	80	100	148	204	248	1945	D.G
DG.ACUM.	865	1116	1329	1493	1605	1690	1766	1845	1945	148	352	600	1945	D.G
D-CÁLIDOS	17	15	10	4	1	0	0	0	1	3	9	15	76	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	6	24	34	25	11	0	0	0	101	Horas
HRS.FRES	0	1	7	31	68	202	253	213	110	43	9	1	938	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	6	30	64	89	100	100	100	100	101	Horas
PRECIPIT.	2.2	3.1	4	13.8	60.9	74.6	60.6	51.5	17.9	10.2	4.6	3.1	306.5	mm
EVAP.POT.	189.8	178.8	148.8	107.7	66.7	36.7	25.7	36.7	66.7	107.8	148.8	178.8	1293	mm
DEF.HIDR.	187.6	175.7	144.8	93.9	5.8	0	0	0	48.8	97.6	144.2	175.7	1074.1	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	37.9	34.9	14.8	0	0	0	0	87.6	mm
IND.HUMED.	0.01	0.02	0.03	0.13	0.91	2.03	2.36	1.4	0.27	0.09	0.03	0.02	0.24	pp/etp

→ Santiago (Lat-33.47, Lon-70.64)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.2	29.2	26.5	22.7	19	16.3	15.3	15.9	18.4	22.1	26	29.1	22.6	°C
T. MIN	13.3	12.7	10.9	8.6	6.2	4.5	3.9	4.5	5.9	8.2	10.7	12.6	8.5	°C
T. MED	20.8	20	17.9	15	12.1	9.9	9.2	9.7	11.6	14.5	17.5	19.9	14.8	°C
Días GRADO	323	300	236	150	85	54	45	51	77	136	226	297	1980	D.G
DG.ACUM.	983	1282	1518	1669	1754	1808	1853	1904	1980	136	362	659	1980	D.G
D-CÁLIDOS	27	26	20	7	1	0	0	0	0	6	18	26	132	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	13	88	248	309	257	102	19	0	0	1035	Horas
HRS.FRES	1	2	20	110	328	48	107	50	358	147	25	3	1200	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	88	335	644	901	1003	1022	1022	1022	1035	Horas
R. SOLAR	599	572	498	396	295	221	194	221	295	397	498	572	397	Ly/día
H. RELAT.	60	61	65	71	76	80	81	79	75	70	65	61	70	%
PRECIPIT.	2.8	4	5.2	16.5	69.3	84.4	68.8	58.4	21.2	12.2	5.8	4	352.6	mm
EVAP.POT.	185	174.3	145	105	65	35.7	25	35.7	65	105	145	174.3	1260	mm
DEF.HIDR.	182.2	170.3	139.8	88.5	0	0	0	0	43.8	92.8	139.2	170.3	1026.9	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	4.3	48.7	43.8	22.7	0	0	0	0	119.5	mm
IND.HUMED.	0.02	0.02	0.04	0.16	1.07	2.36	2.75	1.64	0.33	0.12	0.04	0.02	0.28	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.7	3.3	5.1	3.4	1	0	0	0	13.6	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	32.5	31.5	28.7	24.9	21.2	18.4	17.4	18	20.5	24.3	28.3	31.4	24.8	°C
T. MIN	15.3	14.7	13	10.6	8.3	6.6	6	6.6	7.9	10.3	12.7	14.6	10.6	°C
T. MED	22.8	22	19.9	17	14.1	12	11.2	11.7	13.6	16.5	19.6	22	16.9	°C
Días GRADO	385	361	297	210	125	81	68	76	113	195	287	359	2558	D.G
DG.ACUM.	1225	1587	1884	2094	2219	2300	2368	2444	2558	195	482	841	2558	D.G
D-CÁLIDOS	29	29	25	15	4	0	0	0	2	13	24	29	170	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	0	19	75	117	78	27	1	0	0	317	Horas
HRS.FRES	0	0	1	27	149	322	374	332	194	37	2	0	1439	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	19	94	211	289	316	317	317	317	317	Horas
PRECIPIT.	2.3	3.3	4.2	13.5	56.8	69.3	56.4	47.9	17.3	10	4.7	3.3	289	mm
EVAP.POT.	227.6	214.4	178.3	128.9	79.6	43.5	30.3	43.5	79.6	129	178.3	214.4	1547.4	mm
DEF.HIDR.	225.3	211.1	174.1	115.4	22.8	0	0	0	62.3	119	173.6	211.1	1314.7	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	25.8	26.1	4.4	0	0	0	0	56.3	mm
IND.HUMED.	0.01	0.02	0.02	0.1	0.71	1.59	1.86	1.1	0.22	0.08	0.03	0.02	0.19	pp/etp

