00011

Ministerio de Obras Públicas
Gobierno de Chile

Ministerio del Medio Ambiente
Gobierno de Chile

Escuela de Ingeniería
Facultad de Ingeniería

Universidad de Valparaíso
Chile

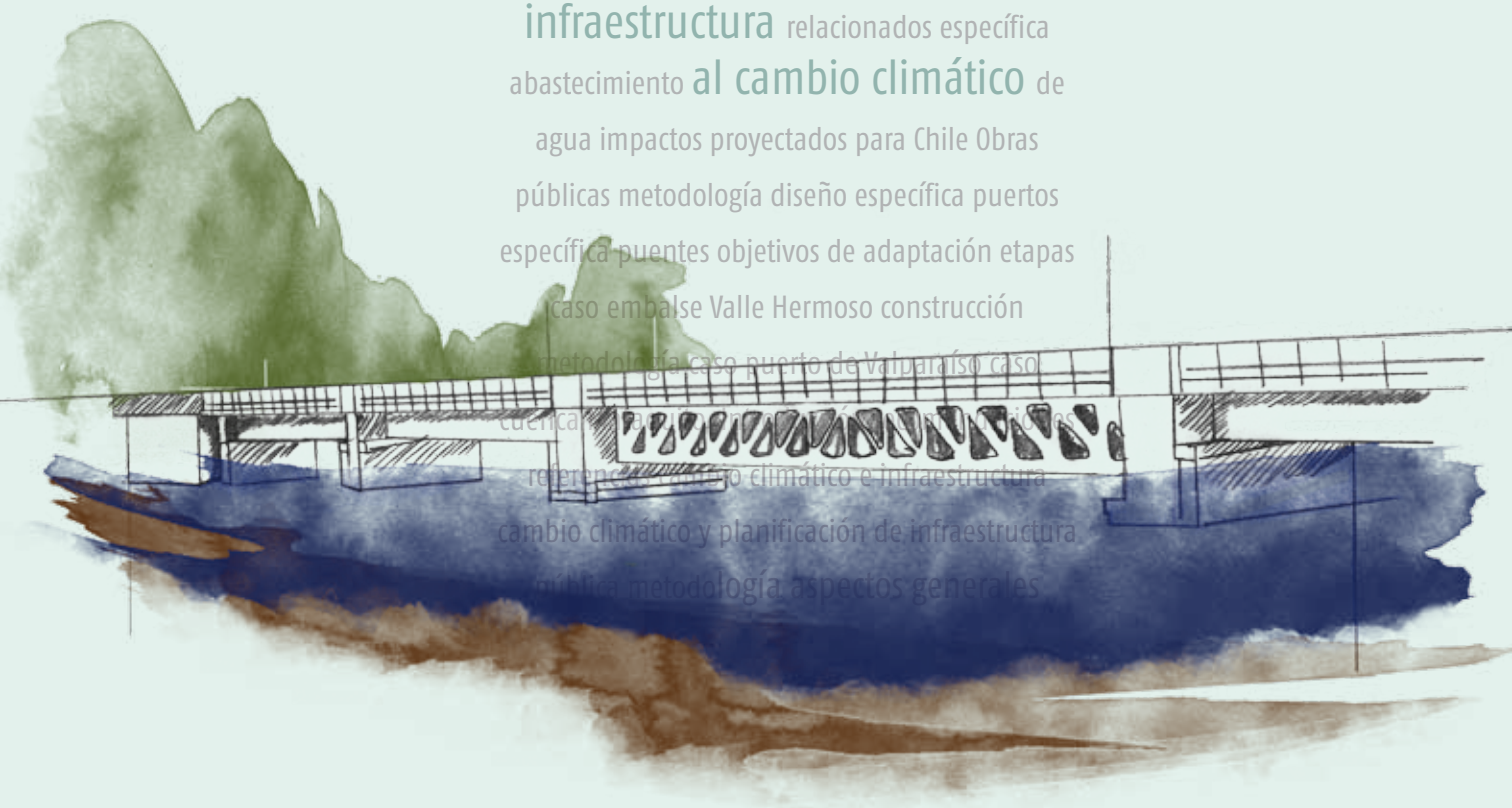
IH cantabria
Instituto de Hidráulica Ambiental
Universidad de Cantabria

cigiden

Centro de Cambio Global UC

Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático

infraestructura cambio climático y planificación de Marco estratégico infraestructura pública metodología aspectos generales producto del cambio para la adaptación climático infraestructura en Chile de la eventos extremos infraestructura relacionados específica abastecimiento al cambio climático de agua impactos proyectados para Chile Obras públicas metodología diseño específica puertos específica puentes objetivos de adaptación etapas caso embalse Valle Hermoso construcción metodología caso puerto de Valparaíso caso cuenca [illegible] referencia cambio climático e infraestructura cambio climático y planificación de infraestructura pública metodología aspectos generales



This project was undertaken with the financial support of:
Ce projet a été réalisé avec l'appui financier de :
Este proyecto fue realizado con el apoyo financiero de:

Environment Canada
Environnement Canada

Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático

Ministerio de Obras Públicas
Gobierno de Chile

Ministerio del Medio Ambiente
Gobierno de Chile

This project was undertaken with the financial support of:
Ce projet a été réalisé avec l'appui financier de :
Este proyecto fue realizado con el apoyo financiero de:

Environment Canada
Environnement Canada

Pontificia Universidad Católica de Chile

cigiden

Centro de Cambio Global UC

Universidad de Valparaíso Chile

IH cantabria
Instituto de Hidráulica Ambiental
Universidad de Cantabria

MARCO ESTRATÉGICO PARA LA ADAPTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA AL CAMBIO CLIMÁTICO

Desarrollado por
Pontificia Universidad Católica de Chile (www.uc.cl)
Centro de Cambio Global UC (www.cambioglobal.uc.cl)
Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (www.cigiden.cl)
Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria (www.ihcantabria.com)
Universidad de Valparaíso (www.uv.cl)

Con el apoyo de
Ministerio de Obras Públicas (MOP), Dirección General de Obras Públicas, Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio (www.mop.cl)
Ministerio de Medio Ambiente (MMA), Oficina de Cambio Climático (www.mma.gob.cl)

Financiado por
Environmental Canada/Environnement Canada (www.ec.gc.ca)

Coordinación general
GreenLabUC, Gestión y Política Ambiental DICTUC S.A. (www.greenlabuc.cl)

Coordinación general de esta publicación: Pilar Lapuente (pilar.lapuente@greenlabuc.cl)
Coordinación editorial: Adelaida Neira (adelaida.neira@gmail.com)
Edición al cuidado de: Adelaida Neira y Patricio González
Diseño y diagramación de interior: Gloria Barrios
Diseño e ilustración de portada: Carolina Egaña
Impresión: Andros Impresores

Marzo de 2013

Se autoriza la reproducción total o parcial de esta publicación, por cualquier medio o procedimiento, siempre que se incluya la cita bibliográfica del documento y que no obedezca a fines comerciales.
Las opiniones expresadas en este documento son exclusivas de los autores y no reflejan necesariamente la opinión oficial de las instituciones implicadas en esta publicación.

Impreso en Chile/Printed in Chile

Impreso en papel certificado bond 80 gramos.

Participan en esta publicación

Centro de Cambio Global UC
Sebastián Vicuña
svicuna@uc.cl
Francisco Meza
Guillermo Donoso
Eleonora Demaria
Cristián Chadwick
Matías Camaño

CIGIDEN
Luis Cifuentes
lac@ing.puc.cl
Jorge Gironás
Rodrigo Cienfuegos

Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria
Íñigo J. Losada
inigo.losada@unican.es
Cristina Izaguirre
Borja González
Antonio Tomás
Francisco Fernández

Universidad de Valparaíso
José Beyá
jose.beya@uv.cl
Mauricio Molina

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo brindado por Edwin Maurer (Santa Clara University, California, EE.UU.), Justin Sheffield (Princeton University, Princeton, EE.UU.), Yoel Geni (Pontificia Universidad Católica de Chile), Juan Carlos Domínguez (Pontificia Universidad Católica de Chile), Tamara Maass (Pontificia Universidad Católica de Chile), Ignacio Passalacqua (Pontificia Universidad Católica de Chile), Mauricio Molina (Universidad de Valparaíso) y Sebastián Bonelli (Centro de Cambio Global, Pontificia Universidad Católica de Chile). Agradecemos también al Puerto de Valparaíso y a la empresa Arauco por su apoyo y valiosa disposición y cooperación en la entrega de información relevante para este estudio.

Índice

SIGLAS DE INSTITUCIONES Y ABREVIATURAS DE TÉRMINOS 11

1 INTRODUCCIÓN 13

2 CAMBIO CLIMÁTICO 21

EVENTOS EXTREMOS GENERADOS POR EL CAMBIO CLIMÁTICO 24
IMPACTOS PROYECTADOS PARA CHILE 25
OBJETIVOS DE ADAPTACIÓN 33

3 INFRAESTRUCTURA, INCERTIDUMBRE Y CAMBIO CLIMÁTICO 35

INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA 39
INFRAESTRUCTURA EN CHILE 42

4 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA INCLUSIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA 47

4A METODOLOGÍA GENERAL 49

4B APLICACIÓN A EMBALSES DE RIEGO 53

INTRODUCCIÓN 53
METODOLOGÍA PROPUESTA 54
CASO EMBALSE VALLE HERMOSO 65
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES 71

4C APLICACIÓN A PUERTOS 73

INTRODUCCIÓN 73

METODOLOGÍA PROPUESTA 74

CASO PUERTO DE VALPARAÍSO 95

DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES 103

4D APLICACIÓN A PUENTES 105

INTRODUCCIÓN 105

METODOLOGÍA PROPUESTA 108

CASO PUENTE SOBRE EL RÍO MATAQUITO 119

DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES 141

5 RECOMENDACIONES PARA EL DESARROLLO DE UN MARCO ESTRATÉGICO PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA INFRAESTRUCTURA PÚBLICA EN CHILE 143

ESTADO ACTUAL DE LA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURA PÚBLICA EN CHILE 145

BRECHAS PARA INCLUIR LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO 149

PROPUESTAS DE INCORPORACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PROCESO DE PLANIFICACIÓN MINISTERIAL 150

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 159

Siglas de instituciones y abreviaturas de términos

INSTITUCIONES

ADEN: Instituto de Competitividad

BM: Banco Mundial

CCG-UC: Centro de Cambio Global UC

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe

CIGIDEN: Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales

CNR: Comisión Nacional de Riego

DGA: Dirección General de Aguas

DGOP: Dirección General de Obras Públicas

DIRPLAN: Dirección de Planeamiento del Ministerio de Obras Públicas

DOH: Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas

IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)

MDS: Ministerio de Desarrollo Social

MMA: Ministerio de Medio Ambiente

MOP: Ministerio de Obras Públicas

PLADECO: Plan de Desarrollo Comunal

SEMAT: Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio de la Dirección General de Obras Públicas

SUBDERE: Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo

TÉRMINOS

ENOS: El Niño-Oscilación del Sur

ERD: Estrategia Regional de Desarrollo

GCM: Modelo de Clima Global (Global Climate Model)

GEI: gases de efecto invernadero

PFI: Programa de Fortalecimiento Institucional

PROT: Planes Regionales de Ordenamiento Territorial

1 Introducción

1

SEBASTIÁN VICUÑA
FRANCISCO MEZA

De acuerdo al último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, IPCC (Pachauri y Reisinger, 2007), el cambio climático está ocurriendo, y el efecto de la actividad antropogénica sobre este proceso es altamente probable. Por otra parte, los escasos avances que se realizan en materia de disminuir las tasas de deforestación y el consumo de energía, en especial de aquella proveniente del uso de combustibles fósiles, indican que los esfuerzos con respecto a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son insuficientes para evitar un cambio en el balance energético de la Tierra con consecuencias climáticas. Es por esta razón que en el último tiempo ha venido cobrando mucha fuerza, particularmente en el contexto internacional, la urgencia de desarrollar estrategias de adaptación para este cambio, que es inminente. La necesidad de generar este proceso de adaptación es, lamentablemente, muy reciente y existe una limitada

experiencia acerca de cómo este debe llevarse a cabo, tanto en países en desarrollo como en países desarrollados.

La adaptación representa el ajuste en los sistemas humanos y naturales en respuesta a los estímulos climáticos actuales o esperables, o sus efectos, de tal manera de reducir el daño o aprovechar las oportunidades beneficiosas (según el IPCC 2007 [Parry et al., 2007]). La adaptación es un proceso continuado e iterativo que abarca cuatro etapas principales:

- Información y sensibilización
- Planificación y diseño
- Implementación
- Monitoreo, seguimiento y evaluación

En general, las respuestas y decisiones encaminadas a la adaptación suelen ir dirigidos, ya sea a 1) aumentar la capacidad de adaptación, o 2) a desarrollar acciones para adaptarse y reducir la vulnerabilidad del sistema.

Además, las acciones de adaptación deben tomarse en un ambiente de incertidumbre que subyace de dos fuentes principales:

- La información y el modelado disponible
- La efectividad y el desempeño de las medidas de adaptación

En este contexto general, es necesario recomendar ciertos enfoques para priorizar acciones (Willows y Connell, 2003; Hallegatte, 2009; IFC, 2011):

- Opciones de "no arrepentimiento" (*no-regret options*): acciones con beneficios que justifican su costo, independientemente de la magnitud y los efectos del cambio climático en el largo plazo.
- Opciones de "bajo arrepentimiento" (*low-regret options*): opciones de bajo costo con grandes beneficios potenciales frente a los impactos del cambio climático. En general, estas opciones son más factibles en la etapa del diseño, como por ejemplo sobredimensionar en cierto grado las infraestructuras para prever el cambio futuro en las acciones reduciendo el riesgo residual futuro.
- Opciones puntuales (*one-off options*): suponen una inversión puntual que proporcione capacidad de afrontar los impactos esperables. Esta estrategia puede ser apropiada cuando hay un gran nivel de confianza en las predicciones y en los cambios futuros.
- Gestión adaptativa (*adaptive management*): las opciones de adaptación se toman de forma progresiva y a medida que se producen los cambios, ajustándose a su vez las acciones. No obstante, es necesario destacar que esta gestión debe ser proactiva, aunque sea secuencial, evitando responder a los daños una vez producidos.
- Soluciones de mutua ganancia (*win-win options*): se caracterizan por mejorar la respuesta ante el cambio climático, al tiempo que proporcionan otro tipo de beneficios.

> Un claro ejemplo de estas opciones lo suponen los ecosistemas naturales en la costa, que proporcionan protección costera frente a la inundación y erosión, pero también contribuyen a la biodiversidad y los recursos naturales para la comunidad (por ejemplo, manglares en zonas tropicales).

En resumen, se trata de evitar prácticas de mala adaptación, es decir, acciones que pueden verse afectadas por el cambio climático, tales como, por ejemplo, distribuir las mercancías más susceptibles a la inundación en zonas expuestas y de cota baja.

En términos generales podemos considerar que una parte importante del proceso de adaptación implica mejorar las capacidades existentes para enfrentar condiciones climáticas variables y adversas. Lo que se busca en este caso es reducir la vulnerabilidad actual o de contexto (entendida como el grado de susceptibilidad inherente del sistema debido a su naturaleza y características), que es independiente de los escenarios climáticos futuros. Otra parte importante del proceso de adaptación tiene relación con reducir la vulnerabilidad asociada a los impactos potenciales que se generarían con el cambio climático. A este tipo de vulnerabilidad se le llama vulnerabilidad futura o de resultado, y es dependiente de los escenarios de cambio climático (O'Brien et al., 2007).

Una vez que se han resuelto de manera importante las condiciones de vulnerabilidad actual, o cuando se deben tomar decisiones cuyos efectos o consecuencias son prolongados en el tiempo, debe considerarse cómo pueden verse alteradas estas decisiones al tomar en cuenta los escenarios futuros. El desarrollo de obras de infraestructura de largo plazo es un buen ejemplo en este sentido.

La infraestructura cumple un rol de soporte esencial para una amplia gama de sectores productivos y, por ende, es un facilitador para el desarrollo económico y para el bienestar social. En Chile podemos encontrar numerosos ejemplos en relación a este rol. Las obras de infraestructura implementadas en el país han permitido mejorar la salud y calidad de vida de la población, facilitando la conectividad entre distintas zonas, desarrollando obras de servicio público y aumentando el acceso a los recursos hídricos para el consumo humano. Por otro lado, se ha fomentado el desarrollo del sector silvoagropecuario mediante obras de regulación y conducción del agua, mejorando y ampliando las alternativas de riego. También se ha logrado extender la capacidad energética del país, para satisfacer a una población y un sector industrial crecientes, lo que a su vez conlleva un crecimiento comercial importante.

En Chile, las proyecciones de cambio climático indican que en el futuro se registraría un alza de las temperaturas, una disminución de las precipitaciones, y un aumento del nivel del mar y de la altura de las olas. Los impactos asociados a este tipo de cambios, generalmente vinculados a posibles modificaciones en los eventos extremos, implican una amenaza para las obras de infraestructura y, consecuentemente, una amenaza también para todos

aquellos sectores o necesidades que dependen o son influenciados por medio de distintas obras. Es por esto que en la actualidad los procesos de desarrollo de inversión de infraestructura, incluyendo la planificación, diseño y operación de obras, deben contemplar la proyección de impactos climáticos dentro de los procedimientos e instancias que forman parte del ciclo de vida de las obras, e ir en búsqueda de metodologías que permitan evaluar alternativas de adaptación.

En miras de asegurar la sustentabilidad a los servicios de infraestructura que presta al país, la Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio (SEMAT), dependiente de la Dirección General de Obras Públicas del Ministerio de Obras Públicas (MOP), solicitó un estudio al Centro de Cambio Global UC (CCG-UC), institución que presenta la primera etapa de un enfoque metodológico para evaluar la adaptación al cambio climático en la infraestructura pública del MOP (CCG-UC, 2012). Con el objetivo de incorporar proyecciones de cambio climático en los procesos de desarrollo de inversión de infraestructura, se elaboró un procedimiento simple para identificar el tipo de obras que requiere de una metodología específica para evaluar su comportamiento bajo escenarios de cambio climático. Para acoger las recomendaciones de los autores de esa experiencia inicial, se prosiguió a esta segunda etapa, financiada por Environment Canada/Environnement Canada, en que el CCG-UC, junto con el recientemente creado Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN), adoptaron estas metodologías para la evaluación de distintos tipos de obras de infraestructura de relevancia nacional. Esta contribución del CIGIDEN se transformó entonces en su primera actividad dentro de su misión, la cual es desarrollar, integrar y transferir conocimientos para crear en Chile un sistema eficaz de preparación, respuesta, recuperación y mitigación frente a fenómenos naturales extremos.

Los resultados de estos trabajos se han compilado en este libro, en el que se presenta la metodología general, así como una propuesta para las metodologías específicas, asociadas a tres obras de infraestructura: embalses, puertos y puentes. Es importante destacar que lo propuesto en esta publicación debe ser considerado como un aporte a un proceso que probablemente tomará tiempo en desarrollarse para incorporar el cambio climático en los procesos de decisión de obras de infraestructura en el país.

El cambio climático nos hace cuestionar el antiguo (y cómodo) paradigma según el cual el uso de información recolectada en el pasado sirve para proyectar condiciones en el futuro. Transitar hacia el nuevo mundo que nos presenta el siglo XXI, donde la "estacionalidad climática" ya no es un supuesto válido, es un camino complejo y de mucha incertidumbre. Por medio de esta obra se pretende demostrar que existen maneras (metodologías) para ir avanzando en este camino. No obstante, la implementación de estas requiere de un amplio debate con respecto a la forma en que planteamos el

desarrollo de infraestructura en Chile y en relación a cuáles son los beneficios que esperamos obtener de ella, tanto para nuestra generación como para las próximas venideras.

Tanto en la SEMAT como en la Dirección de Planeamiento (DIRPLAN) del MOP existe conciencia de la necesidad de incorporar tempranamente el cambio climático en el proceso de planificación e introducir los respectivos requerimientos de adaptación para reducir las vulnerabilidades de un territorio a este fenómeno. Por este motivo, se incluyen en este libro lineamientos para la incorporación del cambio climático desde el proceso de planificación ministerial.

El libro se ha estructurado de la siguiente manera. Después de esta introducción se presenta una síntesis acerca de la información que se dispone a la fecha con respecto a los potenciales impactos del cambio climático, con énfasis en eventos extremos. En una tercera sección se presenta el marco conceptual de la relación entre cambio climático e infraestructura, destacando la necesidad de incorporar elementos de modelación más complejos y simulaciones continuas para mejorar la evaluación de la infraestructura y su capacidad de cumplir frente a los criterios de robustez y flexibilidad. La sección siguiente entrega la propuesta metodológica general y la específica, asociada a tres tipos de obras de infraestructura: embalse, puente y puerto. En cada una de ellas se hace un esfuerzo por identificar agentes causantes (*drivers*), representar la incertidumbre y evaluar opciones mediante sistemas más o menos sofisticados de modelación.

En virtud de lo aprendido a partir de estas propuestas metodológicas, y considerando lo que se requiere para su implementación (brechas) y discusión, se presenta a continuación un capítulo con la estrategia institucional para llevar a cabo el proceso de adaptación en la infraestructura en Chile desde la planificacion ministerial. Así, esperamos cumplir con el principal objetivo que persigue Environment Canada/Environnement Canada: fortalecer el apoyo a países en desarrollo, para cumplir los acuerdos de Cancún sobre la adaptación al cambio climático.

2

Cambio climático

2

SEBASTIÁN VICUÑA
FRANCISCO MEZA

Las bases conceptuales del fenómeno del cambio climático se remontan a finales del siglo XIX. Ya en esa época, el químico sueco Svante Arrhenius nos alertaba sobre las posibles consecuencias que tendría un cambio en la composición química de la atmósfera sobre la temperatura. Actualmente, el dióxido de carbono (CO_2) es señalado como el gas de efecto invernadero más importante. La fuente del CO_2 está asociada a la actividad antropogénica: más de un 80% proviene del uso de combustibles fósiles y el resto de emisiones producto del cambio de uso de suelo (principalmente deforestación). De acuerdo a los registros de la estación de Mauna-Loa en Hawái, la concentración de CO_2 se ha incrementado de 315 partes por millón (ppm), a fines de la década de 1950, a cerca de 380 ppm en 2012. Ambos valores sobrepasan el rango de fluctuación de los últimos 650 mil años (180 a 300 ppm), situándonos –en el contexto geológico– en una era no análoga.

Eventos extremos generados por el cambio climático

A escala mundial, las observaciones de temperatura, tanto en términos de superficie como de altura, indican un calentamiento significativo del planeta. Datos adicionales de temperatura del océano y de la cobertura de la nieve, tanto en extensión como en duración, confirman esta tendencia. También se observa un aumento en el contenido de vapor de agua de la atmósfera a nivel global, que es consistente con el aumento de la temperatura.

De acuerdo al informe SREX del IPCC (Rogelj et al., 2012), el cambio climático provoca cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial, duración y momento esperado de fenómenos extremos meteorológicos y climáticos, y puede resultar en un clima extremo sin precedentes.

Ejemplo de estos cambios son el incremento de la velocidad del viento en ciclones, el aumento en la frecuencia y en la intensidad de huracanes e inundaciones locales, la constatación de sequías más prolongadas y de fenómenos más extremos del Niño y la Niña, entre otros. Existe una contundente evidencia respecto de que los cambios en las olas de calor, el retroceso de los glaciares y/o la degradación del permafrost afectarán los fenómenos de alta montaña, como la inestabilidad de taludes, movimientos de masas y desborde de lagos glaciales. Asimismo, es altamente probable que los cambios en las precipitaciones aumentarán los deslizamientos de tierra en algunas regiones del globo. Por otra parte, se espera que la tendencia al alza en el nivel del mar se incremente hacia fines del siglo XXI. La baja elevación del litoral (sobre todo en pequeñas islas) aumenta la vulnerabilidad frente a impactos tales como inundaciones e intrusión de agua salada en acuíferos subterráneos. Algo preocupante es que algunos fenómenos climáticos extremos pueden ser el resultado de una acumulación de fenómenos meteorológicos o climáticos que no son estimados extremos cuando se consideran de forma independiente.

Las proyecciones futuras de cambio climático se llevan a cabo por medio de la utilización de modelos de circulación global o de clima global (GCM, por su sigla en inglés). Estos simulan las condiciones climáticas del planeta, considerando diferentes niveles de emisión y concentración de gases de efecto invernadero. Lamentablemente, estos modelos tienen una pobre resolución espacial, por lo que a nivel nacional se desarrollaron los primeros escenarios de cambio climático mediante un procedimiento de *downscaling* dinámico.* Estos entregaron resultados de potenciales impactos climáticos utilizando el modelo inglés del Hadley Center bajo dos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero: A2 y B2.

* Procedimiento que usa un modelo numérico regional alimentado por resultados del GCM para generar proyecciones de variables meteorológicas con una mayor resolución espacial, por lo que es capaz de simular las condiciones locales en mayor detalle.

Impactos proyectados para Chile

Ambos escenarios, A2 y B2, muestran aumentos importantes de la temperatura para todo el país. Hacia fines del siglo XXI, los escenarios de emisiones más intensos exhiben incrementos de 3-4°C, mientras que los más moderados indican calentamientos entre 2-3°C. En general, se aprecia que los aumentos de temperatura son más marcados en la zona precordillerana, lejos de la influencia regulatoria del océano Pacífico (ver Figura 2.1).