→ San Antonio (Lat-33.58, Lon-71.61)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	20.5	20.1	19.1	17.7	16.4	15.4	15	14.9	15.7	17.1	18.7	20	17.6	°C
T. MIN	12.2	11.9	10.9	9.6	8.4	7.4	7.1	7.4	8	9.3	10.7	11.8	9.6	°C
T. MED	15.6	15.3	14.3	13.1	11.8	10.9	10.6	10.7	11.3	12.6	14	15.2	12.9	°C
Días GRADO	168	158	130	92	68	54	50	50	59	81	120	155	1188	D.G
DG.ACUM.	526	684	814	907	975	1029	1078	1128	1188	81	202	357	1188	D.G
D-CÁLIDOS	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	8	Días
HRS.FRIO	0	0	0	5	27	62	80	65	40	10	0	0	289	Horas
HRS.FRES	9	15	37	52	240	352	386	367	298	105	46	16	1923	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	27	89	169	233	274	284	284	284	289	Horas
R. SOLAR	488	466	407	326	246	187	165	187	246	327	407	466	327	Ly/día
H. RELAT.	80	81	82	84	86	87	88	87	85	83	82	80	84	%
PRECIPIT.	3.4	4.7	6.2	19.4	80	97.2	79.4	67.3	24.8	14.4	6.9	4.8	408.5	mm
EVAP.POT.	140	132.1	110.5	81	51.5	29.9	22	29.9	51.5	81	110.5	132.1	972	mm
DEF.HIDR.	136.6	127.4	104.3	61.6	0	0	0	0	26.7	66.6	103.6	127.3	754.1	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	28.5	67.3	57.4	37.4	0	0	0	0	190.6	mm
IND.HUMED.	0.02	0.04	0.06	0.24	1.55	3.25	3.61	2.25	0.48	0.18	0.06	0.04	0.42	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0	0	0	0.6	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	21.8	21.4	20.5	19.1	17.8	16.9	16.5	16.4	17.2	18.5	20	21.3	19	°C
T. MIN	13.6	13.3	12.3	11.1	9.8	8.9	8.6	8.9	9.5	10.7	12.1	13.2	11	°C
T. MED	16.9	16.6	15.7	14.4	13.2	12.3	12	12.1	12.7	13.9	15.3	16.5	14.3	°C
Días GRADO	207	197	170	133	95	76	71	71	84	118	160	194	1578	D.G
DG.ACUM.	680	877	1047	1181	1276	1352	1423	1494	1578	118	278	473	1578	D.G
D-CÁLIDOS	5	4	2	1	0	0	0	0	0	1	2	4	19	Días
HRS.FRIO	0	0	0	0	4	15	22	16	7	0	0	0	64	Horas
HRS.FRES	0	1	8	32	23	155	210	166	80	45	11	1	734	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	4	19	41	57	64	64	64	64	64	Horas
PRECIPIT.	2.4	3.4	4.4	13.7	56.6	68.8	56.2	47.6	17.5	10.2	4.9	3.4	289.1	mm
EVAP.POT.	158.2	149.3	125	91.7	58.5	34.2	25.3	34.2	58.5	91.8	125	149.3	1101	mm
DEF.HIDR.	155.8	145.9	120.6	78	1.9	0	0	0	41	81.6	120.1	145.9	890.8	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	34.6	30.9	13.4	0	0	0	0	78.9	mm
IND.HUMED.	0.02	0.02	0.04	0.15	0.97	2.01	2.22	1.39	0.3	0.11	0.04	0.02	0.26	pp/etp

→ Talagante (Lat-33.66, Lon-70.93)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.1	29.1	26.3	22.6	18.8	16.1	15.1	15.7	18.2	21.9	25.9	29	22.4	°C
T. MIN	12	11.5	10	8.1	6.1	4.7	4.2	4.7	5.8	7.7	9.8	11.4	8	°C
T. MED	20.1	19.4	17.4	14.7	11.9	9.9	9.2	9.7	11.4	14.2	17	19.3	14.5	°C
Días GRADO	303	281	221	142	83	53	44	49	75	129	221	278	1880	D.G
DG.ACUM.	932	1213	1434	1576	1659	1712	1756	1806	1880	129	350	629	1880	D.G
D-CÁLIDOS	27	26	19	7	1	0	0	0	0	5	18	26	130	Días
HRS.FRÍO	0	0	1	20	94	237	295	246	110	28	2	0	1034	Horas
HRS.FRES	6	11	37	150	336	30	85	31	366	190	16	12	1270	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	94	331	626	872	982	1010	1013	1013	1034	Horas
R. SOLAR	596	569	495	395	294	221	194	221	295	395	496	569	395	Ly/día
H. RELAT.	70	71	73	77	80	82	83	82	79	76	73	71	76	%
PRECIPIT.	3.4	4.6	6.1	18.8	77.2	93.8	76.7	64.9	24	13.9	6.8	4.7	394.9	mm
EVAP.POT.	185	174.3	145	105	65	35.7	25	35.7	65	105	145	174.3	1260	mm
DEF.HIDR.	181.6	169.7	138.9	86.2	0	0	0	0	41	91.1	138.2	169.6	1016.3	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	12.2	58.1	51.7	29.2	0	0	0	0	151.2	mm
IND.HUMED.	0.02	0.03	0.04	0.18	1.19	2.63	3.07	1.82	0.37	0.13	0.05	0.03	0.31	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.8	2.9	4.2	3	1.2	0.1	0	0	12.1	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	31.9	30.9	28.1	24.4	20.6	17.9	16.9	17.5	20	23.7	27.7	30.8	24.2	°C
T. MIN	13.8	13.3	11.9	9.9	8	6.6	6.1	6.6	7.6	9.6	11.6	13.2	9.9	°C
T. MED	21.8	21.1	19.1	16.4	13.7	11.7	11	11.5	13.2	15.9	18.8	21	16.3	°C
Días GRADO	355	333	273	197	116	76	64	71	104	179	263	330	2361	D.G
DG.ACUM.	1127	1460	1733	1931	2046	2122	2186	2257	2361	179	442	772	2361	D.G
D-CÁLIDOS	29	28	24	13	3	0	0	0	2	11	23	28	161	Días
HRS.FRÍO	0	0	0	2	25	79	116	82	35	4	0	0	342	Horas
HRS.FRES	0	1	8	4	184	333	381	344	227	37	10	1	1530	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	25	104	220	302	337	341	341	341	342	Horas
PRECIPIT.	2.6	3.6	4.7	14.7	60.1	73	59.7	50.5	18.7	10.8	5.3	3.6	307.3	mm
EVAP.POT.	218.3	205.7	171.1	123.9	76.7	42.1	29.5	42.1	76.7	123.9	171.1	205.7	1486.8	mm
DEF.HIDR.	215.7	202.1	166.4	109.2	16.6	0	0	0	58	113.1	165.8	202.1	1248.9	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	30.9	30.2	8.4	0	0	0	0	69.4	mm
IND.HUMED.	0.01	0.02	0.03	0.12	0.78	1.73	2.02	1.2	0.24	0.09	0.03	0.02	0.21	pp/etp