Con respecto a las proyecciones de las precipitaciones, se observa que hacia el final del siglo XXI se verificarían aumentos en las precipitaciones en el extremo austral, mientras que la zona comprendida entre Antofagasta y Los Lagos experimentaría un descenso en las precipitaciones. En el escenario A2 se proyectan las reducciones más marcadas, con valores entre -30 y -40% (ver Figura 2.2).

Es importante mencionar que, aun cuando la incertidumbre en las proyecciones de cambio climático es alta, para el caso de Chile existe un consenso entre los modelos de circulación global, y estos indican una alta probabilidad de ocurrencia de una

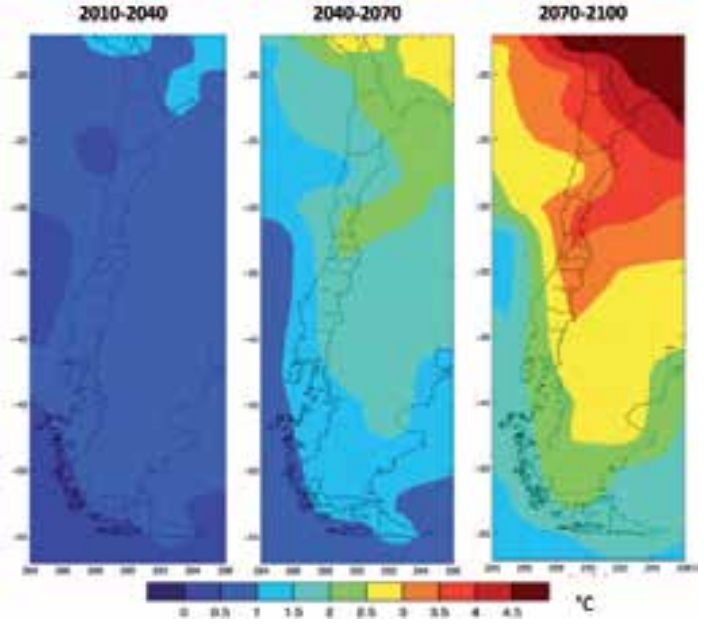


Figura 2.1

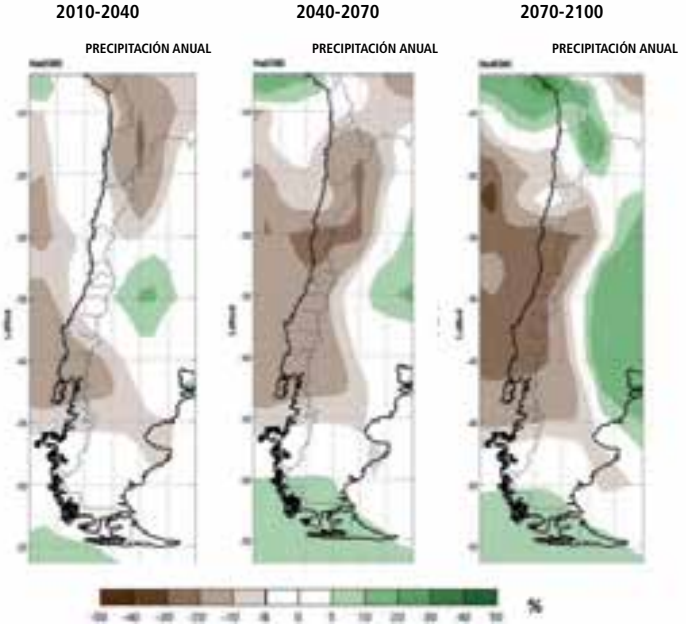
Proyecciones de cambio de temperatura en tres períodos, según los resultados de un *downscaling* dinámico para el escenario de emisiones A2

Fuente: CEPAL (2009).

Figura 2.2

Proyecciones de cambio porcentual de precipitaciones en tres períodos, según los resultados de un *downscalling* dinámico para el escenario de emisiones A2

Fuente: CEPAL (2009).



disminución de precipitaciones entre los paralelos 30-42° S.

Considerando las proyecciones climatológicas futuras presentadas, se esperan impactos importantes en las condiciones hidrológicas de las diferentes cuencas hidrográficas del país, así como también impactos en la ocurrencia de eventos extremos que afectarían directamente la infraestructura nacional, los que se resumen en los puntos que se abordan a continuación (ver Figura 2.3).

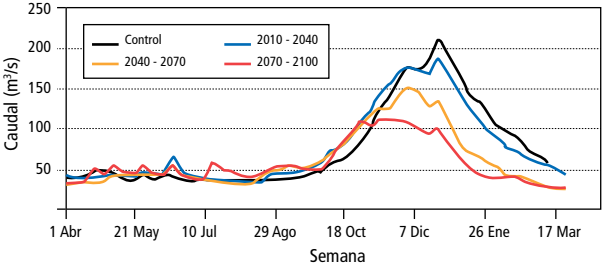


Figura 2.3

Proyecciones de cambios en el hidrograma semanal del río Maipo para tres períodos en un escenario de cambio climático

Fuente: Meza et al. (2013).

Inundaciones

Como ya se ha indicado, las proyecciones de cambio climático para la zona central de Chile señalan que las precipitaciones tienden a disminuir en valores de 30 a 40%, y que las temperaturas tienden a aumentar entre 2 y 4°C, particularmente en regiones precordilleranas. Se genera entonces una situación en la que los montos medios de precipitaciones se reducen, pero la ocurrencia de tormentas cálidas se incrementa en frecuencia. En consecuencia, el riesgo de eventos que generen aumento en la carga de sedimentos y crecidas, con sus daños asociados, aumentaría.

Las crecidas corresponden a un incremento significativo de la escorrentía aportante a un cauce o curso de agua. Este aumento puede deberse a un evento de precipitación líquida o al derretimiento del manto nival. Es interesante constatar, por ejemplo, que el cambio climático tiene dos vías fundamentales de acción en este sentido: por una parte, reduce la posibilidad de precipitaciones sólidas, y, por otra, acelera el derretimiento de nieve acumulada. El aumento de temperaturas sin la ocurrencia de precipitaciones puede originar eventos de derretimiento de masas de nieve o hielo, los que por lo general no implican un impacto mayor debido a los tiempos de respuesta involucrados, si bien hay excepciones (ver Figura 2.4).

Al observarse crecidas en períodos relativamente cortos, es posible que se generen anegamientos e inundaciones que dañen la infraestructura. Este tipo de impactos puede darse por una serie de factores individuales o combinados, entre los que se cuentan: a) tormentas muy intensas que superan la capacidad de infiltración, b) problemas de infiltración (ya sea por baja capacidad de retención, compactación o saturación de los suelos), y c) aportes adicionales por la vía de derretimiento rápido de nieve.

Un ejemplo de esto se puede verificar en los sucesos recientemente observados en la cuenca del Maipo. El lunes 21 de enero de 2013 se registró

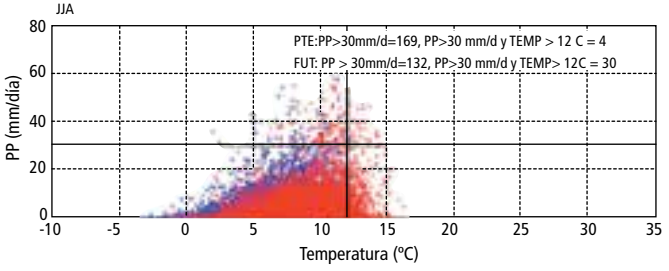


Figura 2.4

Variación de la frecuencia de tormentas cálidas frente a un escenario intenso de emisiones

Fuente: CEPAL (2012).

un aluvión en la zona del estero San Alfonso, en la cuenca del río Maipo, en Santiago. Este aluvión transportó una gran cantidad de sedimentos hacia dicho río. Producto del arrastre de sedimentos asociados a la crecida del río, las plantas de producción de agua potable de Aguas Andinas quedaron inhabilitadas. La localidad donde ocurrió el suceso sufrió además otras consecuencias, tales como el aislamiento temporal de cerca de 80 personas, el colapso de la toma del estero que abastece a un gran número de vecinos del sector y la caída de varios rodados que inhabilitaron la ruta vehicular G-25, que conecta con el Área Metropolitana.

El estudio de CEPAL (2012) proyecta un aumento en la ocurrencia de eventos de altas precipitaciones en días con temperaturas elevadas, indicando que entre los paralelos 35° S y 38° S se espera una reducción de un poco más del 20% de los días con precipitaciones mayores a 30 mm (i.e. de 169 a 132 días); al mismo tiempo se proyectan casi ocho veces más eventos de esta magnitud, que ocurrirían con temperaturas mayores a los 12°C, por lo cual la frecuencia relativa de eventos cálidos capaces de generar estos problemas aumentaría sustancialmente.

Sequías

Chile, debido a la particular forma de su territorio, largo y angosto, y a causa de su posición geográfica, logra abarcar un amplio rango de condiciones climáticas. Sin embargo, el 50% de su superficie (379.783 km^2) corresponde a zonas áridas y semiáridas (Simonetti y Montenegro, 1996), desde el Norte del territorio hasta Concepción. Estas condiciones áridas están dadas por el efecto conjunto del anticiclón del Pacífico, que bloquea el avance de masas frías desde el Sur, y por el efecto aislante que ejerce la cordillera de los Andes frente a las masas atmosféricas. Lo anterior determina un marcado límite biogeográfico alrededor de los 30° S, con bosques subtropicales y templado-lluviosos al Sur de esta latitud, y semidesiertos y desiertos hiperáridos hacia el Norte.

De la misma manera en que existen grandes variaciones climáticas a lo largo de Chile, la disponibilidad de recursos hídricos es igualmente heterogénea, tanto en el tiempo como en el espacio, verificándose la existencia de zonas con abundancia de recursos y otras con permanente déficit (CEPAL, 2009). Son precisamente las zonas áridas y semiáridas las que poseen las mayores limitaciones hídricas, y es allí donde se concentra la mayor parte de la demanda de agua; tales condiciones constituyen un factor limitante tanto para la actividad económica como para el desarrollo urbano de la zona.

A consecuencia de los impactos primarios del cambio climático, en las cuencas ubicadas entre los paralelos 30° y 42° S (zona que abarca entre la Región de Coquimbo y la de Los Lagos, aproximadamente), se esperaría una disminución de los caudales disponibles y un cambio en la temporalidad de los caudales. La primera situación correspondería a un efecto directo de la reducción de las precipitaciones (líquidas y sólidas), mientras que la

segunda sería resultado de la mayor tasa de derretimiento de nieve, a consecuencia del aumento de la temperatura. También se esperaría una disminución importante del hielo acumulado en los glaciares que se encuentran hoy presentes en estas cuencas. La ocurrencia de estos eventos podría implicar una mayor probabilidad de períodos de escasez (ofertas incapaces de satisfacer la demanda) en las cuencas no reguladas y/o que la confiabilidad de los sistemas de almacenamiento se vea comprometida en aquellas cuencas que posean embalses.

La sequía es un fenómeno que afecta a todas las regiones del planeta, siendo la falta de agua para el desarrollo de una actividad su definición más general. Este evento extremo tiene una connotación espacial importante y se desencadena en la medida en que se verifican períodos consecutivos por debajo de un umbral de satisfacción de requerimientos.

La agricultura es el principal sector económico afectado, ya que en términos de utilización del recurso es el mayor usuario de agua; en la actualidad, la agricultura emplea un 78% del total de los recursos hídricos a nivel nacional.

Si bien las sequías hidrológicas se producen a consecuencia de una sequía meteorológica, presentan, no obstante, un comportamiento distinto. Las sequías hidrológicas se pueden predecir según la ocurrencia de una sequía meteorológica, puesto que existe un período de retardo característico en cada cuenca. En general, las sequías hidrológicas son menos intensas y extensas en superficie, pero tienden a ser de mayor duración que las sequías meteorológicas. Ello se debe a que las cuencas actúan como un sistema de regulación natural que amortigua la variabilidad de los fenómenos meteorológicos que afectan a una determinada zona. Por esto, el conocimiento del comportamiento de las cuencas en situación de sequía hidrológica hace posible encarar tanto situaciones de contingencia como decisiones de planificación para mitigar los impactos económicos, sociales y ambientales a más largo plazo, considerando fenómenos como el cambio climático.

Estudios recientes (Meza, 2013) muestran, por ejemplo, que en la zona de Coquimbo la frecuencia de sequías y su magnitud han ido en aumento en las últimas décadas, y señalan que la primera década del siglo XXI ha sido una de las más severas en términos de la duración de períodos con precipitaciones insuficientes.

El estudio de CEPAL (2012) evaluó la probabilidad de sequías futuras en Chile como consecuencia del cambio climático, tomando como definición de evento de sequía aquel período de dos años seguidos en que las precipitaciones caen por debajo del percentil 20. Para la zona centro y centro-norte del país, la tendencia general proyectada fue de un alza en el número probable de eventos de sequía, identificándose incluso zonas de sequía permanente hacia fines del siglo XXI (ver Figura 2.5).

Se estima que el país acumula menos de un 4% del recurso hídrico superficial disponible, lo que evidencia que la capacidad de embalsamiento es aún relativamente baja. Al respecto se ha postulado

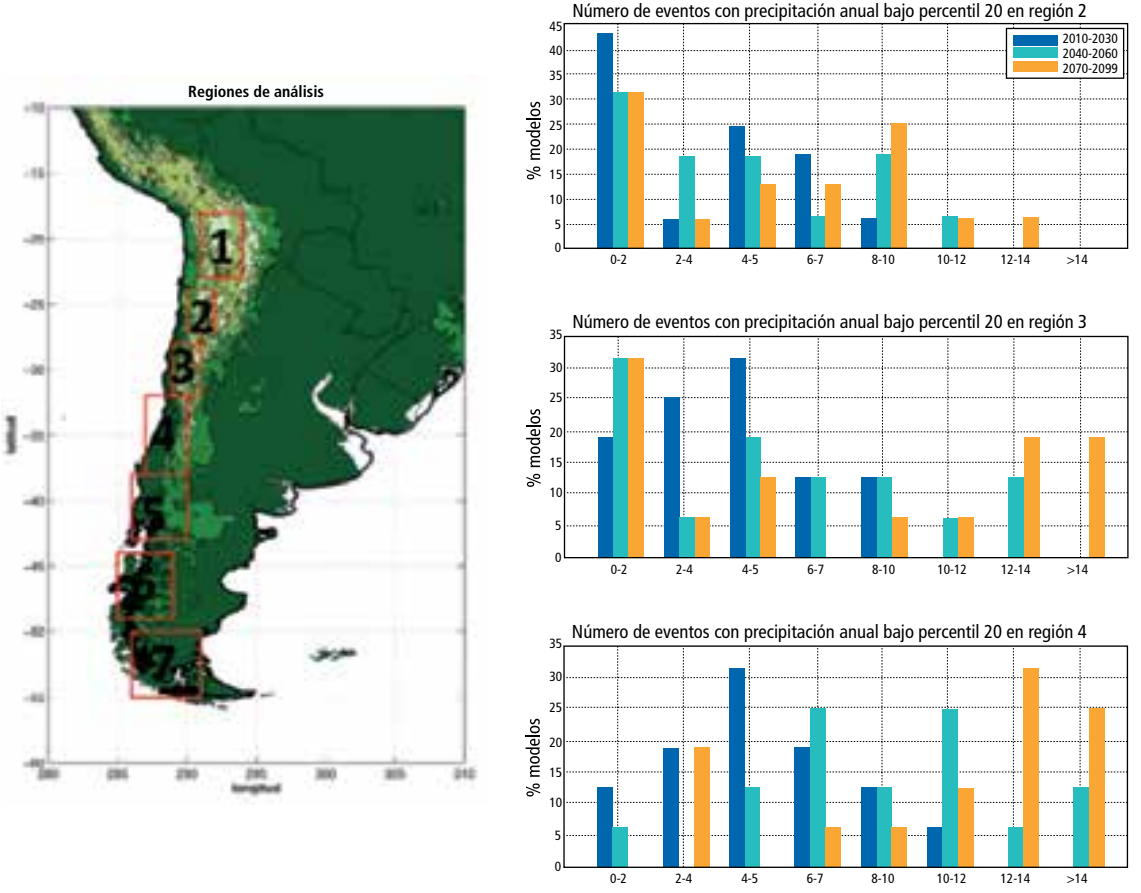


Figura 2.5

Distribución de escenarios futuros con respecto al número de eventos de dos años seguidos de precipitaciones bajo el percentil 20 de condiciones históricas

Fuente: CEPAL (2012).

que para reducir la vulnerabilidad producto del cambio climático, la capacidad de embalse del país debiera crecer en alrededor del 50%, con el objeto de disminuir significativamente los impactos de las sequías.

Una serie de estudios (Meza et al., 2012; Meza et al., 2013; Bonelli et al., 2013) muestra que tanto la agricultura como la demanda de agua urbana podrían ser susceptibles al cambio climático y experimentar (en distinta medida) problemas en la cobertura. Sin embargo, no solo la agricultura y la población de gran parte de la zona central de Chile depende de los caudales superficiales para abastecer sus necesidades de consumo hídrico, sino también diversos sectores productivos (generación hidroeléctrica, minería, industria). Consecuentemente, la infraestructura desarrollada por el MOP, como las obras de riego, se ve amenazada en el cumplimiento de su objetivo (disponibilidad de agua), al ser vulnerables al cambio climático.

Alza del nivel del mar y comportamiento del oleaje

Uno de los efectos esperados del cambio climático es el aumento del nivel del mar, ya sea a consecuencia del derretimiento de glaciares y masas de hielo continentales, como también a consecuencia de la expansión termal del agua. Los datos disponibles de información mareográfica no muestran tendencias recientes claras, por lo que no es posible concluir que este fenómeno esté actualmente ocurriendo (Contreras et al., 2011). Las variaciones observadas son pequeñas en relación a los movimientos cosísmicos que Chile experimenta como consecuencia de los terremotos (ver por ejemplo Vargas et al., 2011). Sin embargo, desde el punto de vista del clima de oleaje, sí parecieran existir tendencias al aumento significativo de alturas de oleaje y cambios en la dirección de incidencia (Molina et al., 2011).

La influencia del fenómeno del Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) es evidente y podría estar determinando las variaciones del nivel del mar, así como la intensidad y la frecuencia de marejadas. Ciertas hipótesis postulan que el calentamiento global afectaría la magnitud y frecuencia del fenómeno ENOS, por lo cual indirectamente se podría esperar que la intensidad de los eventos extremos costeros también aumente.

Estudios desarrollados por CEPAL (2011) señalan que los escenarios futuros de climas de oleaje medio mensual en la costa del Pacífico de América del Sur mostrarían una tendencia al aumento. Para el extremo sur de Chile, este aumento podría llegar a 1 cm/año, mientras que en las costas norte y centro-sur de Chile estas variaciones serían menores, del orden de 2 a 3 mm/año (ver Figura 2.6).

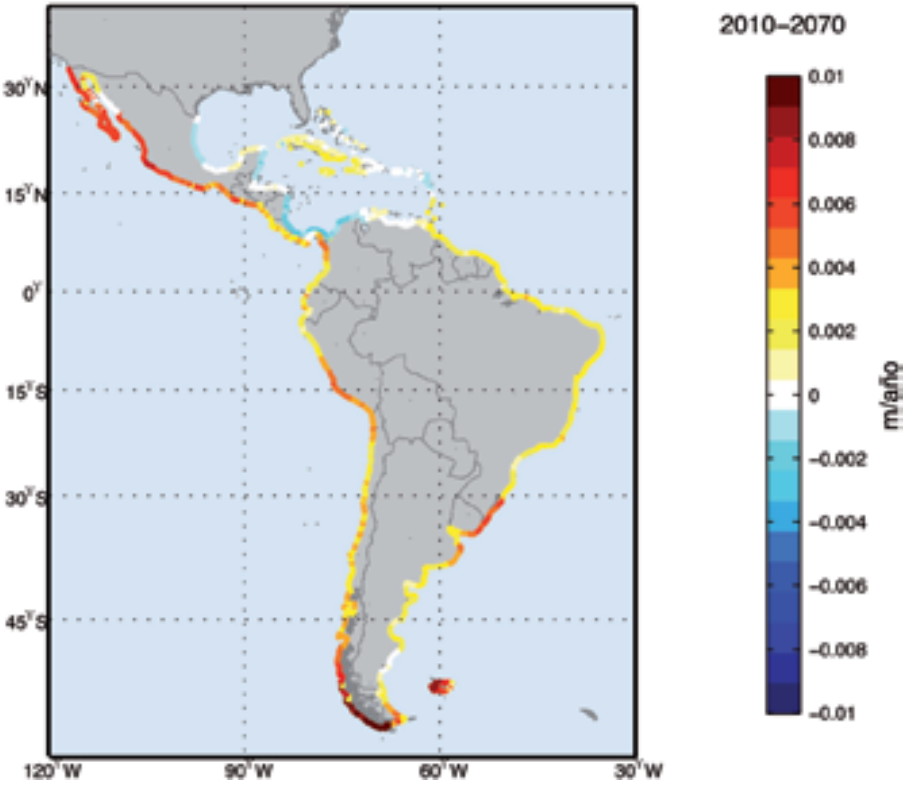


Figura 2.6

Tendencia media para el aumento de altura de ola significante, media mensual en el período 2010-2070 en metros por año

Fuente: Cepal (2011).

Objetivos de adaptación

El reciente reporte especial sobre eventos extremos, SREX del IPCC (Field et al., 2012), muestra que un clima inestable puede provocar cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial, duración y temporalidad de fenómenos extremos meteorológicos y climáticos, y puede asimismo ocasionar eventos meteorológicos y climáticos sin precedentes. No obstante, el clima no es el único factor que determina el riesgo de recibir impactos derivados de los desastres naturales. El desarrollo socioeconómico interactúa con las variaciones naturales del clima y el cambio climático. Una mayor exposición y/o vulnerabilidad de los sistemas determina que la magnitud de los impactos sea mayor. En este sentido, la gestión integral de los riesgos derivados de los desastres naturales, debe diversificar su mirada y salir del paradigma único de pronosticar los eventos climáticos extremos. De esta forma se podría incorporar la vulnerabilidad social y la exposición como factores determinantes del riesgo de desastres, tratando de reducir a un mínimo estos elementos.

3

Infraestructura, incertidumbre y cambio climático

3

JORGE GIRONÁS
GUILLERMO DONOSO
MATÍAS CAMAÑO

El diagnóstico, planificación y diseño en ingeniería deben siempre reconocer e incorporar la incertidumbre, es decir, la imposibilidad de certeza absoluta (Reséndiz, 2008). Esta incertidumbre debe aceptarse como un hecho insuperable y como una barrera infranqueable al conocimiento completo. Ello, sea porque los sistemas naturales y humanos involucrados pueden tener una naturaleza intrínsecamente incierta, o sea porque resulta impráctico reunir toda la información necesaria para un tratamiento determinístico en la práctica. Por lo tanto, en cada proposición y decisión existirá un grado último de incertidumbre imposible de reducir o eliminar.

Lo anterior es aún más patente en el caso particular de la infraestructura, pues esta no solo está sujeta a fenómenos aleatorios del mundo físico, sino también a condiciones de funcionamiento inciertas, producto del comportamiento de los usuarios,

imposible de preverse con certeza. En el contexto del cambio climático, la problemática es incluso más compleja. Esto se debe a que, en el futuro, tanto el medio físico (hidrometeorología, usos de suelo, ecosistemas, etc.) como el comportamiento social y geopolítico, no serán equivalentes a lo observado en el pasado.

Esto determina que las decisiones en infraestructura se vean afectas básicamente a tres factores cruciales bajo el cambio climático (Rogers, 1997): la futura disponibilidad en el tiempo y espacio del recurso físico (por ejemplo, el recurso hídrico); la futura demanda por el recurso o los servicios asociados; y las consecuencias que estos dos factores tienen sobre la sociedad y el medio ambiente. Por lo tanto, se hace deseable incorporar con decisión la robustez y flexibilidad en el diseño de infraestructura para enfrentar los posibles efectos del cambio climático y así minimizar los potenciales costos futuros asociados (U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1993). El primer aspecto permite estar preparado de la mejor manera para el peor escenario, mientras que el segundo asegura respuestas rápidas y efectivas frente a circunstancias variables.

El cambio climático debiese considerarse como uno de los distintos factores restrictivos a tomar en consideración en el diseño de una obra de infraestructura y no se debiera abordar en forma independiente (Mortimer y Walker, 2007). Esto último puede llevar a despreciar o cuantificar erróneamente condiciones futuras de operación de las obras, debido al fuerte vínculo que existe entre las manifestaciones hidroclimatológicas y otras variables del medio físico y social. El cambio climático implica, por una parte, una gran incertidumbre, y, por otra, largos horizontes de tiempo (Fankhauser et al., 1999). Este y otros factores determinan que el tratamiento del cambio climático, en conjunto con otras restricciones de diseño, se haga difícil en la actualidad. En particular, Mortimer y Walker (2007) identifican las siguientes particularidades que, al respecto, debiesen subsanarse en el corto y mediano plazo:

- Si bien se ha logrado generar una gran variedad de estudios relacionados con la respuesta de las obras de infraestructura frente al cambio climático, y se espera que esto aumente en el futuro, aún existen sectores de la infraestructura para los cuales no se ha desarrollado una investigación acabada que pueda ser aplicada con confianza por el común de los planificadores e ingenieros. Un ejemplo de lo anterior lo constituyen aquellas obras en las que se requieren proyecciones de variables hidrometeorológicas con resoluciones temporales y espaciales finas (obras de drenaje urbano, infraestructura sometida a cargas por viento, entre otras).