→ San José de Maipo (Lat-33.66, Lon-70.15)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	28	27.2	24.9	21.9	18.8	16.6	15.8	16.2	18.2	21.2	24.5	27.1	21.7	°C
T. MIN	10.5	10	8.5	6.5	4.5	3	2.5	3	4.1	6.1	8.2	9.9	6.4	°C
T. MED	18.4	17.7	16	13.6	11.1	9.4	8.7	9.2	10.6	13.1	15.6	17.6	13.4	°C
Días GRADO	252	249	182	119	76	54	47	50	69	108	171	244	1621	D.G
DG.ACUM.	776	1024	1206	1325	1401	1455	1502	1552	1621	108	280	524	1621	D.G
D-CÁLIDOS	24	22	15	5	1	0	0	0	0	4	13	22	105	Días
HRS.FRIO	0	1	12	60	207	327	364	335	242	79	16	2	1645	Horas
HRS.FRES	25	3	102	266	42	169	223	175	73	295	118	8	1500	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	207	533	898	1233	1475	1553	1569	1571	1645	Horas
R. SOLAR	603	575	497	391	285	207	179	207	285	391	497	575	391	Ly/día
H. RELAT.	55	56	57	59	61	62	63	62	60	58	57	55	59	%
PRECIPIT.	5.9	6.3	9.6	22.6	77.9	92.5	77.4	64.9	28	16.7	10	7.1	418.9	mm
EVAP.POT.	182	171.5	142.7	103.5	64.2	35.5	25	35.5	64.3	103.5	142.8	171.5	1242	mm
DEF.HIDR.	176.1	165.2	133.1	80.9	0	0	0	0	36.3	86.8	132.8	164.4	975.5	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	13.7	57	52.4	29.4	0	0	0	0	152.4	mm
IND.HUMED.	0.03	0.04	0.07	0.22	1.21	2.6	3.1	1.83	0.44	0.16	0.07	0.04	0.34	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0.5	3.5	7.8	10.1	8	4.3	0.8	0	0	35	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.6	29.7	27.4	24.1	20.9	18.6	17.7	18.1	20.3	23.5	26.9	29.6	24	°C
T. MIN	13.7	13.1	11.4	9.1	6.9	5.2	4.6	5.2	6.5	8.8	11.2	13	9.1	°C
T. MED	21.2	20.4	18.5	15.9	13.3	11.4	10.6	11.1	12.8	15.4	18.2	20.4	15.8	°C
Días GRADO	335	313	256	179	110	76	66	72	100	163	246	311	2227	D.G
DG.ACUM.	1054	1368	1623	1802	1912	1989	2055	2127	2227	163	409	719	2227	D.G
D-CÁLIDOS	28	27	22	12	3	1	0	0	2	10	21	27	153	Días
HRS.FRIO	0	0	0	6	52	155	217	161	69	10	0	0	671	Horas
HRS.FRES	0	1	13	67	261	379	37	388	293	95	16	1	1553	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	52	207	424	585	654	665	665	665	671	Horas
PRECIPIT.	4.7	4.7	7.5	16.2	51.5	60.5	51.3	42.7	19.9	12	7.7	5.5	284.2	mm
EVAP.POT.	189	177.1	144.7	100.4	56.2	23.8	11.9	23.8	56.2	100.5	144.7	177.1	1205.4	mm
DEF.HIDR.	184.3	172.4	137.2	84.2	4.7	0	0	0	36.3	88.5	137	171.6	1016.3	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	36.7	39.4	18.9	0	0	0	0	95.1	mm
IND.HUMED.	0.02	0.03	0.05	0.16	0.92	2.55	4.31	1.8	0.35	0.12	0.05	0.03	0.24	pp/etp

→ Melipilla (Lat-33.69, Lon-71.22)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	27.8	26.9	24.6	21.4	18.2	15.9	15	15.4	17.5	20.7	24.2	26.8	21.2	°C
T. MIN	11.1	10.7	9.6	8	6.5	5.4	5	5.4	6.1	7.7	9.3	10.6	8	°C
T. MED	18.6	18	16.3	14.1	11.8	10.2	9.6	9.9	11.3	13.6	16	17.9	13.9	°C
Días GRADO	257	239	194	126	78	53	45	49	70	114	182	236	1641	D.G
DG.ACUM.	789	1028	1222	1347	1426	1478	1523	1572	1641	114	296	532	1641	D.G
D-CÁLIDOS	23	21	14	4	0	0	0	0	0	3	12	21	99	Días
HRS.FRIO	0	0	3	23	81	179	237	188	107	32	5	0	855	Horas
HRS.FRES	16	23	35	171	332	435	476	448	364	212	55	25	2592	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	81	260	497	685	791	823	828	829	855	Horas
R. SOLAR	587	561	489	390	292	220	194	220	292	391	489	561	391	Ly/día
H. RELAT.	70	71	73	77	80	82	83	82	79	76	73	71	76	%
PRECIPIT.	3.4	4.6	6.2	19	77.4	93.9	76.9	65.1	24.1	14	6.9	4.7	396.2	mm
EVAP.POT.	180	169.6	141.2	102.5	63.7	35.4	25	35.4	63.8	102.5	141.3	169.6	1230	mm
DEF.HIDR.	176.6	165	135	83.5	0	0	0	0	39.7	88.5	134.4	164.9	987.6	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	13.7	58.5	51.9	29.7	0	0	0	0	153.8	mm
IND.HUMED.	0.02	0.03	0.04	0.19	1.21	2.65	3.08	1.84	0.38	0.14	0.05	0.03	0.32	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.5	1.6	2.4	1.7	0.8	0.1	0	0	7.1	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	29.4	28.5	26.2	23	19.8	17.5	16.6	17	19.1	22.3	25.8	28.4	22.8	°C
T. MIN	12.6	12.2	11.1	9.6	8.2	7.1	6.7	7.1	7.8	9.3	10.9	12.1	9.6	°C
T. MED	20.1	19.5	17.8	15.6	13.4	11.7	11.1	11.5	12.9	15.1	17.5	19.4	15.5	°C
Días GRADO	302	284	235	169	106	73	63	69	95	153	225	281	2053	D.G
DG.ACUM.	960	1243	1478	1647	1753	1826	1889	1958	2053	153	377	658	2053	D.G
D-CÁLIDOS	26	25	19	8	1	0	0	0	1	6	18	25	130	Días
HRS.FRIO	0	0	0	3	24	62	85	65	34	6	0	0	280	Horas
HRS.FRES	3	5	18	32	185	317	360	328	231	66	22	6	1573	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	24	86	171	236	270	276	276	276	280	Horas
PRECIPIT.	2.5	3.4	4.6	14.1	57.4	69.7	57.1	48.3	17.9	10.4	5.1	3.5	294	mm
EVAP.POT.	208.8	196.8	163.8	118.9	73.9	41	29	41	74	118.9	163.9	196.8	1426.8	mm
DEF.HIDR.	206.3	193.4	159.2	104.8	16.5	0	0	0	56.1	108.5	158.8	193.3	1196.8	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	28.7	28.1	7.3	0	0	0	0	64	mm
IND.HUMED.	0.01	0.02	0.03	0.12	0.78	1.7	1.97	1.18	0.24	0.09	0.03	0.02	0.21	pp/etp

→ Alto de Jahuel (Lat-33.74, Lon-70.68)

1980-2010

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	30.4	29.3	26.5	22.5	18.6	15.8	14.7	15.3	18	21.9	26	29.2	22.4	°C
T. MIN	12	11.5	10.1	8.2	6.4	5	4.5	5	6	7.9	9.9	11.4	8.2	°C
T. MED	20.2	19.5	17.5	14.7	11.9	9.9	9.2	9.7	11.4	14.2	17.1	19.4	14.6	°C
Días GRADO	307	285	224	143	82	51	41	47	73	130	225	282	1891	D.G
DG.ACUM.	944	1230	1454	1597	1679	1729	1771	1818	1891	130	355	637	1891	D.G
D-CÁLIDOS	28	26	20	7	1	0	0	0	0	5	18	26	131	Días
HRS.FRIO	0	0	1	18	85	221	284	230	95	25	2	0	961	Horas
HRS.FRES	6	11	35	138	330	452	59	466	362	179	10	11	2058	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	85	305	589	819	914	940	942	942	961	Horas
R. SOLAR	596	569	495	395	294	221	194	221	295	395	496	569	395	Ly/día
H. RELAT.	64	65	69	73	78	81	82	80	77	72	68	65	73	%
PRECIPIT.	3.8	5.2	6.8	20.8	84.6	102.7	84.1	71.1	26.5	15.4	7.6	5.3	433.9	mm
EVAP.POT.	185	174.3	145	105	65	35.7	25	35.7	65	105	145	174.3	1260	mm
DEF.HIDR.	181.2	169.1	138.2	84.2	0	0	0	0	38.5	89.6	137.4	169	1007.2	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	19.6	67	59.1	35.4	0	0	0	0	181.1	mm
IND.HUMED.	0.02	0.03	0.05	0.2	1.3	2.88	3.36	1.99	0.41	0.15	0.05	0.03	0.34	pp/etp
HELADAS	0	0	0	0	0.6	2.3	3.5	2.4	0.9	0.1	0	0	9.8	Días