- Pareciera existir una brecha significativa entre lo que se conoce y practica actualmente en ingeniería, y lo que se necesitaría para abordar temáticas relacionadas con el cambio climático en forma más efectiva. La

ingeniería de infraestructura ya acepta que el cambio climático afectará las prácticas de diseño futuras, pero es a un nivel muy menor que se están adoptando medidas concretas en las actuales tomas de decisiones. Esta última situación puede tener impactos significativos, dado que la vida útil de muchas obras puede superar los 50 años. Este documento y otros trabajos recientes buscan plantear esta situación de manera más explícita.

- Se hace necesario remover o flexibilizar aquellas barreras que traban la integración de consideraciones relativas al cambio climático en las prácticas tradicionales de la ingeniería de infraestructura. Por ejemplo, existen normas y manuales muy relevantes para las distintas etapas del ciclo de vida de un proyecto, en particular en lo referido a la toma de decisiones. Estas normas y manuales deberían introducir ampliamente aspectos concernientes al cambio climático en la práctica, a pesar de que aún existe una mayoritaria falta de apoyo a este tipo de iniciativas, debido a lo nuevo del tema y a las incertidumbres asociadas.

Incorporación del cambio climático en el diseño de infraestructura

Dado que las obras de infraestructura se diseñan para funcionar bajo condiciones y eventos que son inciertos, es imposible afirmar que estas sean totalmente seguras. No obstante, sí es posible concebirlas y diseñarlas de modo que su seguridad sea tan alta como se desee, asumiéndose los costos correspondientes asociados a tal estándar. Este balance entre costos y beneficios es precisamente lo que permite al desarrollador de infraestructura y a las contrapartes técnicas, adoptar soluciones que buscan ser satisfactorias para la sociedad.

El diseño de infraestructura potencialmente afectada por el cambio climático, y en particular por la variabilidad espacio-temporal del recurso hídrico, cubre un gran rango de actividades y decisiones, que incluyen tamaño, tipo, ubicación, tiempos de ejecución y método de operación (Rogers, 1997). Al ser entonces la incertidumbre climática una más de las restricciones que condicionan el diseño de infraestructura, es esperable entonces que las metodologías existentes para manejar la incertidumbre en ingeniería, permitan también incorporar de alguna manera el cambio climático.

Para enfrentar racionalmente lo incierto en el diseño, es útil formular el problema en términos probabilísticos. Esto se hace particularmente indispensable cuando: 1) existe un gran riesgo asociado;

es decir, cuando una o más de las variables que intervienen siembran alta incertidumbre, haciéndose la probabilidad de falla muy incierta; y 2) cuando la falla puede originar pérdidas humanas o económicas significativas, a pesar de que la probabilidad de ocurrencia de aquella sea baja. Aceptada entonces la necesidad de hacer explícita la incertidumbre, surgen dos metodologías para el diseño (Reséndiz, 2008):

- Metodologías que aceptan la incertidumbre y la necesidad de hacerla explícita, pero que no la expresan en forma cuantitativa. Se trata de métodos de uso en estudios iniciales, en los que se requiere una mirada introductoria a problemas de diseño, de manera de identificar variables relevantes, órdenes de magnitud y otros. Estos métodos no ofrecen una objetividad importante y expresan la incertidumbre en términos más bien cualitativos, intuitivos y arbitrarios.

- Métodos que hacen uso formal de la teoría de probabilidades. En este caso se utilizan métodos matemáticos que permiten el cálculo de las probabilidades de ocurrencia de ciertos eventos, por lo general a partir de probabilidades conocidas de otros eventos asociados. Estos métodos cuantitativos permiten evitar en buena medida arbitrariedades, lo que los transforma en la mejor alternativa cuando las inversiones involucradas son significativas dentro de presupuestos limitados. Es deseable que las obras de infraestructura afectadas por un futuro incierto se planifiquen y diseñen con algún método de este tipo.

Ahora bien, existe un amplio rango de alternativas para la incorporación formal de la teoría de probabilidades, lo que implica distintos niveles de complejidad. La elección final de la alternativa dependerá principalmente de la variedad, calidad y resolución de los datos existentes, de la precisión requerida en el diseño, de la magnitud del riesgo involucrado y de la capacidad disponible, tanto técnica como humana. Estos métodos se pueden dividir básicamente en métodos de *screening* y métodos avanzados (Ministry for the Environment, 2008, 2010). Los primeros son métodos simples de carácter inicial para determinar la posibilidad de existencia de riesgo (orden de magnitud), mientras que los segundos buscan describir con mayor detalle los riesgos potenciales. Bajo el contexto del cambio climático parece razonable aspirar a la utilización de este último tipo de métodos. Esto implica lo siguiente:

Levantamiento de información adecuada. Se requiere información de calidad, a escalas temporales y espaciales relevantes para enfrentar el problema de diseño a resolver. Por lo general existen carencias con respecto a la resolución temporal de la información, así como una falta de caracterización espacial de esta. Los registros del pasado y del presente no

deben de ninguna manera ser descartados frente al escenario futuro no estacionario que plantean Milly et al. (2008). Muy por el contrario, esta información es crucial para proyectar con menor incertidumbre lo que ocurrirá en el futuro, y para mejorar la capacidad de modelación y entendimiento de los procesos involucrados (Stedinger y Griffs, 2011).

Uso de herramientas de modelación complejas. Estas herramientas son por lo general de base física. Los modelos empíricos y de base conceptual han sido de gran utilidad; sin embargo, se hace necesario utilizar modelos más complejos que permitan simular los variados procesos involucrados en la generación de los distintos eventos a considerar en el diseño de infraestructura.

Simulación continua vs. simulación por eventos. En la actualidad sigue siendo muy popular el uso de eventos o condiciones de diseño, los que se definen en función del riesgo a adoptar y de situaciones probables. La estimación de estos eventos se hace sobre la base de registros históricos y del supuesto de estacionalidad, y generalmente se traduce en una condición sintética –nunca observada, pero representativa del riesgo involucrado– que sirve de entrada a los modelos utilizados en el diseño y la operación. Parece más razonable comenzar a utilizar la simulación continua, la cual busca "exponer" la infraestructura a condiciones dinámicas de operación, de manera que el diseño sea sensible a la interacción de las distintas variables involucradas y a sus cambios en el tiempo. Este enfoque suele considerar series históricas, pero también pueden ser utilizados escenarios futuros, no estacionarios, propios del cambio climático.

Experiencias piloto. Es crucial entonces incorporar los distintos aspectos anteriormente mencionados en el diseño de infraestructura, documentando claramente los datos utilizados, los procedimientos involucrados y las herramientas usadas. Esto permitirá generalizar y operativizar metodologías y procedimientos para considerar el cambio climático, permitiendo a toda la comunidad, tanto técnica como público en general, comprender e interiorizarse acerca de la relevancia del cambio climático en el desarrollo de la infraestructura.

Las obras de infraestructura han sido y seguirán siendo un elemento fundamental en el funcionamiento de la sociedad y de los distintos sectores económicos. Diseñadas de manera apropiada, las obras ayudarán a mejorar la calidad de vida de las presentes y próximas generaciones, las que se verán expuestas a futuras condiciones inciertas.

El país debe comenzar a evaluar cómo enfrentará el diseño de esta infraestructura, tanto sobre la base de su propia experiencia como también de la de otros países. En estas páginas se han revisado someramente las características principales del diseño de infraestructura, pero no se debe olvidar que es probable que las herramientas más potentes de adaptación requieran de una sólida etapa previa:

la planificación, que debe ser abordada en forma decidida. Una y otra vez, la experiencia nos ha mostrado los cuantiosos costos que implican el diseño y la implementación de obras de infraestructura sin la planificación correcta.

Infraestructura en Chile

El Ministerio de Obras Públicas (MOP) es la Secretaría de Estado encargada del planeamiento, estudio, proyección, construcción, ampliación, reparación, conservación y explotación de las obras públicas fiscales; además, es responsable de la aplicación de la Ley de Concesiones y del Código de Aguas. El MOP se rige por su Ley Orgánica, Decreto Fuerza de Ley (DFL) Nº 850 de 1997, que establece la organización, función, atribuciones y deberes de los distintos servicios que componen el Ministerio.

El MOP provee al país de numerosos productos y servicios, tales como:

a. planes de inversión de servicios de infraestructura;
b. planificación, gestión y fiscalización de los recursos hídricos del país;
c. servicios de infraestructura pública de conectividad vial, aeroportuaria, portuaria, marítima, fluvial y lacustre (caminos, autopistas, puentes, túneles, aeropuertos, aeródromos, rampas, pasarelas, entre otros);
d. servicios de infraestructura pública de recursos hídricos (embalses de riego, defensas fluviales, colectores de aguas lluvia, agua potable rural, entre otros);
e. servicios de infraestructura de edificación y espacios públicos (obras de edificación pública, puestas en valor de edificación de carácter patrimonial, borde costero, centros cívicos, entre otros).

El desempeño del MOP se evidencia a través de los indicadores de la provisión de infraestructura pública a lo largo del país. Al analizar las estadísticas se constata que Chile ha alcanzado importantes avances en el ámbito de la dotación, mantenimiento y operación de infraestructura, impulsados tanto por el financiamiento público como por la contribución privada a través del Programa de Concesiones.

El Instituto de Competitividad ADEN elabora un ranking anual de competitividad sobre la base de los siguientes criterios: cobertura de necesidades básicas, aspectos institucionales, infraestructura, estabilidad macroeconómica, salud, educación, expectativas de la población, competencia en los mercados, eficiencia en las relaciones laborales y acceso a la tecnología. En 2012, Chile fue líder en competitividad entre 18 países de Latinoamérica. Al desglosar en los criterios evaluados, se desprende que nuestro país lidera en lo concerniente a la cobertura de necesidades básicas, una de las funciones del MOP. Sin embargo, Chile presenta rankings más bajos en el criterio de infraestructura. Por lo anterior, y frente al desafío futuro del país de mejorar y mantener el ritmo de crecimiento de su economía a través

del tiempo y gracias a sus exportaciones, se requiere de un gran esfuerzo para que los diversos sectores productivos, especialmente aquellos que exhiben un gran potencial futuro, mejoren sus condiciones de competitividad. En tal contexto, la provisión de infraestructura adquiere una relevancia fundamental como instrumento para estimular la productividad y la competitividad de las actividades económicas.

Ministerio de Obras Públicas

La **misión** del Ministerio de Obras Públicas es proveer al país de servicios de infraestructura para la conectividad, la protección del territorio y las personas, la edificación pública y el aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos, asegurando el cumplimiento de los estándares de servicio y la calidad de las obras, la provisión de agua, el cuidado de los recursos hídricos y del medio ambiente, para contribuir al desarrollo sustentable y a la competitividad del país, promoviendo la equidad, la calidad de vida y la igualdad de oportunidades de las personas.

La **visión** es contribuir a la construcción de un país integrado e inclusivo a través de la calidad, la eficiencia, la sustentabilidad y la transparencia con las que provee los servicios de infraestructura y por medio de los cuales cautela el equilibrio hídrico que el país requiere, como consecuencia de un proceso de planificación territorial participativo, orientado a las necesidades de la ciudadanía, con personal calificado y comprometido, en un clima que promueve el desarrollo y la innovación.

El MOP cuenta con un proceso de planificación integrada de la infraestructura pública, así como de sus servicios, el cual vincula las necesidades productivas sectoriales y territoriales con una visión de largo plazo. Este proceso contribuye a la determinación oportuna de las inversiones en el sector infraestructura, asegurando una oferta de instalaciones y servicios compatible en el largo plazo con las demandas que plantea el proceso de desarrollo.

La Dirección de Planeamiento (DIRPLAN) es la instancia asesora estratégica del MOP en materias de planificación, definición de políticas, coordinación general y priorización de planes de estudios, proyectos y ejecución de las obras, de acuerdo a las necesidades del país que comprende el quehacer ministerial. La DIRPLAN fue creada mediante el DFL N° 150 del 3 de agosto de 1953, a través del cual se procedió a la reestructuración del Ministerio.

La DIRPLAN propone a la autoridad ministerial las políticas y planes de desarrollo de servicios de infraestructura y de manejo de recursos hídricos de largo y mediano plazo que orienten y establezcan las decisiones de inversión, basándose en un conocimiento e información integrada territorial y sectorial, considerando los lineamientos estratégicos de la autoridad, realizando la gestión presupuestaria y el seguimiento de las inversiones. De esta manera busca responder a las necesidades de desarrollo sustentable del país.

En la actualidad, el proceso de planificación de infraestructura en el MOP no considera de forma explícita el cambio climático y las necesidades de

adaptación que este implica. No obstante, en la DIRPLAN del MOP existe conciencia de la urgencia de incorporar tempranamente en el proceso de planificación la variable del cambio climático y las necesidades de adaptación a este para reducir las vulnerabilidades de un territorio a este fenómeno.

Las funciones de planificación y provisión de infraestructura inherentes al MOP son las actividades de planificación, regulación, contratación e inspección fiscal de consultorías y obras, así como las actividades de planificación, medición, administración y gestión de los recursos hídricos. Además, el MOP realiza las acciones para proveer, preservar y mejorar las obras de infraestructura pública y sus servicios. Los estudios de preinversión, en cambio, así como el diseño y la construcción de infraestructura, son actividades que se llevan a cabo a través de proveedores.

La mantención de la infraestructura se efectúa tanto en forma directa como a través de proveedores, y se clasifica en las siguientes: Conservación Mayor, Menor, Rutinaria, de Obras de Riego Fiscal, de Explotación Provisional de Obras, de Aguas Lluvia, de Cauces, de Obras de Agua Potable Rural, de Obras Viales y de Infraestructura Marítima Portuaria, entre otras. La magnitud de la inversión en conservación el año 2009 fue de un 28% respecto del presupuesto total de inversión en infraestructura del MOP.

El Ministerio realiza su labor a través de una subsecretaría y dos direcciones generales. La Dirección General de Aguas (DGA) tiene como función primordial la aplicación del Código de Aguas; la Dirección General de Obras Públicas (DGOP) articula la gestión técnica de los servicios de infraestructura.

Existen cinco servicios ejecutores (Dirección de Aeropuertos, Dirección de Arquitectura, Dirección de Obras Hidráulicas, Dirección de Obras Portuarias y Dirección de Vialidad) y tres servicios no ejecutores (Dirección de Planeamiento, Fiscalía y Dirección de Contabilidad y Finanzas). Todos ellos tienen el carácter de servicios públicos centralizados. Existe, además, una sexta unidad ejecutora, la Coordinación de Concesiones de Obras Públicas, que no tiene carácter de servicio.

Ministerios relacionados

Los planes de infraestructura del MOP deben considerar los planes de desarrollo de otros ministerios. Algunos de los instrumentos de planificación existentes de otras secretarías del Estado considerados en el proceso de planificación del MOP, son: Instrumento de Planificación Territorial (IPT) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo; Planes de Transporte Integrado del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones; Planes de Ordenamiento de Uso del Borde Costero de la Subsecretaría de Fuerzas Armadas, Ministerio de Defensa; Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT) de la Subsecretaría de Desarrollo Regional, Ministerio del Interior y Chile Emprende de las Agencias Regionales de Desarrollo Productivo (ARDP), vinculado con los gobiernos regionales PLADECO (Plan de Desarrollo Comunal, a nivel municipal), entre otros.

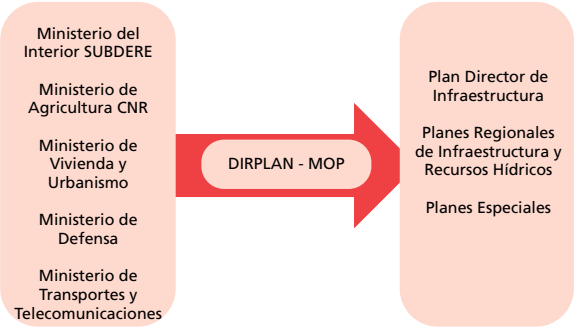
Uno de los instrumentos claves de planificación de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) en el desarrollo de los planes de infraestructura del MOP es el Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT). Este es un instrumento de mayor amplitud y generalización que los de planificación sectorial. El PROT posibilita la consideración de los objetivos económicos, sociales, culturales y ecológicos de la sociedad, todos los cuales están contenidos en las Estrategias de Desarrollo Regional (ERD). Este instrumento contempla un horizonte temporal de mediano plazo (10 años).

El proceso de planificación de obras de infraestructura del MOP y los ministerios considerados en este, se presentan en la Figura 3.1.

En una siguiente etapa es necesario realizar una evaluación de las obras. En este proceso participa el Ministerio de Desarrollo Social, el cual establece las metodologías de evaluación socioeconómicas, y el Servicio de Evaluación Ambiental.

Figura 3.1

Ministerios considerados en la planificación de obras de infraestructura



Fuente: Elaboración propia.

4

Metodología propuesta para la inclusión del cambio climático en la planificación de infraestructura

4A

Metodología general

GUILLERMO DONOSO
SEBASTIÁN VICUÑA
MATÍAS CAMAÑO

A continuación se presenta la propuesta desarrollada para tenerse en consideración al momento de decidir si es necesario incorporar la evaluación de la adaptación al cambio climático en una obra de infraestructura determinada. Antes de describir la propuesta metodológica, es necesario aclarar que esta no especifica cuál es la metodología que debe tenerse en cuenta para llevar a cabo esta evaluación. En el presente capítulo se presentan estudios de caso en los cuales es necesario incorporar la adaptación al cambio climático a la evaluación de las obras. A través de estos casos se espera ejemplificar la manera como incorporar la adaptación al cambio climático en los proyectos de infraestructura realizados por el Ministerio de Obras Públicas (MOP).

Se presenta aquí, de manera esquemática, la propuesta metodológica. Se plantea en un inicio determinar la etapa en que se encuentra el proceso

de gestión de la obra de infraestructura. Si la obra se encuentra en una fase de planificación, se propone responder la siguiente pregunta: ¿la necesidad de llevar a cabo la obra de infraestructura se puede ver influenciada por condiciones climáticas? En el caso de que la respuesta sea negativa, la evaluación de la obra de infraestructura deberá seguir las guías tradicionales de evaluación de obras del MOP. En caso contrario se establece que la evaluación de la obra de infraestructura deberá incorporar el cambio climático a partir de las etapas de diseño.

Si la obra se encontrara en etapa de diseño, prefactibilidad o factibilidad, se plantea en la metodología una primera pregunta clave asociada al largo de la vida útil de la obra. Si la obra fuera de corta duración (menor a 10 años, por ejemplo) se propone simplemente seguir actualizando la información de base en relación a las condiciones hidroclimáticas y/o de vulnerabilidad de la obra o del servicio que ella proveería. Esta proposición se basa en que las necesidades de adaptación al cambio climático se presentan más bien en un mediano a largo plazo, aunque puede ser óptimo adelantar algunas acciones de adaptación. En el caso de que la vida de la obra sea suficientemente larga (por ejemplo, mayor a 20 años), se propone incluir el cambio climático en la siguiente etapa de la metodología.

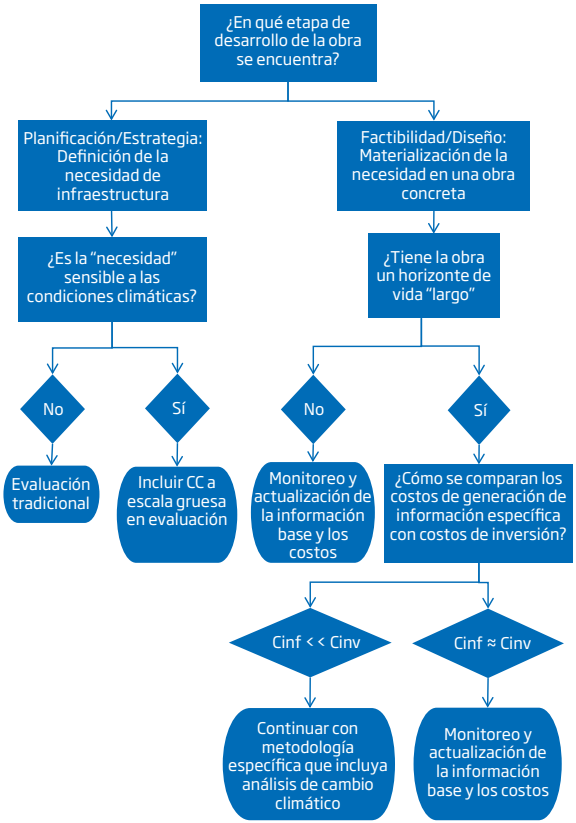
Bajo este criterio de horizonte de la vida útil de la obra, es posible descartar de una manera provisional (a falta de una aplicación más formal de la metodología por parte del MOP) la consideración del cambio climático en la evaluación de obras de protección fluvial. Los horizontes de evaluación de este tipo de obras son generalmente cortos, por lo que en este caso puede resultar más conveniente actualizar permanentemente el monitoreo de la información hidrometeorológica para llevar a cabo la mejor evaluación posible. Se excluyen de esta consideración las obras de control aluvional, debido a que dependiendo de su magnitud pueden estar asociadas a horizontes de evaluación y costos mayores, contexto en el que escenarios de cambio climático deberían ser incorporados en su evaluación.

En el caso de que la obra presente una vida útil suficientemente larga, es conveniente estimar los costos y desafíos que deben tomarse en consideración para el desarrollo de escenarios climáticos futuros. Esto es especialmente relevante cuando se requiere de información a escalas de tiempo muy bajas (por ejemplo, precipitación de dos horas) o en espacios muy reducidos. En ambos casos, las condiciones locales (a diferencia de las condiciones globales que rigen los modelos de clima global) tienen mayor relevancia.

En esta etapa se propone comparar los costos requeridos para generar la información de base, de manera de proyectar escenarios futuros necesarios para el análisis de impactos (es importante tener en mente que en algunos casos el costo es infinito o muy alto, ya que no es posible obtener ciertos tipos de información) con los costos totales de inversión. Si estos costos son comparables en cierta medida con los costos de inversión de la obra propiamente tal, entonces no es pertinente utilizar metodologías

Figura 4A.1

Propuesta metodológica ante la toma de decisión respecto de si es necesario incorporar la evaluación de la adaptación al cambio climático (CC) en una obra determinada



Fuente: CCG-UC (2012).

específicas; se debe continuar, en cambio, con medidas de monitoreo tanto de las condiciones hidroclimáticas como de la vulnerabilidad de las obras que se espera, en este caso, duren por períodos prolongados. En caso contrario, en que los costos de la información sean menores a los costos totales de inversión, se propone incorporar el análisis del cambio climático en las siguientes etapas de evaluación.

Bajo este criterio de comparar los costos de inversión con los de generar la información requerida, es posible descartar de una manera provisional (a falta de una aplicación más formal de la metodología por parte del MOP) la consideración del cambio climático en la evaluación de las siguientes obras:

- Obras de drenaje urbano: los efectos del cambio climático son actualmente difíciles de estimar para las escalas espaciales y temporales relevantes en el caso del drenaje urbano. Las estimaciones futuras de precipitaciones y temperaturas aplican más bien a escalas espaciales y temporales mayores a las utilizadas en el dimensionamiento de obras de drenaje (escalas temporales del orden de minutos u horas, y escalas espaciales de cientos de m^2 o pocos km^2). Estas estimaciones sí son más aplicables al evaluar el comportamiento de ríos y cursos de agua importantes, con cuencas aportantes de tamaño significativo, que crucen centros urbanos y puedan generar inundaciones en eventos de crecida.
- Obras de agua potable rural (APR): los efectos del cambio climático son actualmente

difíciles de estimar para el tipo de información que se requiere en la evaluación de muchos proyectos de APR. Para muchos casos de APR, la información que se necesita es de carácter local y muchas veces asociada a condiciones de aguas subterráneas. Las estimaciones futuras de precipitaciones y temperaturas provenientes de modelos de circulación global o de clima global (GCM, por su sigla en inglés) aplican más bien a escalas espaciales y temporales mayores (por ejemplo, a nivel de cuenca). Nos encontramos en este caso en una situación en la que los costos de obtener la información asociada a la disponibilidad de agua para este tipo de proyectos es compleja de conseguir en el marco de escenarios de cambio climático. Reconociendo, sin embargo, que este tipo de obras son de larga duración y que el cambio climático puede tener importantes consecuencias con respecto a los costos esperados para el desarrollo del proyecto (en todo su ciclo de vida), se propone –tal como se sugiere en el marco general– que una manera de abordar este tipo de obras sea a través de una continua actualización de la información de base (entre ellas, costos), requerida para el desarrollo de estas obras. Este tipo de monitoreo lo puede desarrollar la Dirección General de Aguas (DGA), encargada del otorgamiento de los derechos necesarios para el desarrollo de los proyectos de APR. Los resultados de este monitoreo pueden ser transmitidos al Ministerio de Desarrollo Social para ser contemplados en los criterios para asignar financiamiento para este tipo de proyectos. Es importante a nivel de planificación que este tipo de temas sean tratados en instrumentos estratégicos como la Política de Desarrollo Rural actualmente en desarrollo por la SUBDERE del Ministerio del Interior.

A continuación se presentan tres estudios de casos de la incorporación de la adaptación al cambio climático en la evaluación de obras para el caso de embalses de riego, puertos y puentes. A partir de estos casos será necesario avanzar en el desarrollo de metodologías específicas de evaluación de obras determinadas, que consideren la adaptación al cambio climático.

Independientemente de si se desarrolla o no una metodología específica, se prevé necesario que los sistemas de monitoreo de variables hidroclimáticas sean mejorados. El estudio y monitoreo de cuencas nivo-pluviales es particularmente importante, dado que estas son más sensibles a cambios en las precipitaciones y temperaturas. También se estima relevante monitorear el estado de las diferentes obras de infraestructura del MOP.

4B

Aplicación a embalses de riego

FRANCISCO MEZA
SEBASTIÁN VICUÑA
CRISTIÁN CHADWICK

Introducción

Al evaluar los posibles impactos del cambio climático por sector, fue posible constatar la importancia que tienen los recursos hídricos para el desarrollo económico y social. De tal forma, los impactos que el cambio climático tenga sobre la oferta hidrológica darán lugar a consecuencias en cascada que repercutirán en las diversas actividades económicas y humanas que se benefician de este recurso (CEPAL, 2009). De esta manera, bajo un escenario en el que disminuye la oferta hídrica y aumenta la demanda, la gestión del agua será un componente esencial que deberá adaptarse para hacer frente a estas presiones climáticas y socioeconómicas (Bates et al., 2008).

Bajo este contexto, la infraestructura hídrica juega un rol fundamental en el proceso de adaptación del recurso hídrico, y debe desarrollarse para

responder a las nuevas condiciones. Parte fundamental del proceso de adaptación es la capacidad de identificar las nuevas necesidades de infraestructura hídrica, con el fin de poder planificar de manera adecuada el uso y mantención del recurso.

La presente sección ofrece una metodología para detectar y justificar la necesidad de construir embalses que permitan almacenar y regular la entrega de agua en las cuencas.

En una cuenca hidrográfica es posible definir una oferta y una demanda por el recurso hídrico. La oferta es brindada por la disponibilidad de agua presente en determinado período y lugar, lo cual está a su vez definido por el tipo de régimen de río presente en la zona y por las condiciones climáticas que lo rodean. Por su parte, la demanda hídrica está definida por los distintos usos que se le da al recurso al interior de la cuenca (riego, energía, agua potable, uso industrial, otros).

Bajo condiciones ideales se espera que la oferta hídrica sea superior a la demanda. Sin embargo, en climas áridos y semiáridos la demanda tiende a aumentar durante los períodos en los que la oferta tiende a disminuir, y viceversa. En este contexto, los embalses cumplen un rol fundamental, permitiendo regular los caudales de agua a partir de su acumulación y posterior asignación entre los diferentes usuarios que compiten por su uso: agricultura, minería, agua potable, energía, turismo, entre otros.

Chile central ofrece condiciones climatológicas y topográficas que son ideales para el desarrollo de una agricultura de gran calidad. Un clima dominantemente mediterráneo, con una marcada oscilación térmica y fuerte estacionalidad de las precipitaciones, permite el desarrollo de una gran diversidad de cultivos. Adicionalmente, las lluvias –que por lo general caen en invierno– son acumuladas como parte del manto nival en la cordillera de los Andes, conformando una reserva considerable de agua. Esta nutrirá los ríos durante los meses de primavera y verano, permitiendo el abastecimiento de agua para riego en los meses de mayor demanda.

El desarrollo de esta agricultura de riego requiere de obras de infraestructura que, tanto en el tiempo como el espacio, permitan desplazar la oferta de agua hacia aquellos puntos donde existan las mejores condiciones para la adaptación de cultivos. El Estado chileno, a través de diferentes instituciones, ha cumplido un rol relevante en la planificación y construcción de estas obras de infraestructura.

En esta sección se propone una metodología para evaluar la necesidad de embalses de riego y sus beneficios bajo escenarios de cambio climático.

Metodología propuesta

En una primera etapa, se identifica la necesidad de contar con una determinada obra de infraestructura. Esta necesidad se debe analizar en virtud del potencial agrícola en una determinada región y de la oferta de agua existente. La infraestructura de riego va a ser requerida cuando la *oferta de agua segura* sea muy baja en relación a la demanda de agua para desarrollar el potencial agrícola.

En esta etapa estratégica, de definición básica de la necesidad de infraestructura, participan de manera activa actores que velan por las necesidades a nivel regional político y a nivel de cuenca. En este sentido, procesos claves son aquellos asociados al desarrollo de la Estrategia Regional de Desarrollo (ERD), Planes Regionales de Ordenamiento Territorial (PROT) y Planes Directores de Cuenca. Por otra parte, la Comisión Nacional de Riego (CNR) sintetiza estas necesidades a nivel nacional por medio del desarrollo de estrategias de infraestructura de riego (Política Nacional de Riego). Estos procesos desembocan finalmente en un Plan Regional de Infraestructura y Gestión de Recursos Hídricos.

Una vez definida la necesidad básica de contar con obras de riego en una cuenca, se inicia un proceso de evaluación de costos y beneficios asociados a dicha obra. En esta etapa cobra gran relevancia la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del MOP. La DOH será la institución que actúe como proponente de la obra en sí, y el Ministerio de Desarrollo Social (MDS) será la instancia que entregue los lineamientos generales y los parámetros requeridos para el proceso de evaluación de la obra y sus méritos.

El cambio climático puede influir significativamente en todas las etapas de decisión de una obra de riego. La combinación de condiciones ideales para el desarrollo de la agricultura de riego mencionada inicialmente en la metodología, está en riesgo si atendemos las proyecciones futuras que se tienen para el clima en el Chile central. El aumento en las temperaturas asociado a la disminución en los niveles de precipitación en el centro del país, podría alterar de manera considerable la disponibilidad de agua para riego, al disminuir la disponibilidad de agua en los ríos, y al disminuir la cantidad de agua almacenada en la cordillera. Por otra parte, el cambio en las condiciones climáticas puede afectar asimismo las demandas por agua de diferentes cultivos. Ambos efectos son susceptibles de alterar tanto la necesidad básica de la obra de riego como las condiciones frente a las cuales esta obra operaría en el futuro, y, por ende, tales efectos condicionarían los potenciales costos y beneficios de la misma.

Si se sigue la estructura de la metodología general planteada en el capítulo anterior, se puede apreciar que en relación con el estudio de la necesidad de infraestructura, se requiere contemplar escenarios de cambio climático (ver Figura 4A.1). En la siguiente sección se discute una propuesta metodológica que apunta en esta dirección.

Por otra parte, con respecto a la evaluación detallada de una obra de riego, se deberían considerar escenarios de cambio climático si el horizonte de evaluación y uso de la obra es suficientemente largo. El horizonte de evaluación varía de acuerdo al tipo de obra, entre los que destacan los siguientes: obras de captación, derivación, conducción, distribución, regulación, trabajos de aplicación y obras de drenaje (CNR, 2011). En la mayoría de los casos, el horizonte de evaluación no supera los 30 años. Sin perjuicio de lo anterior, existen obras (en especial obras de captación como embalses y algunas obras de conducción) cuya ejecución es decidida a través del proceso

de decisión estratégica señalado, y cuyo horizonte de operación supera en creces dicho período. En el caso de un embalse, por ejemplo, su vida útil puede llegar a los 100 años. Esto no es así para obras menores, tales como obras de distribución y de drenaje. En base a lo anterior, es manifiesta la necesidad de atender escenarios de cambio climático en la evaluación de embalses de riego. A continuación, al respecto se presenta una propuesta metodológica.

Etapa de planificación

Criterios y consideraciones en estudios de viabilidad de embalses

Durante el período de planificación de un embalse, existe una serie de criterios que deben ser considerados para evaluar su viabilidad. Estos criterios pueden ser clasificados en temas de carácter técnico, económico, ambiental y social (Lozano et al., 2010), escenario que exige una instancia de trabajo interdisciplinario.

En relación a la viabilidad técnica de un embalse, es necesario tomar en cuenta tanto aquellas variables técnicas que justifican la existencia de un embalse (equilibrio entre oferta y demanda hídrica) como aquellas variables que garantizan la seguridad de la construcción. Una vez que el estudio de prefactibilidad y factibilidad es desarrollado, sigue un proceso de evaluación económica que, en la mayoría de los casos, termina siendo la variable decisiva para aprobar o rechazar un proyecto. Esto, desafortunadamente, por sobre consideraciones de carácter ambiental o social.

La construcción de un embalse es un proceso de alta complejidad, que interviene en el equilibrio natural de una cuenca y causa significativos impactos ambientales. Entre estos últimos sobresalen la alteración del caudal mínimo ecológico, el arrastre de sedimentos y la inundación de importantes superficies. Estas y otras consecuencias exigen procedimientos de calidad, y si bien este tipo de obras impactan el medio ambiente, la legislación chilena actual les otorga la posibilidad de desarrollar medidas que mitiguen, corrijan, compensen o reduzcan sus impactos ambientales negativos (Lozano et al., 2010). No obstante, hoy en día existe una mayor conciencia ambiental por parte de los ciudadanos. Esto ha originado una activa participación de estos en todas las etapas de evaluación de los proyectos, originando reclamos por supuestos incumplimientos a cabalidad de los procedimientos legales de evaluación o ejecución para este tipo de construcciones.

Al igual que en el tema ambiental, la construcción de un embalse provoca impactos sociales positivos y negativos, los cuales deben ser evaluados. Uno los aspectos sociales más desfavorable es el desplazamiento de la población residente en la zona de inundación del embalse.

Lo señalado antes da cuenta de que la viabilidad de un proyecto no se define únicamente por la disponibilidad o no de agua en la cuenca. Los desafíos que impone el cambio global sobre la gestión de los recursos hídricos en Chile, plantean la necesidad de reevaluar los procesos de decisión, planificación y diseño de obras de infraestructura. Durante el proceso

de planificación es fundamental considerar la incorporación de elementos que contemplen una visión integral (a nivel de cuenca como un todo y no a nivel de secciones de cuenca) de los posibles beneficiados y perjudicados asociados a la construcción de la obra, así como una visión de largo plazo que advierta los posibles cambios en la disponibilidad de agua asociados al cambio climático (Vicuña y Meza, 2013).

Normalmente, los estudios de embalses se enfocan en la determinación del balance hídrico y en la estimación del volumen de agua disponible que permitiría una seguridad de abastecimiento. En función de esto y de características fisiográficas propias, se determina la cantidad de superficie que puede ser abastecida por medio de sistemas de riego. En último término, los volúmenes óptimos a embalsar son el resultado del análisis de costo y beneficio. Sin embargo, para el caso específico del cambio climático, es posible que en el futuro sea relevante determinar el volumen a almacenar que mantendría una cierta demanda de agua que ya está establecida. Las siguientes secciones describen las metodologías a aplicar en ambos casos.

Metodología simple para evaluar la relación entre volumen a acumular y superficie a regar

Si lo que se desea es asegurar un cierto nivel de cobertura para una superficie con una seguridad de riego determinada, el primer paso para detectar necesidades de infraestructura es comparar el caudal disponible (m^3/mes) (i.e. caudal descontados los otros usuarios y el caudal ecológico) y evaluar la disponibilidad para una probabilidad de excedencia (normalmente el 85%). Luego se construyen curvas de demanda en m^3/mes que son fruto de la demanda de agua de lámina neta de riego (m/mes) multiplicado por la superficie a regar (m^2). Si la oferta de agua es superior a la demanda en cada mes, se concluye que no hay necesidad de infraestructura.

Si en uno o más meses la demanda para un cierto nivel de superficie supera a la oferta, pero la oferta anual es todavía superior a la demanda anual, entonces se pueden evaluar los beneficios que contraería el establecimiento de un embalse de regulación. El valor del embalse en este caso residiría en ajustar el volumen promedio en el año para satisfacer años deficitarios y así poder suplir la demanda.

El cambio climático puede aumentar la demanda (por relocalización de cultivos y efectos directos de la temperatura sobre las necesidades netas de riego derivados de la evapotranspiración) y puede bajar la disponibilidad de los caudales por efectos de la reducción de la precipitación, menor cobertura nival, o bien, debido a cambios en la estacionalidad de tales cultivos, con lo que se hace más evidente la necesidad de infraestructura.

Una vez que se logra dilucidar el valor y la necesidad de la creación de una obra de infraestructura, la definición del volumen del embalse normalmente es fijado mediante un modelo de simulación operacional, que permite dimensionar el embalse sobre la base de ciertas reglas de operación, para una determinada seguridad de riego.

Detección de la necesidad de regulación artificial de algún cauce para una demanda determinada

Una manera sencilla para apreciar las necesidades de regulación artificial de un río para una demanda determinada, se logra mediante la relación:

$$\delta = Q(t) - D(t)$$

donde:

$Q(t)$ = Caudal natural del río en un cierto tiempo.
$D(t)$ = Demanda asociada al río en un cierto tiempo.

Si esta diferencia es negativa, significa que la demanda supera a la oferta en cierto período, por lo cual puede ser útil crear un embalse que almacene el agua necesaria para satisfacer la totalidad de la demanda. En cambio, si la diferencia entre la oferta y la demanda de agua en cualquier período es siempre positiva, incluso en tiempos de sequía, es claro que no hay necesidad de regular los caudales del río, al menos para satisfacer la demanda. Para una regulación de riego se hace necesario apreciar esta diferencia mensualmente.

Diagrama de RIPPL

El diagrama de RIPPL (Fattorelli y Fernández, 2007) ayuda a obtener una primera idea de la capacidad de operación necesaria que debe tener un embalse para abastecer una determinada demanda asociada a un cauce. Sirve como un elemento de visualización y prediseño de un embalse de regulación.

A continuación se presentan los pasos a seguir para generar este método, ilustrándolos mediante un ejemplo de su cálculo aplicado al río Elqui, en el sector de Algarrobal, en el norte de Chile.

1. Se obtiene una serie de tiempo de caudales medios mensuales de un período de 20 años o más.

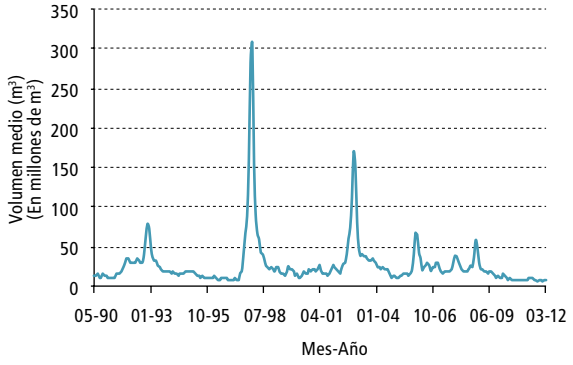
2. De la serie del caudal registrado se obtienen los volúmenes de agua, los cuales corresponden a la integración temporal de las medias de los caudales mensuales, los que se expresan en m^3 (ver Figura 4B.1). Para una mayor precisión se pueden generar series de caudales con igual probabilidad de ocurrencia que la histórica, para así obtener un mayor grado de seguridad en cuanto a la elección de los períodos críticos para el diseño hidrológico de un embalse.

3. Se genera una serie con los volúmenes acumulados y se grafica en el tiempo. Si esta curva crece lentamente significa que el cauce pasa por un período de sequía; en cambio, si la curva presenta un aumento considerable en varios períodos implica que hay mayor abundancia de agua (ver Figura 4B.2). La pendiente de esta curva en un cierto tiempo corresponde a la variación de caudal en dicho período, por lo tanto es el aporte del río durante ese lapso.
   Para una mayor precisión a la curva de volúmenes acumulados se puede restar la evaporación estimada del estanque.

4. Del gráfico de volumen acumulado del río Elqui en Algarrobal, se aprecia que el caudal presentó

Figura 4B.1

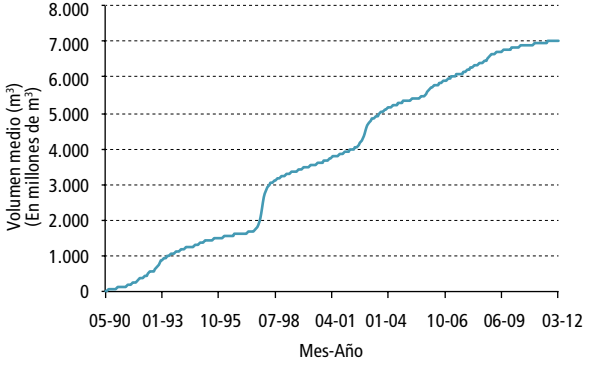
Volumen medio mensual (m³). Río Elqui en Algarrobal, período 1990-2012



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4B.2

Volumen acumulado (m³). Río Elqui en Algarrobal, período 1990-2012



Fuente: Elaboración propia.

un aumento significativo en los años 1997 a 1998, como también entre los años 2002 a 2003. Asimismo, se aprecian períodos de sequías en los cuales la curva se asemeja a una línea horizontal, como ocurre en los períodos comprendidos entre los años 1995-1996, 2004-2005 y 2010 a 2012.

5. Luego se selecciona un período crítico. Este corresponde a un período en el cual hay déficit de agua, es decir, el aumento de la curva de volumen acumulado es pequeño por varios períodos.

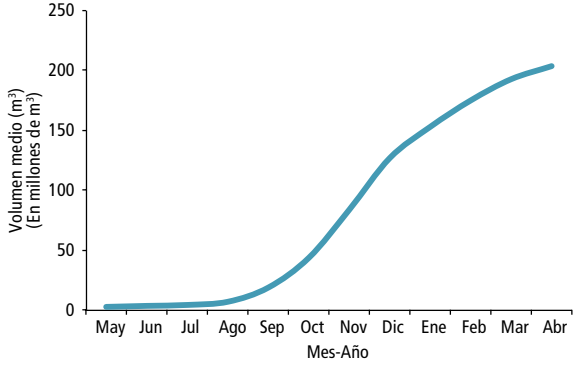
6. Se obtiene la curva de demanda de agua. Para ello se estima la superficie de riego (m²) y se multiplica por la tasa de evapotranspiración mensual expresada en m/mes. A partir de ahí se calcula la demanda acumulada. Para simplificar el análisis en este caso, se supone que la demanda es constante entre años, variando mes a mes según la demanda de riego (ver Figura 4B.3).

7. Desde el comienzo del período crítico se grafica la demanda acumulada. Esta debe interceptar la curva de volúmenes acumulados para que el embalse se llene; de lo contrario, la demanda es muy elevada para este río (ver Figura 4B.4).

8. Finalmente se busca la máxima separación entre la línea de las demandas acumuladas y la curva de volumen acumulado para estimar la capacidad de operación del embalse (ver Figura 4B.5).

Figura 4B.3

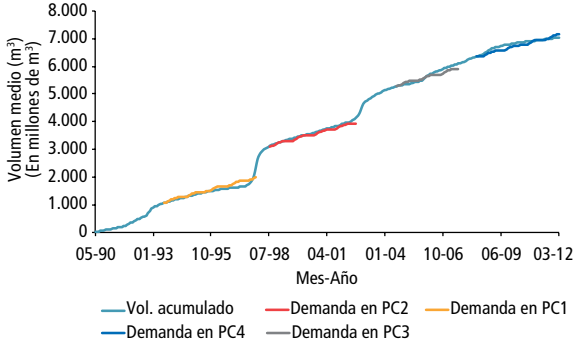
Demanda agrícola acumulada en un año (m³). Río Elqui en Algarrobal



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4B.4

Relación de oferta y demanda de agua acumulada. Río Elqui en Algarrobal

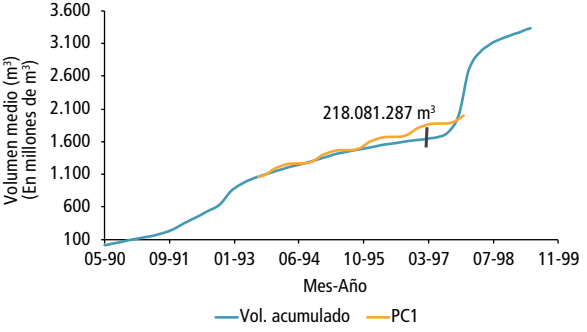


Fuente: Elaboración propia.

Nota: PC = Período Crítico.

Figura 4B.5

Período crítico con la mayor brecha entre oferta y demanda para río Elqui en Algarrobal



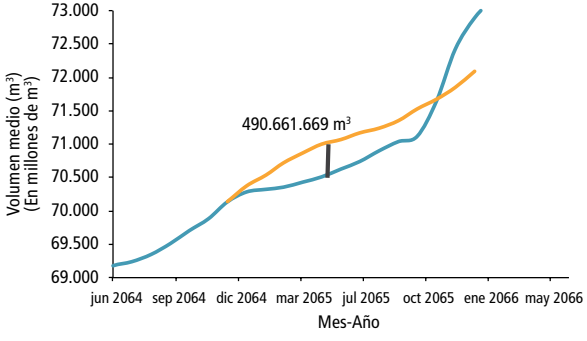
Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del cambio climático y la detección de necesidades de infraestructura, este método se adapta de manera tal que se reemplaza la serie de caudales observados y de demanda de agua del período presente, tanto por las series de tiempo que representan los caudales futuros (normalmente obtenidos por la vía de un modelo hidrológico alimentado con proyecciones de datos de precipitaciones y temperatura), como por los datos de proyecciones de demanda de agua en función del cambio climático (y cómo ello incide en la tasa de evapotranspiración), así como también por las proyecciones de uso de suelo, los cuales determinan la superficie de cultivos agrícolas en una región hacia el futuro. La Figura 4B.6 muestra una aplicación de esta

metodología para un escenario hipotético en la cuenca del río Maipo. En esta oportunidad, se han generado series sintéticas de datos hidrometeorológicos (precipitación, temperatura y caudales) para la zona del Maipo en El Manzano, en la Región Metropolitana, para fines del presente siglo. Se ha supuesto un escenario de cambio climático con un incremento medio de la temperatura de 3°C y una reducción de precipitaciones del 30%. En el presente, esta cuenca no se encuentra regulada, por lo que se ha aplicado la metodología de RIPPL para determinar el volumen del almacenamiento que sería necesario para mantener la superficie de riego actual; no obstante, la demanda se incrementaría a consecuencia del cambio climático. Se estima que en las condiciones futuras será necesario invertir en infraestructura con un embalse de riego de 500 millones de metros cúbicos, a fin de garantizar la disponibilidad de agua de riego para la superficie agrícola actual.

Figura 4B.6

Determinación de las necesidades de infraestructura de embalse para el río Maipo en un escenario de cambio climático según la metodología de RIPPL



Fuente: Elaboración propia.

Etapa de evaluación costo/beneficio

Una vez definida la necesidad estratégica de construir una obra como un embalse, se debe proceder a evaluar su prefactibilidad y posteriormente su factibilidad. En ambos casos, el uso de escenarios futuros que consideren el cambio climático, podría alterar los beneficios asociados a la operación del embalse. Estos escenarios no son considerados en las metodologías actualmente en uso, tales como el Manual para el Desarrollo de Grandes Obras de Riego, y la Metodología para la Formulación y Evaluación Socioeconómica de Embalses y Obras Hidráulicas Anexas con Fines Múltiples desarrollados por la Comisión Nacional de Riego y el Ministerio de Desarrollo Social. Ambos documentos contemplan la necesidad de desarrollar un análisis de escenarios futuros, pero solamente a modo de diagnóstico, sin considerar de manera formal escenarios de cambio climático en el análisis de los beneficios futuros asociados a la operación del embalse. Por lo general, en este caso se recurre a las series climáticas históricas. Los escenarios climáticos considerados deberían incidir en varios aspectos que se definen en esta etapa, tales como el tamaño óptimo del embalse, los cambios en la seguridad de riego o el número de hectáreas adicionales que es posible regar.

Por medio de esta propuesta se busca definir una estrategia simple para incluir escenarios climáticos futuros en el proceso de análisis de prefactibilidad y factibilidad de embalses de riego. Uno de los elementos más complejos para poder incorporar estos escenarios futuros se asocia con la incertidumbre que se genera al reconocer la posibilidad de que las condiciones históricas no se vuelvan a repetir en el futuro. Parte de esta incertidumbre se asocia con el escepticismo con respecto a la ocurrencia del fenómeno del cambio climático. Pese a que el último informe del IPCC (*AR4*) (Pachauri y Reisinger, 2007) ha sido claro en reconocer la ocurrencia de un cambio en el clima, con una fuerte atribución a la actividad humana, todavía el debate está abierto y aún existen quienes dudan del origen antropogénico de estos cambios, atribuyéndolos más bien a un proceso de variabilidad natural. Un segundo nivel de incertidumbre se asocia a nuestra capacidad limitada de predicción respecto de las condiciones climáticas futuras. Dos variables relevantes en este sentido se asocian al escenario futuro de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales determinan la magnitud del posible cambio en las condiciones atmosféricas, y al modelo de clima global (GCM) utilizado para traducir estos escenarios en variables climáticas.

En esta propuesta se trabaja con el segundo nivel de incertidumbre. Es decir, se asume que el cambio climático está ocurriendo, pero no se sabe con exactitud cuál va a ser la magnitud de los impactos en el futuro.

Con respecto a esta incertidumbre es importante tener en cuenta que existen en la actualidad un número cercano a 20 modelos de clima global que operan bajo el alero de distintas instituciones a nivel mundial. A su vez, cada uno de estos modelos considera, al proyectar las condiciones climatológicas en el futuro, distintos escenarios de emisión de GEI. Estos escenarios están acoplados a distintas trayectorias que puede tomar el desarrollo del planeta en cuanto a ciertas variables claves, tales como la población, el desarrollo económico, el nivel de integración de los países y el desarrollo tecnológico.