Escenario 2050

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	UNID.
T. MAX	32.5	31.4	28.6	24.6	20.7	17.9	16.8	17.4	20.1	24	28.1	31.3	24.5	°C
T. MIN	14	13.5	12.2	10.3	8.5	7.2	6.7	7.2	8.1	10	11.9	13.4	10.3	°C
T. MED	22.2	21.5	19.5	16.7	14	12	11.2	11.7	13.5	16.2	19.1	21.4	16.6	°C
Días GRADO	366	344	284	201	121	78	65	73	109	190	274	341	2447	D.G
DG.ACUM.	1171	1515	1799	2000	2122	2199	2264	2338	2447	190	464	805	2447	D.G
D-CÁLIDOS	29	29	25	14	3	0	0	0	2	11	24	29	166	Días
HRS.FRIO	0	0	0	1	16	57	84	59	24	2	0	0	241	Horas
HRS.FRES	0	0	5	34	136	302	355	312	184	3	7	0	1339	Horas
HF.ACUM.	*	*	*	*	16	73	156	215	239	241	241	241	241	Horas
PRECIPIT.	3	4.1	5.4	16.4	66.7	81	66.3	56.1	20.9	12.1	6	4.1	342.1	mm
EVAP.POT.	223.9	210.9	175.5	127.1	78.7	43.3	30.3	43.3	78.7	127.1	175.5	210.9	1525.2	mm
DEF.HIDR.	220.9	206.8	170.1	110.7	12	0	0	0	57.8	115	169.5	206.8	1269.7	mm
EXC.HIDR.	0	0	0	0	0	37.7	36	12.8	0	0	0	0	86.6	mm
IND.HUMED.	0.01	0.02	0.03	0.13	0.85	1.87	2.19	1.3	0.27	0.1	0.03	0.02	0.22	pp/etp

Variables Climáticas Descritas

A continuación se indica brevemente el significado e interpretación de las variables agroclimáticas incluidas en el presente atlas:

T.MAX:	Temperatura máxima media del mes. Es el promedio mensual de las temperaturas máximas diarias.
T.MIN:	Temperatura mínima media del mes. Es el promedio mensual de las temperaturas mínimas diarias.
T.MED:	Temperatura media del mes.
DÍAS GRADO.:	Días-grado mensuales o temperaturas efectivas ($T > 10^{\circ}\text{C}$). Constituye un índice de disponibilidad de calor para el normal desarrollo y maduración de las especies vegetales. La mayor precocidad se obtendrá en los lugares con la mayor suma de temperaturas efectivas.
DG.ACUM :	Días-grado acumulados a partir del 1 de septiembre.
D-cálidos :	Número de días cálidos por mes (días en que la temperatura máxima supera 25°C).
HRS.FRIO :	Horas de frío mensuales. Horas mensuales en que la temperatura permanece por debajo de 7°C , lo que corresponde al umbral de frío requerido por especies de hoja caduca para romper en forma satisfactoria el receso invernal.
H.FRES :	Horas de frescor (horas con temperaturas menores a 10°C)
R. SOLAR:	Radiación solar mensual. Promedio mensual de la radiación solar diaria expresada en cal/cm^2 día.
H. RELAT. :	Humedad relativa media mensual.
PRECIPIT. :	Precipitación media mensual.
EVAP.POT. :	Evapotranspiración potencial mensual.
DEF.HIDR. :	Déficit hídrico mensual. Corresponde a los valores positivos de la diferencia ETP-PRECIPIT. Da una idea de los requerimientos máximos de riego dentro del mes.
EXC. HIDR. :	Excedente hídrico mensual. Corresponde a los valores negativos de la diferencia ETP-PRECIPIT. Da una estimación de las pérdidas conjuntas de agua por percolación profunda y escurrimiento superficial.
IND.HUMED:	Índice de humedad. Cuociente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial. Valores superiores a 1 indican que la precipitación está en exceso con respecto a la evapotranspiración. Valores menores que 0.5 indican que un mes es seco, siendo necesario el riego.
HELADAS :	Número promedio de heladas por mes (Temperatura mínima menor que 0°C).



Proyecto "Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en las Américas" VACEA
International Research Initiative on Adaptation to Climate Change, IRIACC
International Development Research Centre, IDRC



www.fpa.mma.gob.cl