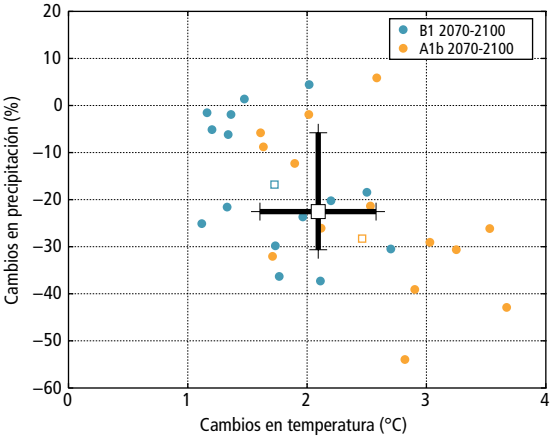
A modo de ejemplo, en la Figura 4B.7 se presenta un conjunto de escenarios posibles para el período 2070-2100, representativos de la proyección esperada para la zona del valle de la cuenca del río Limarí. En esta figura se puede apreciar el alto nivel de dispersión existente entre los escenarios, la cual se da, en parte, debido a las diferencias entre los distintos escenarios de emisión de GEI. Mediante diferentes colores, se presenta la información para los distintos escenarios de GEI. De los escenarios considerados, el escenario A1b corresponde a un escenario con alto nivel de emisiones de GEI versus el escenario B1 de bajo nivel de emisiones. En este caso se observa que el cambio de temperatura proyectado para el escenario A1b es claramente superior al proyectado para el escenario B1. Sin embargo, dentro de un mismo escenario de emisiones existe una gran dispersión de resultados producto de las diferentes proyecciones de los modelos de cambio global. Este alto nivel de dispersión impide la incorporación de

medidas de adaptación que sean robustas, ya que los resultados que en un caso pueden ser positivos, en otro pueden resultar adversos.

En cambio, cuando se considera un futuro más cercano, el nivel de incertidumbre se reduce significativamente. La Figura 4B.8 presenta las proyecciones para los mismos escenarios, pero para el período 2010-2040 (es decir, los próximos 30 años). Allí es posible observar que las diferencias entre escenarios de GEI son menos notorias (los promedios para cada uno de estos escenarios son prácticamente iguales entre sí) con respecto a las proyecciones de largo plazo y, además, la dispersión entre modelos de cambio global es bastante menor. Se incluye en la figura, a modo de síntesis de estos escenarios, un intervalo de confianza del 50% con respecto al promedio en proyecciones de precipitación y temperatura. Este intervalo de confianza muestra el rango probable (en este caso un 50% de probabilidad) de condiciones futuras en esta cuenca.

Figura 4B.7

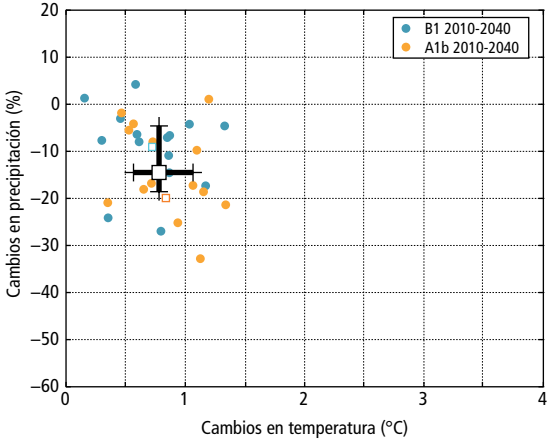
Escenarios de cambio climático en la cuenca del Limarí, asociados a diferentes modelos de cambio global y a escenarios de emisión de GEI para el período 2070-2100



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4B.8

Escenarios de cambio climático en la cuenca del Limarí asociados a diferentes modelos de cambio global y a escenarios de emisión de GEI para el período 2010-2040



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se incluye un intervalo de confianza del 50% con respecto al promedio en proyecciones de precipitación y temperatura

El nivel de incertidumbre que se presenta a mediano plazo es más manejable para el uso en el diseño de medidas de adaptación o concretamente en la evaluación de beneficios de embalses, como se discute más adelante. Estos escenarios temporales más cercanos se traslapan también con los escenarios de toma de decisiones de diversas políticas e instrumentos relativos al riego en el país. Es por lo mismo que planteamos la incorporación del análisis de incertidumbre en un horizonte cercano, calculado a 30 años.

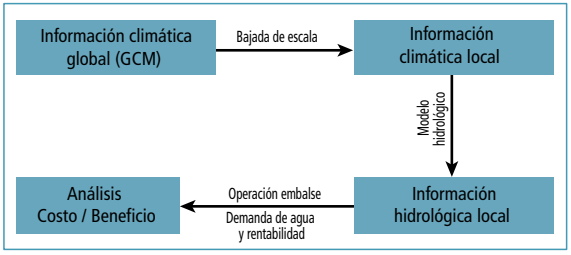
Para poder desarrollar el análisis de incertidumbre con respecto a escenarios climáticos futuros y su impacto en la operación de embalses de riego, hay que reconocer que la información que se entrega en las figuras anteriores (asociada a modelos GCM) no puede ser usada directamente para evaluar condiciones futuras locales. Para llevar a cabo este análisis se requiere hacer una bajada de escala a la situación local y posteriormente usar un modelo hidrológico que nos permita entender los posibles cambios en la disponibilidad de recursos y, consecuentemente, los posibles impactos económicos en la situación con y sin la obra de infraestructura. Un esquema general con los pasos a seguir se presenta en la figura a continuación (ver Figura 4B.9).

Con excepción de la primera parte (la generación de los escenarios climáticos locales), los elementos ilustrados en este esquema son usados comúnmente en la evaluación de costos y beneficios de embalses, y por ende no requieren de explicación.

Con respecto a la generación de estos escenarios climáticos locales, existe una serie de metodologías

Figura 4B.9

Esquema general de propuesta de inclusión del cambio climático en análisis costo/beneficio de embalses de riego



Fuente: Elaboración propia.

alternativas. Uno de los métodos más precisos corresponde a la realización de un *downscaling* a nivel regional de diferentes escenarios climatológicos, para luego utilizarlos en modelos hidrológicos. Sin embargo, este proceso es costoso y no está libre de incertidumbres en relación a la posibilidad de que a través de este proceso se logren representar de forma correcta las condiciones climáticas locales.

De manera alternativa se puede realizar una metodología de *sensibilidad*. Esta se basa en una perturbación gradual de las variables climáticas más relevantes, en este caso, temperatura y precipitación. De este modo se crea un alto número de escenarios correspondiente al conjunto de perturbaciones de ambas variables. La perturbación de sensibilidad se lleva a cabo tomando en cuenta la

serie climática histórica (idealmente por un período de 30 años) que incluye la variabilidad climática histórica. El costo de implementación de esta metodología es bajo, sin embargo, no permite incorporar posibles cambios en la variabilidad climática en el futuro.

En esta oportunidad, debido principalmente a su simpleza y bajo costo de implementación, se ha considerado la metodología de sensibilidad. La explicación específica de la metodología se presenta de manera ilustrativa con un caso específico. En una sección siguiente se propone una aplicación específica para el caso del embalse Valle Hermoso, proyecto actualmente en evaluación para su construcción en la cuenca del río Limarí.

Caso embalse Valle Hermoso

Con el objetivo de controlar la variabilidad hidrológica, y de esta manera brindar una mayor confiabilidad en el riego y aumentar el área regable, es que se proyecta la construcción del embalse Valle Hermoso. Este sería construido en el río Pama, ubicado en la parte alta de la subcuenca del río Cogotí, que es parte de la cuenca del río Limarí, perteneciente a la comuna de Combarbalá, en la región de Coquimbo, en el norte de Chile. El embalse, ubicado aguas arriba del embalse Cogotí, tendría como objetivo asegurar el riego a agricultores que, al no contar con infraestructura de regulación (como sucede aguas abajo del río Cogotí), sufren con las variabilidades de disponibilidad hídrica, haciéndose imposible el desarrollo del potencial agrícola.

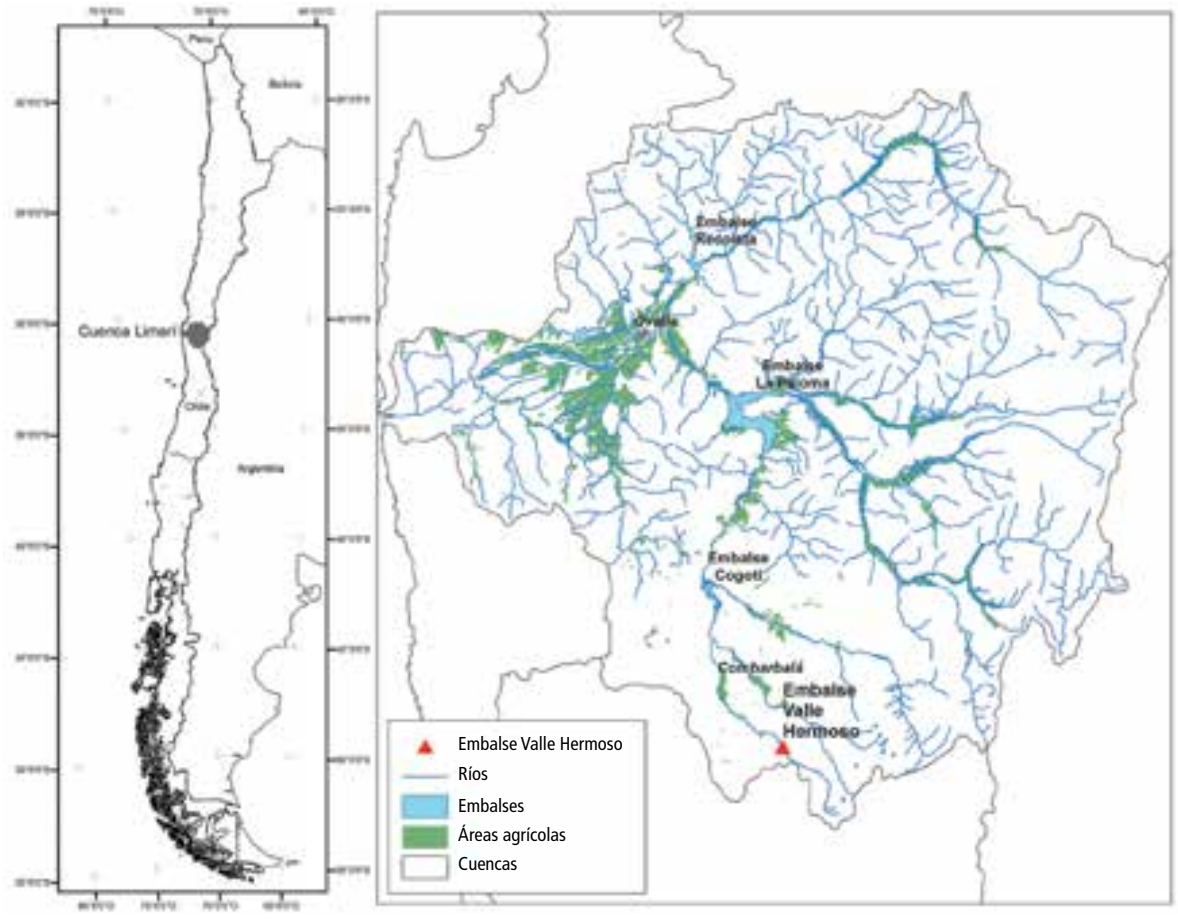
Para estudiar los beneficios asociados al desarrollo de este embalse, la Dirección de Obras Hidráulicas encomendó la realización de un estudio.* Entre sus objetivos estaba la identificación del lugar para la ejecución del embalse, llegándose a la conclusión de que, entre varios posibles, Paso El Buey era el más adecuado (ver Figura 4B.10). Adicionalmente se realizó un estudio del tamaño óptimo del embalse, llegándose a la estimación de 20 millones de metros cúbicos.

La razón por la cual se construiría el embalse es que en la zona actualmente se pueden regar 110 ha con un 85% de confianza. No obstante, bajo la cota del potencial embalse existen 1.180 ha que se podrían regar por medio de aquel, de acuerdo a lo que indican los resultados del estudio encomendado por la DOH. Esto significa que con la construcción del embalse Valle Hermoso se aumentaría en más de 10 veces la superficie agrícola bajo riego, lo que generaría un alto impacto en la economía local. A esto se puede agregar que la existencia de un embalse incentiva la mejora de los sistemas de riego, lo que se traduce en una mejor utilización del recurso, escaso en la región.

* Estudio realizado por MN Ingenieros Ltda., en agosto de 2011. Diseño Construcción Embalse Valle Hermoso, río Pama, Comuna de Combarbalá, Región de Coquimbo.

Figura 4B.10

Ubicación propuesta para embalse Valle Hermoso en la cuenca del río Limarí



Fuente: Elaboración propia.

El embalse también serviría para abastecer de agua potable a los poblados ubicados bajo este, lo que permitiría dar apoyo a 17 servicios de agua potable rural en el valle del río Pama, con beneficio para alrededor de 2.675 personas.

Otro beneficio del embalse sería la asociación de este a minicentrales eléctricas ubicadas en los alrededores: una, al pie de la presa, de 334 KW de potencia; y otra, aguas abajo, de 648 KW de potencia. Estas centrales operarían con los caudales de riego y eventuales excedentes.

El embalse constituiría una seguridad necesaria para una de las principales fuentes económicas de la zona. De acuerdo a los análisis encomendados por la DOH, de no concretarse su ejecución, la agricultura se vería afectada debido a la gran variabilidad en la disponibilidad de agua.

La evaluación del valor económico del embalse Valle Hermoso fue realizada tomando en cuenta la situación hidrológica prevalente en el río Pama. A continuación presentamos la aplicación de una metodología para poder evaluar el valor de este embalse bajo condiciones climáticas proyectadas para el futuro en la subcuenca.

Aspectos específicos de la metodología de evaluación costo/beneficio a través del análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad comienza con la creación de los diferentes escenarios climatológicos de perturbación. Para el caso de estudio del proyecto Valle Hermoso se desarrollaron un total de 275 escenarios, correspondientes a la combinación de escenarios de cambio de temperatura (11 escenarios cada uno, asumiendo un aumento paulatino de 0,5°C) y de cambio de precipitación (25 escenarios, de los cuales 12 corresponden a disminuciones paulatinas de 2,5% en precipitación, 12 a aumentos de precipitación correspondientes y un escenario sin cambios).

De esta manera, se generó el total de escenarios con condiciones climatológicas perturbadas (en el caso del estudio en Valle Hermoso se perturba el período histórico mayo 1975 a abril 2005). Estos escenarios fueron utilizados en un modelo hidrológico que había sido previamente calibrado para la subcuenca de análisis. El modelo hidrológico utilizado fue la plataforma WEAP (Yates et al., 2005) y el desarrollo de la aplicación en esta subcuenca se puede revisar en Vicuña et al. (2011). Previo a la utilización de la metodología se tuvo que delimitar la cuenca aportante al punto donde se construiría el embalse Valle Hermoso y también se debió revisar que los resultados del modelo fueran similares a las condiciones hidrológicas consideradas en el estudio de la DOH.

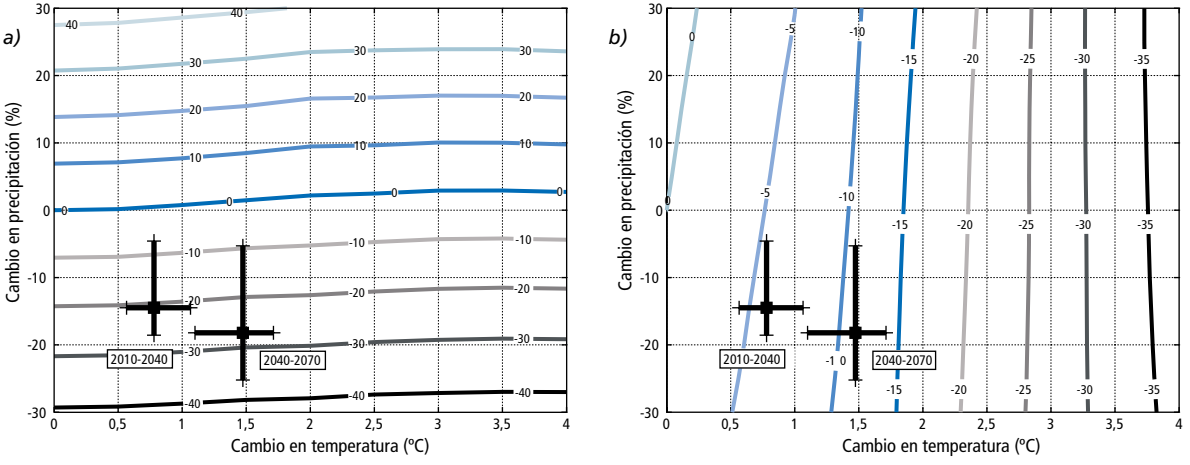
En la Figura 4B.11 se presenta un primer ejemplo de cómo se pueden usar los escenarios de sensibilidad. Esta figura fue preparada tomando en consideración el caudal del río Pama, en el punto donde se construiría el embalse Valle Hermoso. Cada uno de los escenarios de sensibilidad genera una nueva condición hidrológica en esta subcuenca. Las líneas en la figura muestran líneas con el mismo cambio en caudales con respecto a la situación base (en términos

porcentuales). Si se sigue la línea de cero cambios, por ejemplo, se puede apreciar que existe una pérdida de caudal asociada a un aumento de temperatura que debe ser compensado con un aumento de precipitaciones. Esta es la razón por la cual la línea está levemente inclinada hacia arriba.

De esta manera, se pueden resumir en una sola figura los cambios potenciales que ocurrirían frente a un cambio climatológico. Para poder acotar estos escenarios a lo que se podría esperar como el futuro en la cuenca, se presenta en la figura una cruz que representa de manera sintética los posibles escenarios climáticos futuros. La generación de esta cruz se había explicado con anterioridad (ver Figura 4B.8). Se puede generar ahora un rango de los posibles cambios en las condiciones hidrológicas en la subcuenca. Para este caso en particular, lo que podemos ver es que el cambio del caudal promedio esperado para el período 2010-2040 es del orden de -20%, con un rango entre -10% y -25%. Por otra

Figura 4B.11

Cambios en (a) caudal promedio anual (porcentaje de valor histórico) y (b) centroide del hidrograma (número de días) de la subcuenca del río Pama asociados a análisis de sensibilidad climática medidos con respecto a la condición histórica



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se incluye un intervalo de confianza del 50% con respecto a las proyecciones de precipitación y temperatura para los períodos 2010-2040 y 2040-2070.

parte, podemos apreciar que el efecto del aumento de temperatura sobre los procesos de acumulación y derretimiento de nieve signifique un adelantamiento del centroide del hidrograma del orden de cinco días para el mismo período.

El modelo desarrollado contempló, en una etapa posterior, una revisión de las superficies de tierra bajo riego y las demandas de agua de acuerdo a los distintos tipos de cultivos. Esto permite analizar la cobertura de riego esperada bajo distintos escenarios climatológicos e hidrológicos. También fue necesario desarrollar el escenario futuro con respecto a la infraestructura y demanda de agua utilizado en el estudio de la DOH. En este sentido, se incorporó en el modelo el embalse Valle Hermoso, tomando en cuenta sus características físicas y operacionales.

También se generó el escenario futuro de demanda de agua en relación al aumento en superficie de riego estimado en la evaluación de la DOH y el patrón o *mix* de cultivos considerado. Fue necesario, finalmente, generar una metodología para llevar a cabo la evaluación de la rentabilidad económica. Para esto se desarrolló la siguiente metodología:

1. Para cada año, dentro de un escenario determinado (con o sin embalse), se evalúa la cobertura de demanda de agua para cada cultivo o grupo de cultivos.
2. En función de la cobertura mínima a lo largo del año, se determina la superficie real que puede ser cubierta con riego para ese año en particular.
3. Considerando las rentabilidades por hectárea para cada grupo de cultivos (tomado del estudio de DOH), se determina finalmente la rentabilidad esperada para ese año y escenario.

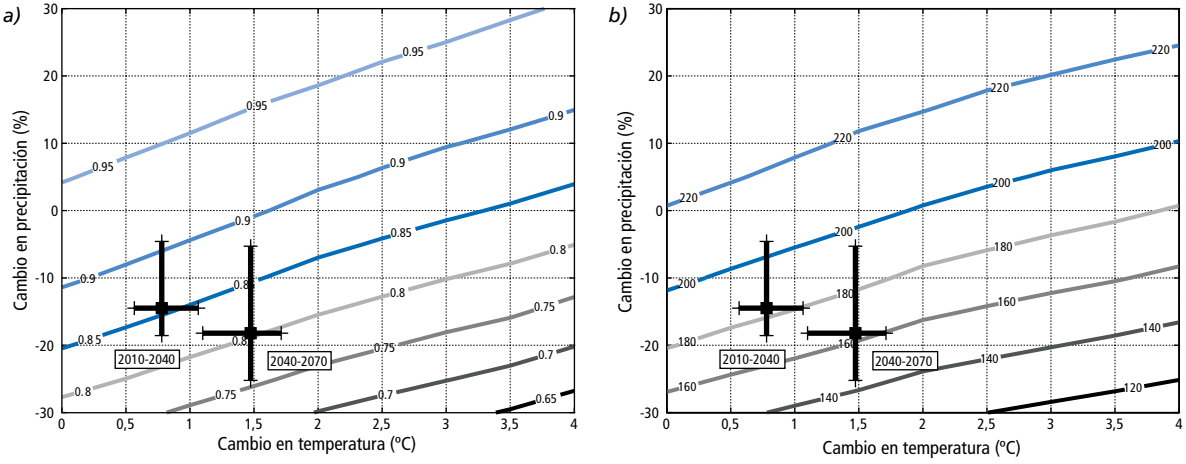
La información de las rentabilidades por año y escenario se sintetiza de manera similar a los casos de cambios hidrológicos y cobertura de demanda para poder obtener el rango esperado de rentabilidades en relación a los escenarios de cambio climático. Los resultados específicos obtenidos en la aplicación del caso de Valle Hermoso se presentan en la siguiente sección.

Resultados

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos a través de la metodología propuesta para dos situaciones: el escenario actual sin embalse y el escenario futuro con embalse y con la superficie de riego aumentada de acuerdo a lo propuesto por el estudio de la DOH. En ambos casos se muestran dos resultados: el promedio de la cobertura anual de riego (entrega de agua/demanda de agua) y la rentabilidad anual promedio (ver Figuras 4B.12 y 4B.13). La ventaja de usar un análisis de sensibilidad es que los resultados se pueden analizar para distintos escenarios climáticos considerando tanto la situación actual (cero cambio en temperatura y precipitación) como la situación futura más probable, representada por las cruces introducidas con anterioridad (ver Figura 4B.8).

Figura 4B.12

Cambios en (a) cobertura promedio de demanda de riego y (b) rentabilidad promedio, asociados a análisis de sensibilidad climática de acuerdo a situación actual sin embalse

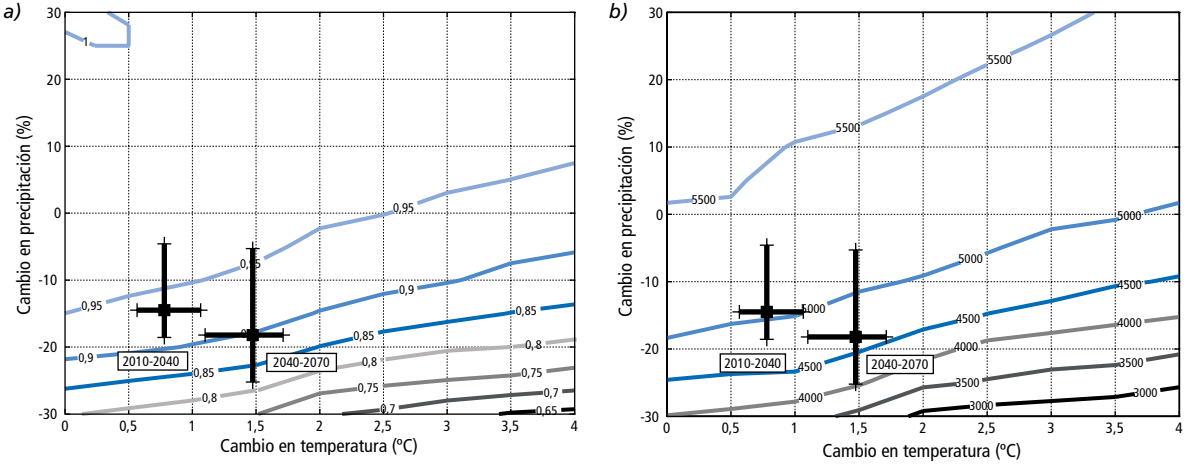


Fuente Elaboración propia.

Nota: Se incluye de manera adicional un intervalo de confianza del 50% con respecto a las proyecciones de precipitación y temperatura para los períodos 2010-2040 y 2040-2070.

Figura 4B.13

Cambios en (a) cobertura promedio de demanda de riego y (b) rentabilidad promedio, asociados a análisis de sensibilidad climática para la situación futura con embalse Valle Hermoso y con aumento en la superficie de riego



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se incluye de manera adicional un intervalo de confianza del 50% con respecto a las proyecciones de precipitación y temperatura para los períodos 2010-2040 y 2040-2070.

Discusión de resultados y conclusiones

De los resultados presentados se desprende una serie de conclusiones. El primero y más claro es que el cambio climático tiene efectos evidentes en la disponibilidad de agua en esta región del país en particular. Este impacto en la disponibilidad de agua se refleja en el promedio anual de esta y también en los cambios en la temporalidad (Figura 4B.11). Este cambio hidrológico afectaría la posibilidad de desarrollo agrícola en la subcuenca del río Pama, reduciendo la cobertura anual promedio esperada de 94% a un rango entre 90 y 83% y, por ende, la rentabilidad anual esperada desde 220 hasta un rango entre 205 y 175 millones de pesos (reducción entre 7 y 20%) (Figura 4B.12). Esta reducción en rentabilidad se asocia en parte al cambio en caudal promedio,

pero también al cambio en temporalidad de los caudales que impide que existan recursos hídricos para el final de la temporada de riego en los meses de verano.

De acuerdo a lo presentado en la Figura 4B.13a, la construcción del embalse Valle Hermoso permitiría la expansión de la superficie regada, manteniendo una cobertura promedio anual bajo condiciones climáticas históricas sobre el 95%. Esto implica un aumento significativo en la rentabilidad anual promedio esperada bajo este escenario climático en torno a 5.500 millones de pesos. Si se consideran los escenarios climáticos esperados para el período 2010-2040, la cobertura promedio anual de riego disminuye, pero sin llegar a estar bajo un umbral del 90% como era el caso en el escenario sin embalse. Por otra parte, la rentabilidad anual esperada bajo estos escenarios fluctúa entre 5.250 y 4.750 millones de pesos, lo que significa una reducción en torno a un 5 y 14% con respecto al escenario con clima histórico (Figura 4B.13b). En este caso se puede apreciar que el impacto del cambio climático es menor en términos relativos que en el caso sin embalse. Esto evidencia el rol que cumpliría un embalse en esta subcuenca, al disminuir el impacto asociado a los cambios en temporalidad de los caudales.

Queda de manifiesto que la no consideración de estos escenarios climáticos podría significar una sobreestimación de los beneficios de este embalse, en particular en torno a un 5 y un 15%, cifras significativas en un contexto de análisis de costo/beneficio.

Para concluir, es importante tener en cuenta que esta propuesta metodológica requiere de herramientas básicas de análisis que, pese a no ser materia de este informe en particular, es importante tomar en consideración al momento de hacer efectiva su implementación. El ejemplo más claro de esto es que, para la correcta implementación de análisis de incertidumbre, es necesario que exista un previo desarrollo de modelos de recursos hídricos a nivel de subcuencas. Por medio de estos modelos se podrán establecer relaciones más claras entre clima y disponibilidad de agua existente, para ser usada en riego y otros usos. Dada la existencia de herramientas básicas para establecer esta relación, se cuenta con diversas maneras para lograr la inclusión del análisis de incertidumbre en la orientación de políticas públicas para riego.

Para este informe sobre la subcuenca del río Pama, ubicado en la cuenca del río Limarí en la Región de Coquimbo, se realizó el análisis de sensibilidad de cada propuesta, utilizando el modelo hidrológico desarrollado en Vicuña et al. (2011). Este modelo, específico para el sector investigado, utiliza datos de las estaciones meteorológicas de la región, que se caracteriza por ser uno de los sectores con mejor cobertura de estaciones de monitoreo dentro del país. No obstante, hacer réplicas de este ejercicio en otras cuencas requiere de otros modelos, además de demandar información hídrica y climática para su construcción, que actualmente puede no estar disponible para todas las cuencas.

4C

Aplicación a puertos

ÍÑIGO J. LOSADA RODRÍGUEZ
CRISTINA IZAGUIRRE LASA
BORJA GONZÁLEZ REGUERO
ANTONIO TOMÁS SAMPEDRO
FRANCISCO FERNÁNDEZ JAIME
JOSÉ BEYÁ
RODRIGO CIENFUEGOS

Introducción

El cambio climático y la variabilidad temporal a diferentes escalas de las acciones climáticas han sido contrastadas lo suficientemente también en las costas (por ejemplo, en el *AR4* del IPCC [Parry et al., 2007]), de manera que, es previsible, que en el futuro afecten cada vez más a los bienes e infraestructuras en ellas instalados.

Los puertos, como infraestructura costera singular, reúnen una serie de particularidades que los hacen especialmente relevantes:

- Su vida útil es larga, superando en muchas ocasiones los 50 años, siendo entonces particularmente sensibles frente a los cambios futuros del clima.
- Por su localización en las costas, ríos o lagos, están expuestos a una gran variedad de acciones, tales como el ascenso del nivel

del mar, las variaciones en marea meteorológica, tsunamis, oleaje y vientos extremos, inundaciones fluviales, embancamiento o socavación, o incluso levantamientos o hundimientos (subsidencias) de origen tectónico.

- Las operaciones portuarias pueden verse afectadas por las condiciones climáticas, produciendo retrasos en la actividad comercial del puerto.
- Los puertos son vulnerables a cambios económicos en el mercado global, derivados del cambio climático.
- Las mercancías y su demanda/oferta pueden ser sensibles a cambios en las condiciones climáticas (por ejemplo, combustible o productos de agricultura).
- El movimiento de mercancías hacia los centros de distribución en tierra depende de infraestructuras de transporte, generalmente gestionadas por entidades externas al puerto, y que, a su vez, pueden verse afectadas de diversas maneras por el cambio climático.
- Como otras instalaciones industriales, son vulnerables a afectaciones sobre servicios como el agua o la electricidad.

Existe una gran diversidad de puertos en cuanto a las funciones que proporcionan, tipo de cargas y alcance en el manejo de las mismas. Además, tanto las características físicas como su localización, las actividades y el grado de resiliencia climática del diseño definen la vulnerabilidad de cada puerto en particular. Es por ello que la evaluación de respuestas de adaptación, en términos de costos y beneficios, también es característica y dependiente de las condiciones locales.

Metodología propuesta

Modelo conceptual del puerto

Independientemente del tipo de puerto y sus actividades, se puede determinar un modelo conceptual de un puerto en función de las distintas operaciones que en él se desarrollen. En primer lugar, existen tres regiones bien diferenciadas en el funcionamiento de un puerto:

- *Sistema externo al puerto:* incluye condiciones de mercado, las características de la demanda y la oferta, el flujo de mercancías y su tipo, las condiciones del sistema portuario nacional en relación al puerto, etc.
- *Puerto:* incluye sus infraestructuras de protección, operaciones y transporte, así como las actividades desarrolladas en este.
- *Hinterland:* área de influencia del puerto que incluye tanto las condiciones de mercado que definen la demanda y oferta así como las infraestructuras para el transporte de las mercancías.

Con respecto al puerto, se identifican las siguientes zonas dentro del mismo (Figura 4C.1):

- Navegación exterior y zona de espera
- Infraestructuras de protección (por ejemplo, diques de abrigo)
- Atraque y navegación interior
- Zona de gestión de la carga (carga/descarga)
- Zona de manipulación de mercancías
- Movimiento de vehículos en el interior del puerto
- Zona de almacenamiento y/o procesado de mercancía
- Infraestructura auxiliar, edificios y equipos
- Accesos y redes de conexión con el *hinterland*

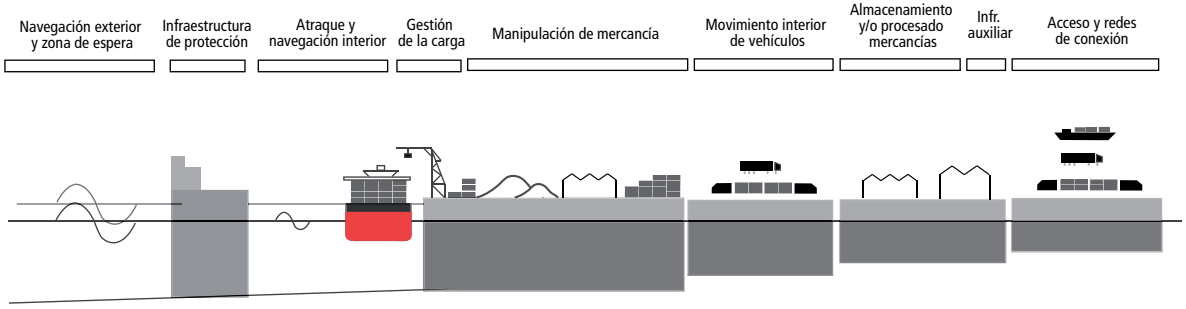
Algunos de los riesgos esperables en el sistema portuario están asociados a las fases de diseño y operaciones del puerto, especialmente aquellos inducidos por *drivers* climáticos (por ejemplo, ascenso del nivel del mar, niveles extremos u oleaje). Sin embargo, otros riesgos resultan más difíciles de analizar y establecer, debido a que son resultado de la interacción entre el clima y su variabilidad, y factores sociales y económicos (por ejemplo, impactos potenciales del cambio climático en la economía global y consecuencias para el comercio y los puertos).

Desarrollo conceptual

La función originaria de los puertos comerciales es la de actuar como intercambiadores entre los modos de transporte marítimo y terrestre. Sin embargo, como se ha visto en el apartado anterior, en la actualidad, además de cumplir esta función, los puertos se han

Figura 4C.1

Modelo conceptual y zonificación del sistema portuario



Fuente: Elaboración propia.

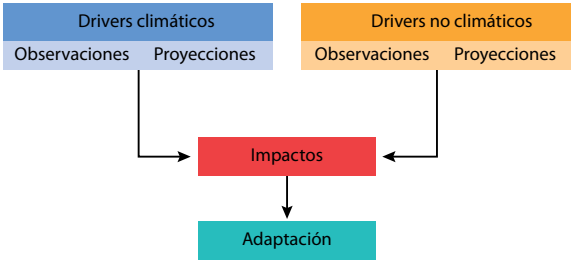
convertido en centros logísticos de transporte intermodal en los que se realizan muchas otras actividades de valor agregado. Su localización en la franja costera, sometidos a las dinámicas marinas naturales, los convierten en infraestructuras muy sensibles frente los efectos directos del cambio climático (subida del nivel del mar, cambios en el régimen de vientos, precipitaciones y oleaje, etc.). Pero además, su función intercambiadora y logística también se puede ver influenciada por efectos indirectos asociados al cambio climático y que tienen incidencia en el *hinterland*, como por ejemplo la demanda de mercancías, o cambios en las rutas marítimas originados de manera indirecta por el cambio climático.

En ambos casos, los efectos directos o indirectos del cambio climático pueden dar lugar a una serie de impactos sobre el puerto con diversas consecuencias económicas asociadas. Dado el papel estratégico que juegan los puertos como parte de un sistema de comercio global, resulta de gran relevancia el definir estrategias de adaptación a los impactos que el cambio climático puede generar.

En este apartado se propone una metodología integral para evaluar y cuantificar los impactos originados por el cambio climático sobre un puerto. Del mismo modo, se plantean medidas de adaptación frente a las nuevas condiciones climáticas que mitiguen las consecuencias económicas adversas y aumenten la resiliencia de los puertos. La metodología fue concebida sobre la base de cuatro conceptos interconectados entre sí que habrá que evaluar en cada puerto de interés (ver Figura 4C.2).

Figura 4C.2

Esquema conceptual de la metodología



Fuente: Elaboración propia.

La primera caja de *drivers* climáticos hace referencia a aquellos cambios en las dinámicas marinas y atmosféricas originados por el cambio climático que afectan directamente al puerto, tanto a nivel de infraestructuras como en sus operaciones. El *driver* climático más conocido y documentado es la subida del nivel del mar, pero también son importantes los cambios en el oleaje (alturas de ola, dirección y período), en la sobreelevación del nivel del mar debido a cambios en la trayectoria e intensidad de las borrascas, o cambios en la intensidad y dirección del viento. Asimismo, un aumento en la intensidad de las precipitaciones, un mayor caudal, un mayor transporte de sedimentos pueden influir en puertos fluviales o cercanos a ríos (mayor sedimentación en la dársena, por ejemplo). Estas variables representan procesos derivados del sistema climático y, como tales, llevan asociados una variabilidad natural en la

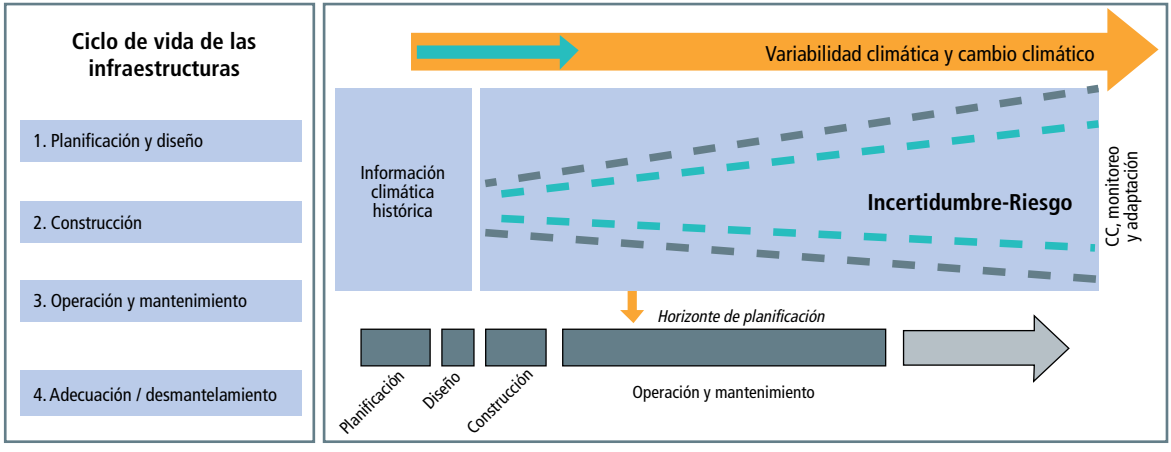
escala temporal y espacial. Es en este punto en el que hay que poner especial atención a la hora de caracterizar adecuadamente cada una de las dinámicas involucradas en las inmediaciones del puerto.

La vida de las infraestructuras portuarias tiene distintas fases y en cada una de ellas será necesario conocer las dinámicas a distintas escalas temporales. En la fase de diseño será necesaria la caracterización del clima marítimo de la zona en el largo plazo, en concreto, el clima marítimo extremal para su aplicación en cálculos de fiabilidad. Sin embargo, en la fase de construcción la información a corto y mediano plazo será clave para la organización de los planes de obra. Igualmente ocurre durante la fase de explotación, en la que el conocimiento de las dinámicas meteoceanográficas a corto y medio plazo será muy útil para gestionar y planificar las actividades comerciales del puerto. Además de las escalas de tiempo comentadas, se debe incorporar la variación de los agentes climáticos por efecto del cambio climático en lo que será la escala del muy largo plazo (ver Figura 4C.3).

La Figura 4C.3 muestra que el ciclo de vida de una infraestructura portuaria tiene un largo desarrollo temporal en el que se cubren diferentes fases. En todas ellas es necesario considerar la variabilidad climática en sus diferentes escalas. En general, la planificación del puerto, su Plan Maestro y el

Figura 4C.3

Ciclo de vida de las infraestructuras portuarias y escalas temporales de variabilidad



Fuente: Elaboración propia.

proyecto de ingeniería se suele hacer con base en información histórica, generalmente deficiente y con series temporales cortas. Aún así, el proyecto, la construcción y operación se planifican para toda la vida útil, extendiéndose varias décadas, sin considerar la variabilidad climática y el cambio climático. Esto genera grandes incertidumbres que generalmente se resuelven mediante la introducción de coeficientes de seguridad que originan aumentos de costos y que no limitan la incertidumbre ligada al riesgo residual. Para evitar este aspecto sería necesario, ya sea mediante proyecciones o monitorización, analizar la incidencia que la variabilidad climática tendrá sobre el puerto.

Desde el punto de vista de la variabilidad temporal, antes de obtener conclusiones de cambio en los últimos años o predecir futuras variaciones ligadas al cambio climático, hay que tener en cuenta que las variables climáticas sufren una serie de fluctuaciones naturales que deben ser caracterizadas adecuadamente. Dependiendo del forzamiento que induzca la fluctuación, el rango de escalas va desde el muy largo plazo (escala geológica), en el que se habla de cambios en miles de años, hasta la escala diurna, en la que se producen cambios climáticos de la noche al día. Entre estos dos extremos se puede hablar de cambios a escala estacional, interanual, decadal y de largo plazo, en los que estaría incluido el cambio climático. Son estas cuatro últimas escalas las que más interesan en la caracterización de las dinámicas que afectan a un puerto. Especial relevancia tiene la escala interanual en ciertas regiones del globo, donde las variaciones son inducidas por fenómenos combinados océano-atmósfera, como es el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), con manifestaciones cuasiestacionarias (por ejemplo, Tremberth y Caron, 2000).

Esta nueva aproximación rompe con la aproximación histórica seguida en el diseño, proyecto y explotación de puertos, que ha considerado siempre la estadística de las acciones climáticas como estacionarias. Este cambio de paradigma implica necesariamente la introducción de nuevas técnicas estadísticas que puedan considerar la variabilidad climática en las diferentes escalas temporales. Este cambio de enfoque es hoy posible gracias a que las series temporales de observaciones pueden ser complementadas con series temporales obtenidas a partir del reanálisis numérico, extendiendo así la información climática de las variables relevantes para el sistema portuario a más de tres décadas.

Desde el punto de vista de las escalas espaciales, hay que tener en cuenta que, según la situación del puerto, las dinámicas que le afecten pueden haberse generado a poca distancia o, por el contrario, proceder de una zona lejana del globo. Esto es especialmente relevante en el caso del oleaje. Por ejemplo, los puertos situados en las costas del Pacífico del Sur de América Latina recibirán durante todo el año oleajes del SO, generados en torno a los -60º de latitud, mientras que en verano se manifestarán los oleajes del NO con baja altura de ola y largo período (Molina et al., 2011; Acuña y Monárdez, 2007; Reguero et al., 2013). Sin embargo, puertos situados

en mares como el Mediterráneo están sometidos a condiciones de oleaje más locales. Además, a medida que el oleaje se acerca a la costa y la profundidad del fondo va disminuyendo, se produce una serie de procesos físicos que inciden en su altura, longitud y dirección, tales como la difracción, la refracción, el asomeramiento y la rotura: esta última es responsable de disipar la mayor parte de la energía del oleaje que alcanza la costa. Estas transformaciones hacen que el clima marítimo en profundidades reducidas cambie con respecto a profundidades indefinidas (Camus et al., 2013). Por esta razón es necesaria una regionalización de las dinámicas, de modo de transitar de un dominio espacial regional a un dominio de la escala local del puerto. Lo mismo ocurrirá con el resto de dinámicas, como el viento o el nivel del mar, respecto de las cuales será necesario conocer las condiciones locales en el área de interés. El análisis de impactos y riesgos en el sistema portuario solo puede realizarse con información de alta resolución espacial. Por tanto, la introducción de técnicas de *downscaling* (regionalización) dinámico o estadístico que permitan obtener los *drivers* climáticos que alimentan los modelos de impacto es absolutamente fundamental.

Una vez caracterizadas adecuadamente las dinámicas meteoceanográficas actuales en las inmediaciones del puerto, se abordará el estudio de los efectos del cambio climático mediante dos planteamientos: i) extrapolación de la tendencia de largo plazo obtenida a partir de observaciones y ii) proyecciones para distintos escenarios de cambio climático.

En el primer caso, el análisis se centra en obtener la tendencia de cambio del período de tiempo analizado y, asumiendo la inercia del sistema climático, extrapolar los valores de las dinámicas a partir de esta tendencia hacia el siglo XXI. Es importante destacar que esta técnica permite conseguir resultados fiables para períodos de tiempo que tengan la misma extensión que la de la base de datos empleada para obtener las tendencias. La aplicación de este enfoque requiere disponer de información a partir de observaciones o datos de reanálisis numérico. Por otro lado, si la extrapolación se hace teniendo en cuenta la variabilidad climática observada, se pueden emplear técnicas más sofisticadas con el objeto de obtener, además de los valores esperados para las variables climáticas, la incertidumbre asociada a su extrapolación. Es decir, es posible estimar la función de probabilidad extrapolada de la variable considerada, incluyendo su incertidumbre. Desde el punto de vista de la ingeniería, este enfoque posee ventajas interesantes, puesto que permite propagar las variables y sus incertidumbres en un enfoque de simulación continua y construir así funciones de distribución derivadas, como por ejemplo daño o costos asociados (CEPAL, 2011). Asimismo, recientemente se han introducido sistemas de obtención de tendencias que tienen en cuenta la distribución espacial de la variable considerada, lo que da aún una mayor fiabilidad a las extrapolaciones obtenidas.

Sin embargo, la mayor limitación del enfoque anterior reside en que la extrapolación está

condicionada por los datos históricos, la calidad, la longitud de los mismos y, sobre todo, por las condiciones climáticas que los han originado. Por tanto, si se producen cambios significativos en nuestro sistema climático, debido a nuevas políticas de mitigación, o la selección de la base de datos de partida no es la adecuada, se pueden producir desviaciones significativas. Es por este motivo que, para proyecciones a largo plazo, por sobre tres décadas, las técnicas más recomendables son las que se basan en el *downscaling* estadístico o dinámico según modelos climáticos globales, a partir de los cuales se han obtenido las condiciones climáticas proyectadas a futuro tomando diferentes escenarios socioeconómicos y concentraciones de gases de efecto invernadero (SRES para el *AR4* y RCP para el *AR5* del IPCC). Estas proyecciones pueden ser razonables para estimaciones de la variabilidad climática hacia finales del siglo XXI, pero poseen incertidumbres importantes cuando se trata de realizar estudios de impacto a la escala espacial requerida en los puertos.

No obstante lo anterior, es altamente recomendable hacer uso de ambas aproximaciones con el fin de tomar decisiones de la manera más informada posible.

En cuanto a los *drivers* no climáticos, la Figura 4C.2 hace referencia a los cambios producidos en el *hinterland* y en la zona propiamente portuaria, que se derivan de manera indirecta de los cambios en el clima y que están más asociados al sistema socioeconómico. Los puertos juegan un papel crucial en la economía global como centros neurálgicos de transporte para la mayoría de las mercancías transportadas alrededor del mundo. Además, son infraestructuras en valor que permiten el crecimiento y desarrollo de la economía: crean puestos de trabajo, generan riqueza, contribuyen a aumentar el producto interior bruto (PIB) del país y promueven la expansión de las industrias y ciudades adyacentes. Los cambios en la demanda de los servicios del puerto como resultado de los efectos del cambio climático en el comercio, en las decisiones de inversión, demografía, producción agrícola o pesquera, son algunos de los *drivers* no climáticos a tener en cuenta. Al igual que en el caso de los *drivers* climáticos, se pueden estimar valores futuros de las variables afectadas basados en la extrapolación de la tendencia de cambio de los últimos años o en proyecciones para distintos escenarios de cambio climático.

Ambos *drivers*, climáticos y no climáticos, darán lugar a una serie de impactos sobre los puertos. Los impactos directos generados por los *drivers* climáticos estarán más relacionados con las infraestructuras, servicios y operaciones del puerto, mientras que los impactos indirectos generados por los *drivers* no climáticos estarán más relacionados con los tráficos de mercancías, área del *hinterland* y el propio desarrollo futuro del puerto. En ambos casos es necesario evaluar y cuantificar económicamente los costos asociados a cada impacto.

La precisa definición de los *drivers* e impactos a través de la metodología descrita permite tener una base de conocimiento robusta y estructurada a partir de la cual plantear acciones efectivas de adaptación

a escala local. Los gestores involucrados en la planificación portuaria, su desarrollo y operaciones deberán considerar los efectos del cambio climático en sus políticas y estrategias y en la incorporación de medidas de adaptación con vistas a reducir los impactos y costos asociados con el cambio climático. Medidas como el aumento de la protección juegan un papel importante como parte de una estrategia de adaptación más amplia. Al mismo tiempo, una adaptación efectiva para los puertos a nivel global implicará un conjunto de intervenciones bien definidas para aumentar la resiliencia de estos y su *hinterland*, a través de cambios en el diseño y mantenimiento de las infraestructuras, operaciones, planificación y gestión.

Drivers climáticos

Los *drivers* climáticos corresponden a los cambios producidos en las variables meteoceanográficas como consecuencia directa del cambio climático. Estos *drivers* son los que darán lugar a impactos sobre las infraestructuras y operaciones del puerto (PIANC, 2010).

Durante los últimos años se han estudiado los cambios producidos en estas variables mediante observaciones, cuyo objetivo es poder predecir futuros valores para el siglo XXI. Para ello se utilizan dos vías de análisis: una de ellas basada en la extrapolación de las tendencias observadas y otra basada en proyecciones para distintos escenarios de cambio climático. A continuación se describen brevemente los principales *drivers*.

Nivel del mar

El nivel del mar es el resultado de la suma de varias componentes: nivel medio del mar, marea astronómica y marea meteorológica. Son principalmente el nivel medio del mar y la marea meteorológica las componentes que se ven afectadas por el cambio climático.

El ascenso del nivel del mar (Sea Level Rise, SLR) ha sido ampliamente estudiado en las últimas décadas y las conclusiones más relevantes han sido recogidas en el cuarto informe del IPCC, *AR4* (Parry et al., 2007). El registro de cambios pasados en el nivel del mar, a escala global, se ha realizado mediante datos de satélite (desde 1993) y reconstrucción de observaciones del nivel del mar (período 1880-2009). Bindoff et al. (2007) concluyen que la tasa de subida del nivel del mar global a lo largo del siglo XX está en torno a 1,7 ± 0,5 mm/año, siendo ligeramente superior en el período 1961-2003. Estudios más recientes como el de Church y White (2011) estiman que el ascenso medio global entre 1880 y 2009 ha sido aproximadamente de 210 mm. La estimación para la era satelital corresponde a una tasa de 3,2 ± 0,4 mm/año y de 2,8 ± 0,8 mm/año para el período precedente. Hay que tener en cuenta que existe una considerable variabilidad de la tasa de ascenso a lo largo del siglo XX. Desde el comienzo de las observaciones por satélite, la tasa de ascenso ha sido prácticamente la banda superior de las estimaciones de las proyecciones del *AR4*. Esto se debe a que, tal y como se señala en el *Informe de Síntesis del IPPC* (Pachauri y Reisinger, 2007),

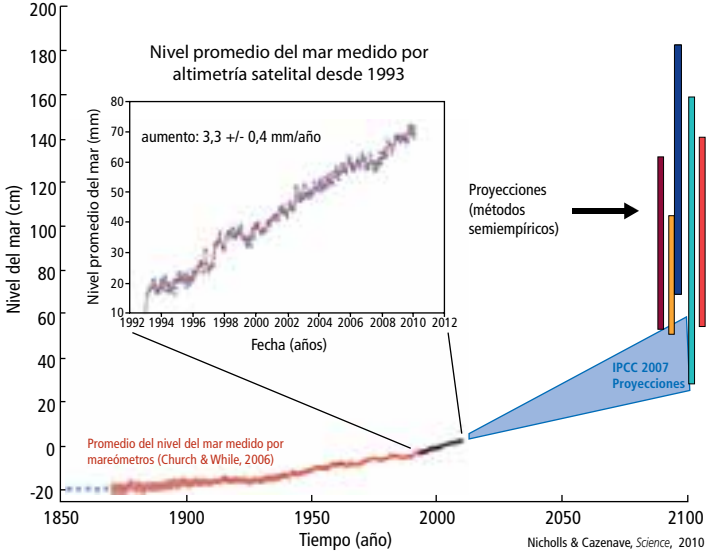
las proyecciones del *AR4* se basan principalmente en la expansión térmica de los océanos, dejando de lado los cambios producto del deshielo de las placas de la Antártida y Groenlandia. Por esta razón, las estimaciones del IPCC han sido ampliamente debatidas en la literatura desde 2007 y se han publicado numerosas estimaciones de una mayor subida del nivel del mar basadas en distintas aproximaciones (ver Nicholls et al., 2011).

Desde la aparición de modelos semiempíricos para la proyección del nivel medio del mar global, surgen como escenarios plausibles subidas de más de 1 m a finales del siglo XXI (Grinsted et al., 2009; Rahmstorf, 2007; Vermeer y Rahmstorf, 2009).

Es necesario destacar que para aplicaciones en la evaluación de impactos hay que tener en cuenta dos factores. En primer lugar, estos valores corresponden al valor del aumento del nivel medio del mar global. Por tanto, es necesario considerar los valores regionales y locales. Si se tiene acceso a medidas de mareógrafos locales, se puede hacer un análisis local de tendencias, tal y como se planteó anteriormente y, en una primera aproximación, realizar extrapolaciones a partir de las observaciones.

Figura 4C.4

Evolución global del nivel medio del mar durante el siglo XX y su proyección para el siglo XXI



Fuente: CSIRO http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/ocean-indicators/mean-sea-level/other-techniques.html

Nota: La curva roja se basa en medidas de mareógrafos (Church y White, 2006). La curva negra corresponde a observaciones de altimetría satelital (mostrada en un *zoom* para el período 1993-2009). El intervalo de proyecciones de ascenso para los escenarios SRES del IPCC-*AR4* se esquematiza en azul. Las barras verticales de colores representan rangos de variación de diversos modelos semiempíricos de respuesta del nivel del mar: rojo (Rahmstorf, 2007), azul oscuro (Vermeer y Rahmstorf, 2009); verde (Grinsted et al., 2009).

Sin embargo, si se desea trabajar con proyecciones se debe considerar que las anteriores deben ser regionalizadas. Lamentablemente, existe muy poca información sobre regionalización de proyecciones de aumento de nivel medio del mar. Como regla general, trabajos recientes han comprobado que en la mayor parte de las costas los valores regionales variarán entre un ± 20% del valor medio global, pero estos valores orientativos pueden cambiar considerablemente de una costa a otra. En el próximo AR5 aparecerán valores regionales de las proyecciones que pueden constituir una primera estimación útil.

El segundo aspecto importante es, de cara a la obtención de impactos, el referido al ascenso relativo del nivel del mar (RSLR, por su sigla en inglés), es decir, el que se registra después de considerar factores como la subsidencia y el ajuste por isostasia glacial. Esto hace que la necesidad de recabar información local sea aún mayor.

Otro elemento relevante a considerar en el nivel del mar es la marea meteorológica. Es decir, la sobreelevación del nivel del mar producida por el efecto del viento, la presión atmosférica y el oleaje en menor medida. Los efectos del cambio climático sobre la intensidad y trayectoria de las borrascas producirán cambios en la marea meteorológica, pero hay que tener en cuenta que la actividad tormentosa se caracteriza por una fuerte variabilidad interanual e interdecadal. Meehl et al. (2007) encontraron evidencias de un aumento de la actividad de los ciclones en el Atlántico Norte desde 1970, pero también incertidumbre sobre si este cambio representaba una tendencia de largo plazo o simplemente una variabilidad natural. Esta contribución, que puede estar asociada a borrascas, huracanes u otros, tiene un efecto significativo especialmente de cara a eventos extremos que pueden generar importantes impactos en el sistema portuario. Aunque existen incertidumbres sobre su posible evolución a futuro, se considera que un efecto significativo de la subida del nivel medio del mar es la reducción en los períodos de retorno de niveles extremos asociados a mareas meteorológicas (Menéndez y Woodworth, 2010).

La marea astronómica es también una componente fundamental en las variaciones del nivel del mar. Dependiendo del lugar del mundo, su rango y período serán distintos y su propagación afectará de una manera u otra al puerto de interés. El cambio en el nivel medio del mar puede tener incidencias en el comportamiento de las mareas astronómicas. Por lo tanto, el estudio local de esta variable es indispensable para conocer su afección sobre el puerto a la hora de determinar impactos.

Por último, hay que destacar también que aunque se emprendan medidas agresivas de mitigación y se estabilice el incremento de temperatura en 2ºC, la expansión térmica de los océanos continuará tiempo después de que se reduzcan las emisiones, por lo que la subida del nivel del mar continuará durante varios siglos (Meehl et al., 2012).

En la región de América Latina y El Caribe, Losada et al. (2013) determinan tendencias de largo plazo en las diversas componentes del nivel del mar, en

sus niveles extremos, además de la influencia que los patrones climáticos ejercen en las mismas, y el peso relativo de cada componente sobre el nivel del mar total. Para la costa de Chile, Losada et al. (2013) encuentran en las últimas décadas un ascenso del nivel del mar en torno a los 2 mm/año, lo que reporta una situación de ligera estacionalidad. Estos autores observan una gran dominancia de la marea astronómica sobre la meteorológica en el nivel del mar total y cambios ligeros en sus extremos, lo cual proporciona más importancia a los cambios de largo-plazo en el nivel medio (por ejemplo, ascenso). También es de destacar la gran influencia del ENOS, representada por el índice Niño3, sobre el nivel medio del mar para toda la costa del Pacífico de Latinoamérica. A partir del análisis de las series mareográficas medidas en los principales puertos de Chile entre 1944 y 2008, Contreras et al. (2012) concluyen que las tendencias observadas en el nivel medio del mar no son homogéneas a lo largo de la costa de Chile, abarcando tasas que varían entre +3,2mm/año y -1,4mm/año para el período de observación. Los autores advierten que los cambios en el nivel del terreno, producidos por los grandes sismos que afectaron a Chile en ese período, producen incertidumbre respecto de los valores medios observados por los mareógrafos.

Oleaje

El oleaje es la respuesta de la superficie del mar a la variación en las condiciones atmosféricas, por lo que los efectos del cambio climático se pueden ver sobre distintos parámetros o datos estadísticos: la distribución estacional de alturas de ola, períodos o direcciones, la frecuencia e intensidad de las mayores alturas de ola, etc.

Numerosos trabajos en los últimos años se han centrado en estudiar las tendencias de cambio del régimen medio y extremal de oleaje. Por ejemplo, Wang y Swail (2001) evaluaron las tendencias en la altura de ola del percentil 90 y 99% por estaciones, encontrando un aumento significativo en las últimas cuatro décadas en el Atlántico Norte en invierno. Gulev y Grigorieva (2004) hallaron tendencias positivas en la altura de ola significante (Hs) en el Pacífico Norte con un máximo de 8-10 cm/década en el noreste Pacífico utilizando datos visuales de barcos en ruta, mientras que en el Atlántico Norte los cambios significativos de aumento solo se observaron en los últimos 50 años y no durante todo el siglo. Por otro lado, los cambios de largo plazo del oleaje de viento están asociados a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) en el Atlántico y al fenómeno ENOS en el Pacífico. Trenberth y Jones (2007) concluyen que se presentan tendencias de aumento significativo en la altura de ola significante media anual y de invierno en latitudes medias del Atlántico y Pacífico Norte, Suroeste Atlántico, el Este ecuatorial del océano Índico y los mares de China. También encuentran decrementos estadísticamente significativos en la Hs para el Pacífico oeste tropical, mar de Tasmania y sur del océano Índico. Tendencias similares se identificaron en la altura de ola del percentil del 99%, con un incremento máximo de 0,4 m/década.

En la región de América Latina, Reguero et al. (2013) muestran patrones de cambios de largo plazo en las alturas de oleaje y la dirección dominante de la energía, así como en la influencia de diversos patrones climáticos de gran escala. Con respecto a las alturas extremas, Izaguirre et al. (2013) estudian la tendencia de los extremos de oleaje en Sudamérica por estaciones, detectando una tendencia positiva, presente en todas las estaciones, que alcanza a 6,5 cm/año en los últimos 30 años en Tierra del Fuego. En la cuenca atlántica se encuentra una tendencia negativa en el norte de Brasil de hasta -1,5 cm/año. Mediante la extrapolación de estas tendencias observadas se pueden obtener predicciones de oleaje para la primera parte del siglo XXI.

Por otro lado, también se han llevado a cabo estudios para proyectar el oleaje a los escenarios de cambio climático del IPCC mediante proyecciones dinámicas. Esta vía de análisis se está desarrollando en la actualidad, por lo que los estudios publicados al respecto son menos numerosos. Un ejemplo de estos es el trabajo de Hemer et al. (2013).

Viento

Las condiciones de viento pueden verse afectadas por la temperatura y otros efectos climáticos en distintos aspectos. La distribución estacional de la velocidad y dirección del viento, su frecuencia, duración de las tormentas o huracanes puede cambiar.

El cuarto informe del IPCC, *AR4* (Parry et al., 2007), recoge pocas conclusiones acerca de los cambios en las condiciones de viento. Los estudios previos de proyecciones de viento para distintos escenarios de cambio climático muestran pequeños cambios en las condiciones de viento con un alto grado de incertidumbre. En cualquier caso, es necesario destacar que tanto en términos de análisis de tendencias como de proyecciones, el análisis de impactos en puertos requiere el uso de resultados de muy alta resolución. Esta información es relevante tanto para forzar las simulaciones de generación de oleaje local así como para verificar el efecto del viento sobre barcos, operaciones de grúas, transporte en suspensión y contaminación asociada de graneles sólidos expuestos, o sus incidencias sobre el rebase de las infraestucturas.

Temperatura

La temperatura es la variable más directamente afectada por el cambio climático. El aumento de la concentración de gases de efecto invernadero hace que la radiación incidente del sol no se refleje adecuadamente y de esta manera aumenta la temperatura de la superficie terrestre. Desde que comenzaron a registrarse las temperaturas de la superficie terrestre en 1850, 11 de los 12 años más cálidos se han producido en los últimos 12 años (1995-2006). En los últimos 100 años (1906-2005), la temperatura mundial se ha incrementado en 0,74° C. En cuanto a los valores futuros, en las dos próximas décadas se espera que la temperatura media mundial aumente en cerca de 0,2°C por década, mientras que para finales del siglo XXI los cálculos más fiables prevén un aumento de la temperatura

mundial de entre 1,8 y 4°C. Evidentemente, para evaluar la incidencia de cambios en la temperatura sobre el sistema portuario, también es necesario contar con proyecciones de alta resolución, aunque las necesidades para este tipo de aplicación no son equivalentes a las de las variables anteriores. Como se verá más adelante, los cambios de temperatura ejercen también una incidencia importante sobre algunos elementos del sistema portuario.

Precipitación

El aumento de la temperatura superficial de la tierra implica una mayor evaporación y mayor cantidad de agua en la atmósfera. Los modelos de circulación general (MCG) proyectan un aumento de la precipitación en latitudes altas, aunque la magnitud de este incremento varía según el modelo, y una disminución de la precipitación en numerosas áreas subtropicales y de latitudes medias, en ambos hemisferios (Parry et al., 2007). Las proyecciones indican que durante los próximos decenios la precipitación tenderá a concentrarse en episodios más intensos, separados por períodos más prolongados de precipitación escasa. El uso de modelos regionales para analizar las proyecciones es esencial. Es necesario hacer constar que esta es una de las variables sobre la cual recae la mayor incertidumbre.

Niebla

La niebla es un fenómeno que consiste en una agregación de gotas de agua o cristales de hielo suspendidos en el aire sobre la superficie de la tierra, que producen la reducción de la visibilidad por debajo de los 1.000 m. La niebla se forma cuando el aire húmedo se enfría por debajo de su punto de condensación y el vapor de agua se convierte en gotas de agua condensadas. Algunos estudios, como el realizado por Boorman et al. (2010), muestran que, para un escenario de emisiones medias, para el año 2080 se producirá una disminución en los días de niebla para la mayoría de las zonas del Reino Unido y estaciones, con la excepción del sur de Inglaterra en invierno. Para los puertos, esta variable es importante, dado que incide de manera significativa sobre la navegación y las operaciones.

Drivers no climáticos

Los *drivers* no climáticos son aquellos cambios inducidos de manera indirecta por el cambio climático en ciertas variables que afectan la vida, operatividad, actividades y gestión del puerto, es decir, los cambios que afectan al *hinterland* y la zona portuaria. Estos cambios tienen su origen en los efectos directos del cambio climático sobre la temperatura, viento, oleaje o nivel del mar.

El aumento de la temperatura o la subida del nivel del mar producirán cambios en la distribución y concentración de la población y, presumiblemente, cambios en la demanda de bienes de consumo y, por lo tanto, alteraciones en el comercio y el transporte.

La subsidencia suele también citarse entre los *drivers* no climáticos. Esto se debe fundamentalmente a que, independientemente de la subsidencia

natural propia de algunas zonas de la costa, como los deltas, uno de los orígenes más importantes de la subsidencia responde a la explotación de recursos del subsuelo. Principalmente, la extracción de agua, para riego o consumo humano, es una de las mayores fuentes de subsidencia del terreno. En zonas como la costa chilena, las modificaciones del nivel del terreno pueden verse asimismo fuertemente modificadas por movimientos sísmicos y co-sísmicos o impactos de *tsunamis*. Por ejemplo, luego del terremoto del Maule, ocurrido el 27 de febrero de 2010, se registraron amplias variaciones en las costas afectadas, tanto por subsidencia como por solevantamiento (Vargas et al., 2011).

Otro *driver* no climático es el posible cambio en las principales rutas de navegación. El deshielo del casquete polar, debido al aumento de la temperatura, pondría en uso la ruta de navegación del mar del Norte durante más tiempo al año, estimándose que para el 2080 la temporada de deshielo que permite la navegación en la ruta del mar del Norte dure 80 días más al año (Pinnegar y Engelhard, 2008). Esto podría afectar la demanda de servicios portuarios y producir una mayor actividad económica y de transporte en la región del norte, dando lugar a inéditos negocios en puertos existentes, así como la emergencia de nuevos puertos. Este *driver* no climático podría tener entonces implicaciones en las decisiones de desarrollo e inversión en los puertos a nivel global. La apertura completa de líneas de navegación en el Ártico competiría con las rutas existentes, ofreciendo ahorro en términos de distancia, tiempo y costos. Aunque muy probablemente las rutas de comercio existentes continúen transportando el grueso del comercio mundial, aparecerán nuevas oportunidades de comercio mediante el desvío de mercancías por las nuevas rutas del norte. La ruta navegable por el noroeste (North West Passage) ofrecería una ruta entre Tokio y Nueva York 7.000 km más corta que a través del canal de Panamá, lo que permitiría el ahorro de tiempo, combustible y tasas de transporte. Teniendo en cuenta los costos de atravesar el canal, el combustible y otros factores relevantes a los costos de la mercancía transportada, las nuevas líneas de comercio podrían disminuir los costos de un solo viaje de un barco portacontenedores en más del 20%, aproximadamente de US$17,5M a US$14M. En el caso del transporte entre Europa y Asia, la ruta del mar del Norte totalmente operativa reduciría la distancia de navegación entre Rotterdam y Yokohama vía el canal de Suez en más del 40% (Borgerson, 2008).

Impactos

Sistema externo al puerto: condiciones de la demanda y el comercio

Los puertos participan como una unidad clave en el flujo de comercio en el mercado global y, por tanto, están sujetos a los ciclos de la economía y sus circunstancias, entre ellas la influencia que ejerce el cambio climático en las condiciones de mercado (Wright, 2007; USCCSP, 2008). Aunque también las

condiciones cambiantes del mercado pueden ofrecer oportunidades de negocio para algunos puertos. En este sentido, e

l comercio de un puerto puede verse afectado por su vulnerabilidad ante los eventos más extremos. Por ejemplo, se ha comprobado que tras los efectos del huracán Katrina en el golfo de México, muchas de las mercancías se desviaron a puertos alternativos (Grenzeback y Lukmann, 2007; Emigh, 2005).

Igualmente, los cambios en la localización de la población y de los núcleos de demanda, susceptibles de modificarse en el largo plazo, pueden alterar la demanda y las condiciones de competitividad actual de los puertos (USEPA, 2008).

Impactos en el puerto según zonas

1. Espera, navegación (interior y exterior) y atraque

El aumento relativo del nivel del mar implicará cambios en la profundidad de navegación, lo cual puede traer beneficios al reducir los dragados necesarios. Sin embargo, el francobordo de los muelles y atraques se verá reducido, por lo que podría ser necesario adaptar ciertas terminales. Igualmente, el paso bajo puentes y otras infraestructuras portuarias específicamente diseñadas para considerar las mareas existentes se podrán ver limitados en su operación (USCCSP, 2009).

Por otro lado, los cambios en la actividad de las tormentas (oleaje, viento y niveles extremos del mar) pueden ocasionar un gran impacto, especialmente en zonas en las que ya existe una alta congestión. Esto ya se ha comprobado, como por ejemplo en la experiencia de Australia, en donde se ha estimado que durante 2007 la industria del carbón perdió US$950M por problemas de congestión y retrasos relacionados con temporales (Port World, 2007). La evidencia sugiere que los cambios en los patrones de tormentas pueden aumentar su frecuencia y/o intensidad en diversas localizaciones, generando "cuellos de botella" y retrasos en puertos que ya estén experimentando problemas de capacidad (IFC, 2011). De ocurrir esto, podría suponer que los clientes eligieran otros puertos o zonas menos vulnerables a estos eventos.

En las zonas de atraque, los cambios en las condiciones de agitación interior, viento y corrientes, asociados a tormentas más intensas o/y frecuentes, claramente pueden alterar los regímenes actuales de atraque (por ejemplo, ROM 2.0, 2011).

Los cambios en la precipitación, escorrentía y patrones de sedimentación pueden variar las condiciones de navegación en canales fluviales y puertos fluviales o situados en lagos (IFC, 2011).

El aumento de las temperaturas puede extender el período actual de acceso a puertos que actualmente se ven restringidos por la presencia de hielo durante parte del año (USTRB, 2008; USEPA, 2008). Igualmente, la apertura de nuevas rutas, como la del Atlántico y el Pacífico (Wright, 2007), supondrá nuevas oportunidades, afectará el comercio global y podría generar grandes cambios en la actividad de los puertos intertropicales al crearse una vía alternativa al canal de Panamá (IFC, 2011).

Sin embargo, en las próximas décadas, producto del deshielo y la presencia de icebergs en las nuevas rutas, serán necesarios cascos más resistentes en los buques y otros servicios auxiliares (por ejemplo, servicios de rescate).

El aumento de las temperaturas también puede suponer una disminución de las profundidades en los puertos situados en lagos por un aumento de la evaporación (por ejemplo, Grandes Lagos, Canadá, Lemmen et al., 2008).

2. Infraestructuras de protección (por ejemplo, diques de abrigo)

A medida que el nivel del mar aumenta, los estándares de protección (por ejemplo, el grado de fiabilidad del diseño original) disminuirán si no se considera un plan de adaptación y rehabilitación.

La tipología de estructuras de protección, los modos de fallo y las acciones sobre ellas son muy diversos aunque, con generalidad, el aumento del nivel del mar y el potencial aumento de las condiciones de oleaje más extremas supondrá una disminución del nivel de seguridad para el cual fueron proyectadas. Igualmente, las condiciones de protección para las operaciones planificadas a su resguardo se verán modificadas de acuerdo con los cambios en las acciones originales de diseño. Potenciales cambios en la dirección del oleaje reinante también pueden ser perjudiciales en la operación del puerto, puesto que podrían generar condiciones de agitación en los sitios de abrigo no anticipadas en los estudios de proyecto.

Además, los cambios potenciales en la costa adyacente (playas y otras barreras naturales) pueden aumentar la exposición del puerto ante inundaciones y acciones más extremas.

3. Zona de gestión de la carga (carga/descarga)

Muchas operaciones portuarias y equipos presentan umbrales críticos de operación para altas velocidades de viento. Por ejemplo, las grúas no pueden operar con vientos por encima de una determinada velocidad, y para otros umbrales no son posibles las operaciones de atraque de buques (Gaythwaite, 2004; ROM 2.0, 2011).

Otros elementos meteorológicos, como rayos o lluvias intensas, pueden suponer peligros eléctricos para los equipos o dañar mercancía susceptible.

Las actividades de carga y descarga pueden verse impedidas por falta de condiciones de visibilidad a causa de nieblas o precipitación intensa. Igualmente, estas zonas podrían verse afectadas por inundaciones asociadas a niveles del mar más extremos o eventos hidrológicos más intensos en caso de puertos fluviales.

Sin embargo, para los puertos que actualmente sufren limitaciones en las operaciones por la presencia de hielo, se prevé que aumenten su régimen de operaciones a este respecto (IFC, 2011).

Los vientos asociados a temporales también pueden producir la rotura de amarras de los buques y provocar daños en los equipos de carga y descarga. En marzo de 2008, dos grúas fueron dañadas en el puerto de Felixstowe (Reino Unido) por este motivo.

Es probable que en diversas localidades aumenten la frecuencia y/o intensidad de los vientos más extremos.

4. Zona de almacenamiento y/o procesado y manipulación de mercancía

Las zonas de depósito y manejo podrían también verse afectadas por inundaciones en caso de situarse en zonas expuestas.

Un ambiente más cálido influenciará también en la necesidad de energía para refrigeración de mercancías y edificios (USCCSP, 2008).

La disponibilidad de agua para distintos servicios en el puerto verse comprometida por los cambios en el ciclo hidrológico.

5. Movimiento de vehículos en el interior del puerto

La inundación de las zonas más someras (generalmente los muelles son las zonas más elevadas, mientras que las zonas de almacenamiento y manipulación están más bajas, USCCSP, 2008), bien sea por aumento de los niveles extremos del mar o por fenómenos hidrológicos (cauces fluviales y pluviometría), puede suponer también una interrupción de las vías de comunicación en el interior del puerto entre zonas, aunque no fueran inundadas, contribuyendo, por tanto, a retrasos y detención de la actividad mercantil (IFC, 2011).

6. Infraestructura auxiliar, edificios y equipos

El principal impacto para la infraestructura auxiliar y las construcciones en la zona portuaria lo suponen inundaciones, independientemente de su origen (marina o fluvial). Su impacto en términos de daños estructurales (desplazamiento de contenedores y otras cargas, daño al pavimento, destrucción de edificaciones, etc.) estará principalmente condicionado por la velocidad de la corriente. Las inundaciones extremas debido a marea meteorológica pueden provocar daños significativos. El daño como resultado de pequeñas inundaciones y temporales será mínimo a no ser que estas ocurran de forma recurrente y afecten el régimen de operaciones o produzcan roturas y daños por desgaste. En función de la recurrencia de estos eventos, la corrosión puede ser un factor a considerar (IFC, 2011).

Las velocidades extremas de viento, especialmente ante tormentas tropicales, pueden dañar terminales no reforzadas adecuadamente, como equipos, almacenes e instalaciones de chapa metálica, ligeros y con grandes superficies. A este respecto, es ilustrativo el caso de los daños en el puerto de Nueva Orleans por el huracán Katrina, en su mayor parte no afectado por la inundación, pero sí por el viento. El puerto se abrió dos semanas después del huracán, pero su capacidad se mantuvo al 70% hasta seis meses después, debido al daño producido sobre las instalaciones de almacenaje (USCCSP, 2008).

7. Accesos y redes de conexión con el *hinterland*

La actividad de los puertos forma parte de la red de transporte general de mercancías y, por tanto, está interconectada fuertemente con las infraestructuras viales, ferrocarriles y la red de canales. Estos

sistemas de transporte se pueden ver afectados por la variabilidad del clima de diversas maneras, desde el aumento de las temperaturas, los cambios en los regímenes de precipitación hasta inundaciones de las redes (RSSB, 2003; USGCRP, 2009).

Es destacable mencionar el caso particular del canal de Panamá, que depende de lluvias regulares para su funcionamiento. En caso de modificación significativa de los regímenes de precipitación en la región, esto podría suponer efectos para el tráfico a través del canal (Wright, 2007).

Hinterland: *otros impactos sociales y medioambientales*

Algunas otras implicaciones de las variables cambiantes del clima son la relación de la actividad portuaria con las ciudades y el medio ambiente. A este respecto, problemas como el arrastre del viento de polvo o mercancías volátiles, efluentes de contaminantes a las aguas o incapacidad de los sistemas de drenajes de las plataformas, pueden surgir o aumentarse por cambios en las condiciones meteorológicas.

Igualmente, se debe tener muy presente la interrelación de las zonas portuarias con su entorno, en particular el sistema costero y los ecosistemas adyacentes. Estos son elementos especialmente vulnerables al cambio climático y pueden tener impactos indirectos para el puerto (USCCSP, 2009).

En cualquier caso, los planes de gestión medioambiental y las evaluaciones del impacto ambiental de los puertos que no consideren la variabilidad del clima en las distintas escalas pueden incurrir en una infraestimación de los riesgos ambientales potenciales o considerar erróneamente que los riesgos están bajo control (IFC, 2011).

Ejemplos ilustrativos de impactos

Como ejemplo de los impactos potenciales del cambio climático en el largo plazo y el aumento del riesgo asociado a los extremos, es ilustrativo el caso del huracán Katrina en Gulfport, el tercer puerto de contenedores en el golfo de México. Con una sobreelevación del nivel de 7 m, el huracán Katrina arrasó la infraestructura portuaria llevándose grúas y edificaciones, alcanzando cientos de metros hacia tierra y desperdigando contenedores a través de la zona urbana. El puerto perdió completamente los servicios de electricidad, agua y saneamiento. Las reparaciones ascienden a más de US$250M (USCCSP, 2008).

Asimismo, los riesgos de inundación por niveles extremos han motivado la construcción de una barrera en el puerto de Rotterdam (el más grande de Europa), que fue utilizada por primera vez en noviembre de 2007 y que produjo retrasos significativos (Reuters, 2007).

Aunque no está asociado con el cambio climático, el terremoto, *tsunami* y consecuente amenaza nuclear que afectó a Japón en marzo de 2011 y su efecto adverso en ciertos negocios, puertos y operaciones marítimas, ilustran la interdependencia entre la producción, el comercio y los sistemas de transporte en un mundo globalizado. La propagación de los efectos de esta catástrofe cruzó todo tipo de

fronteras, produciendo impactos en diferentes sectores de producción de Europa y Norteamérica.

Aunque en menor grado, el terremoto y *tsunami* ocurrido en febrero de 2010 en Chile también produjo impactos significativos en la infraestructura portuaria y costera de las regiones del Maule y el Bío-Bío. Muchas instalaciones portuarias resultaron con severos daños debido al terremoto, produciendo pérdidas directas e indirectas considerables para la región del Bío-Bío (Brunet et al., 2012). Del mismo modo, solevantamientos que en algunos casos superaron los 2 m en la bahía de Arauco, han producido problemas para la operación de caletas de pescadores (Jaramillo et al., 2012), mientras que una subsidencia estimada entre 0,5 m y 1,0 m en la playa de Duao (Vargas et al., 2011) ha generado erosión acelerada, haciendo retroceder la línea de costa en varias decenas de metros, poniendo en riesgo algunas casas e infraestructuras (Villagrán et al., 2013). Este último ejemplo ilustra de manera dramática el impacto que el aumento del nivel del mar (equivalente a la subsidencia en este caso) puede producir en un sistema costero.

Impactos de los drivers *climáticos*

Por último, puesto que los *drivers* climáticos son los que generan los impactos potenciales directamente relacionados con las infraestructuras, operaciones y mantenimiento del puerto, la Tabla 4C.1 resume una relación de los impactos generados por los *drivers* climáticos que afectan a las distintas componentes del puerto (PIANC, 2010; IFC, 2011).

En relación a la gestión de los riesgos, una de las opciones usualmente contemplada en diversos campos es la contratación de seguros. No obstante, conviene llamar la atención acerca de los términos de contratación podrían verse modificados en función de las condiciones cambiantes del clima, en especial para los eventos extremos (USEPA, 2008). La estrategia para la gestión de los riesgos de cada puerto puede influir para obtener mejoras competitivas en la contratación de seguros, así como en la concienciación de los clientes como zonas de menor riesgo ante posibles impactos.

En la Figura 4C.5 se muestra un ejemplo de diferentes opciones de adaptación para la sección de un dique en talud frente a la proyección de un aumento de nivel del mar y/o del oleaje. Las medidas propuestas pretenden reducir el rebase mediante un cambio en la pendiente del talud, un aumento de la cota de coronación del espaldón o la construcción de una berma. Cualquiera de estos cambios producirá también modificaciones en la estabilidad del espaldón, por lo que es necesario calcular tanto los nuevos caudales de rebase como la estabilidad del espaldón con la nueva configuración. Generalmente, el diseño de la modificación de secciones ya construidas no puede hacerse con formulaciones semiempíricas convencionales y requiere la utilización de modelado físico en escala reducida o modelado numérico de alta resolución, capaz de simular los procesos a escala de prototipo para las nuevas condiciones de nivel y oleaje. Los resultados para este análisis concreto mediante el modelo IH2-VOF (Lara et al., 2008; Losada

Tabla 4C.1

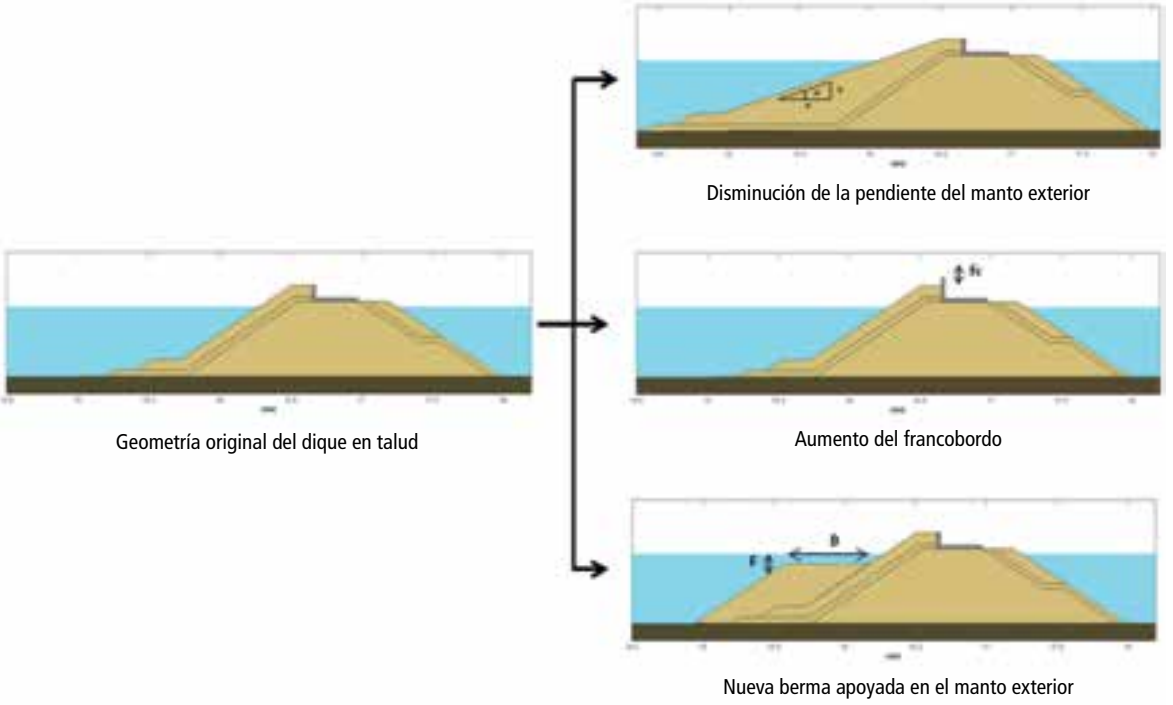
Impactos potenciales debido a *drivers* climáticos

		PUERTO			
Impacto potencial	***Drivers***	**Infraestructura**	**Operaciones**	**Navegación**	**Entorno**
Degradación, fallo y reparación de las estructuras (fiabilidad)	Aumento de los niveles medios y extremos (SS, SLR) Aumento de los extremos de oleaje	X	X		
Cambio en las necesidades de dragado	Aumento de los niveles Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje		X	X	
Inundación de áreas someras	Aumento de los niveles extremos Cambios en los extremos de oleaje	X	X		
Rebase sobre las estructuras	Aumento de los niveles extremos Cambio en los extremos de oleaje	X	X		
Pérdida/acreción de arena y sedimento (*offshore* y *onshore*)	Cambio en la frecuencia, duración e intensidad de los temporales Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje	X		X	X
Retranqueo de la línea de costa adyacente (afección a líneas de comunicación terrestre)	Niveles extremos de inundación Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje	X	X		X
Pérdida de terreno industrial	Niveles extremos de inundación Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje	X	X		
Reducción de la capacidad de recuperación natural del sistema costero adyacente	Niveles extremos de inundación Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje				X
Problemas añadidos a la navegación	Cambios en los extremos de oleaje Aumento del nivel del mar		X	X	
Mayor exposición de los muelles y embarcaderos	Aumento del nivel del mar Aumento de los niveles extremos	X	X		
Disminución de la operatividad del puerto y retrasos adicionales	Aumento de altura de ola Cambios en la velocidad y dirección del viento Cambio en la intensidad y/o frecuencia de los temporales Cambios en la frecuencia de nieblas		X	X	X
Pérdida en la capacidad de almacenamiento y procesamiento de mercancía	Ascenso del nivel del mar Aumento de niveles extremos Cambio en el régimen de precipitaciones Aumento de la temperatura	X	X		
Acceso a rutas polares	Aumento de la temperatura Derretimiento de los casquetes polares (Polo Norte especialmente).		X	X	X

Fuente: PIANC (2010), IFC (2011).

Figura 4C.5

Ejemplo de adaptación de la sección de un dique en talud mediante la variación de la sección para aumento de nivel del mar y del oleaje



Fuente: Elaboración propia.

et al., 2008; Guanche et al., 2009) muestran que las tres opciones son efectivas en términos de caudal de rebase. Sin embargo, desde el punto de vista de la estabilidad, solo la solución basada en cambiar la pendiente del talud garantiza los niveles de fiabilidad para los que fue diseñada la estructura inicial.

Caso puerto de Valparaíso

La bahía de Valparaíso está ubicada aproximadamente en las coordenadas 33°01'S y 71°36'O. Punta Ángeles protege a la bahía del oleaje reinante proveniente del SO, generando condiciones de abrigo portuario naturales en el sector sur de la bahía donde se ubica el puerto de Valparaíso (ver Figura 4C.6 y Figura 4C.7). En el entorno del puerto se desarrolla la ciudad de Valparaíso. Su geografía de cerros y laderas confina el centro de la ciudad a un sector plano cercano al borde costero, al Sur de la bahía. En sus alrededores la ciudad escala sobre los cerros, dando lugar a una particular configuración

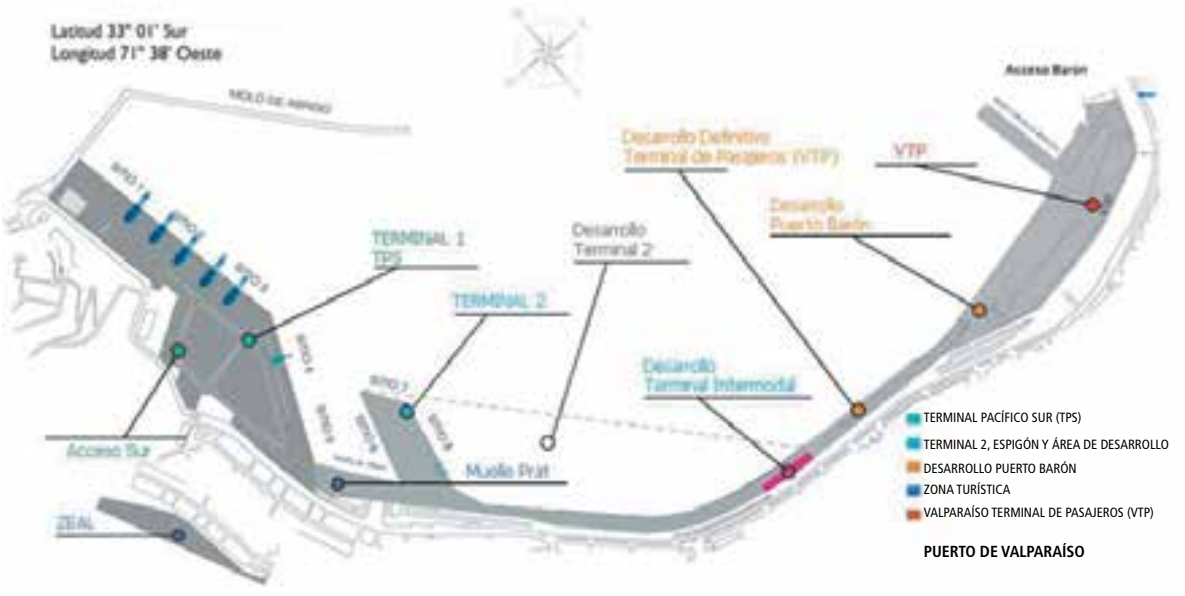
Figura 4C.6

Bahía de Valparaíso y ubicación de principales elementos

Fuente: Adaptada de Google Earth.

Figura 4C.7

Plano actual del puerto de Valparaíso.



Fuente: www.puertovalparaiso.cl.

que le ha otorgado el título de Patrimonio de la Humanidad UNESCO en el año 2003. Hacia el Norte del puerto, donde el oleaje en la costa es más intenso, se extiende el borde costero de Viña del Mar, que contiene numerosas playas, siendo las más extensas Las Salinas y Reñaca.

Actualmente, Valparaíso es el principal puerto de contenedores y pasajeros de Chile y uno con los de mayor actividad de Sudamérica en la costa del Pacífico. Anualmente transfiere más de 10 millones de toneladas de carga general y por sus terminales se atiende sobre el 30% de todo el comercio exterior del país. Asimismo, por temporada, recibe a cerca de 40 cruceros y 100 mil visitantes. Sus muelles pueden albergar naves de calados próximos a los 14 m.

En el futuro cercano se contempla la realización de una importante expansión del puerto, cuyos estudios básicos y diseño de ingeniería en estos momentos están en etapa de licitación. Esto es des-

tacable, considerando que la ultima modificación de infraestructura marítima ocurrió a comienzos del siglo pasado. Además, en la bahía de Valparaíso existe otro ambicioso proyecto de desarrollo de infraestructura costera conocido como Margamar, que busca convertir el estero Marga-Marga en navegable, junto con la construcción de una marina deportiva en su desembocadura. Estos proyectos, junto a otros de menor envergadura, permiten ilustrar el elevado nivel de presión antrópica y desarrollo al que está siendo sometido el borde costero de la bahía de Valparaíso en la actualidad. Las consideraciones relativas al cambio climático presentadas en este capítulo debieran ser incorporados en el análisis de estos desarrollos.

Drivers climáticos

Para definir adecuadamente los *drivers* climáticos que afectan al puerto de Valparaíso, es necesario caracterizar las dinámicas meteoceanográficas involucradas en las inmediaciones del puerto. Para ello habrá que tener en cuenta la variabilidad en las escalas espaciales y temporales de las dinámicas de interés, que en este caso serán el oleaje, el nivel del mar y el viento.

La costa de Valparaíso se encuentra expuesta a oleajes del suroeste (SO), generados en el entorno de los 60° de latitud Sur, en el océano Pacífico. Estos oleajes se propagan por el océano llegando a las costas de Chile como oleaje de fondo (*swell*). El *swell* del SO domina durante todo el año, mientras que el *swell* del NO se manifiesta en verano con baja altura de ola y largo período (Molina et al., 2011; Acuña y Monárdez, 2007). El oleaje en profundidades indefinidas proviene fundamentalmente del tercer cuadrante (oleajes del SO y OSO), con alturas de ola significante medias en torno a los 2 m. Hay una estacionalidad clara, con oleajes más severos durante el invierno (junio, Julio y agosto), con alturas de ola entre los 5 y 6 m.

En su viaje hasta la costa, el oleaje sufre una serie de procesos y modificaciones, como la refracción que se produce al disminuir la profundidad, o la difracción al enfrentar la Punta Ángeles. El deseo de estudiar adecuadamente la variabilidad temporal del oleaje requiere el uso de series largas en el tiempo, desgraciadamente poco disponibles con datos instrumentales. Por esta razón, el oleaje de la zona se ha estudiado a partir de datos de reanálisis transferidos al interior del puerto. El reanálisis empleado es el reanálisis global GOW (Reguero et al., 2012), obtenido mediante el modelo Wavewatch III (WWIII, Tolman et al., 2002) y forzado por campos de vientos 6-horarios del reanálisis climático NCEP-NCAR, con resolución espacial de 0,5° x 0,5° para la cuenca Pacífica de Latinoamérica (Reguero et al., 2013). Los datos constituyen series horarias de parámetros de oleaje (altura de ola, período y dirección) desde 1948 hasta 2008.

No obstante, el modelo numérico utilizado para el reanálisis tiene la limitación de no ser capaz de reproducir adecuadamente los procesos de propagación del oleaje en profundidades reducidas. Por

esta razón, es necesario recurrir al modelo SWAN (por ejemplo, Holthuijsen, 2007), alimentado por datos GOW, para resolver los procesos en aguas someras relacionados con la refracción, el asomeramiento y la disipación. Para ello, se han definido mallas numéricas de menos de 100 m de resolución.

Para poder resolver la agitación en el interior del puerto es necesario recurrir, a su vez, a otra familia de modelos que incorporen explícitamente los fenómenos de difracción y reflexión. En este caso, se ha utilizado un modelo que resuelve en elementos finitos la ecuación de la pendiente suave en su aproximación elíptica, MSP (Losada y Liu, 2000). El potencial que ofrece este modelo radica en la capacidad de analizar el efecto de la reflexión múltiple de un tren de olas en el interior del puerto, incluyendo todos los patrones de difracción producidos por los distintos muelles, espigones y diques.

En la Figura 4C.8 se representa el proceso de regionalización de los datos que ha sido necesario realizar, el que muestra las diferentes mallas y modelos utilizados para propagar el oleaje hasta el interior del puerto.

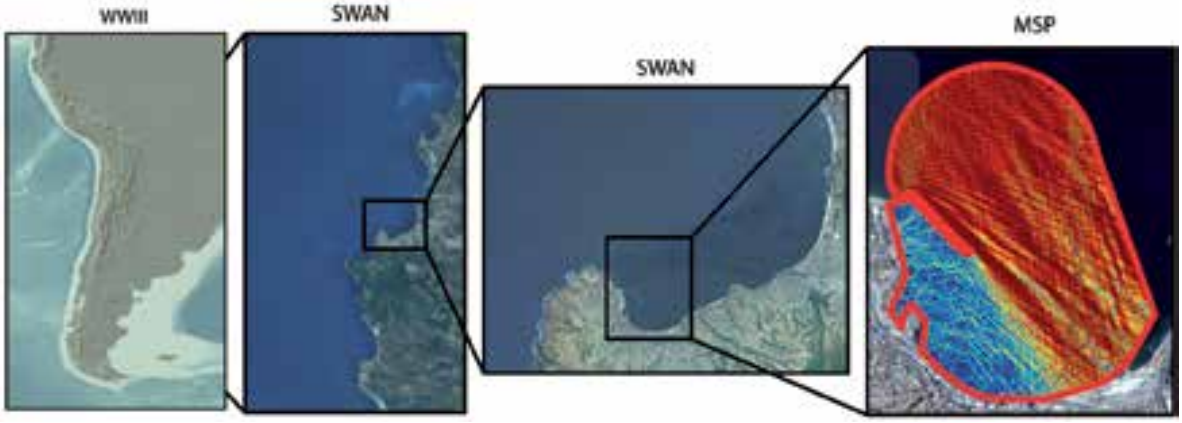
La tendencia de largo plazo en la altura de ola extremal en profundidades indefinidas puede extraerse del trabajo de Izaguirre et al., (2013), en el que también se refleja una marcada estacionalidad. En esta zona, los resultados muestran un incremento generalizado en todas las estaciones en el entorno de los 2 cm/año, siendo más acusado en otoño e invierno. Al propagar la serie de oleaje 60 años al interior del puerto de Valparaíso con el modelo MSP, la tendencia de largo plazo muestra un ligero aumento de la altura de ola media (0,17 cm/año). Sin embargo, para el diseño de obras marítimas, la altura de ola solo superada 12 horas al año resulta un parámetro más relevante al representar la cola alta de la distribución de alturas. Al interior de la bahía, este parámetro registra una leve disminución (-0,10 cm/año), y un aumento despreciable si se calcula al interior del puerto (0,046 cm/año). Es importante indicar que respecto a las condiciones medias en profundidades indefinidas, Reguero et al. (2013) detectan cambios significativos, así como una clara influencia de ciertos patrones climáticos como el ENOS.

Con respecto al nivel del mar, se han utilizado los datos procedentes del mareógrafo de Valparaíso del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). El mareógrafo está localizado en las inmediaciones del puerto y el registro de datos utilizado va desde 1944 hasta 2008, pero hay que tener en cuenta que en la década de 1970 existe una importante falta de datos. En este estudio se han utilizados los resultados del trabajo de Contreras et al. (2011), los que analizaron los datos de nivel del mar de este mareógrafo, entre otros. El análisis de la tendencia de largo plazo muestra un incremento de 0,1 mm/año que parece no ser significativa.

Sin embargo, fenómenos de menor escala como el ENOS reflejan una influencia notoria sobre el nivel del mar en toda la costa del Pacífico de Latinoamérica (Losada et al., 2013). En Valparaíso, el ENOS supone aumentos de hasta 30 cm en fenómenos

Figura 4C.8

Mallas de propagación del oleaje al interior del puerto



severos de El Niño, y disminuciones del mismo orden en fenómenos de La Niña.

En cuanto a las componentes principales del nivel del mar, la marea astronómica es la componente fundamental del nivel del mar, siendo la marea meteorológica prácticamente despreciable (Losada et al., 2013).

El régimen general de los vientos en la costa de Chile es regulado por dos tipos de circulación: la anticiclónica, originada por el margen oriental del anticiclón del Pacífico, y la ciclónica, que se deriva de las depresiones migratorias que chocan con el litoral central y sur. Su predominio varía con las estaciones. En Valparaíso tienen especial relevancia los vientos del tercer cuadrante que soplan durante las estaciones de primavera y verano. Los vientos del suroeste en la zona costera experimentan durante el día un notorio aumento de su intensidad, especialmente en la estación de verano, que va disminuyendo paulatinamente después de la puesta del sol, aunque en ocasiones se mantienen hasta altas horas de la noche, sobre todo después de altas temperaturas diurnas. Sus manifestaciones reciben el nombre de "surazos", y alcanzan ocasionalmente hasta 30 o 35 nudos y de manera excepcional hasta 40 nudos. Por sus condiciones naturales, la bahía de Valparaíso se encuentra en general protegida de estos vientos predominantes de dirección suroeste.

Drivers no climáticos

Un estudio de la Subsecretaría de Transportes (2012) proporciona estimaciones hasta el año 2020 de la evolución de la demanda-capacidad de carga para el sistema formado por los puertos de Valparaíso y San Antonio. Tal y como se observa en el citado estudio, un colapso del sistema portuario de la V Región podría repercutir sobre las exportaciones nacionales a causa del desvío del tráfico hacia puertos alternativos. Entre otra información, el trabajo contiene proyecciones de la demanda anual, un análisis de la estacionalidad de la misma, proyecciones de la capacidad atendida e indicadores de desempeño, como probabilidad de saturación, tiempo de espera, barcos en cola, etc.

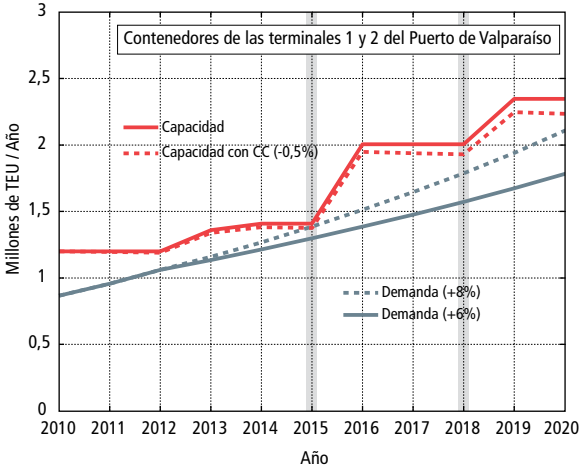
A partir de dicha información, la Figura 4C.9 muestra la comparación entre la demanda proyectada y la capacidad ofrecida, que se verá aumentada en dos años en concreto (por ejemplo, 2015 y 2018), gracias a las ampliaciones planificadas. Un momento de conflicto tendrá lugar en 2015, debido al aumento de la demanda y el comienzo de las obras para aumentar la capacidad. En este sentido, convendría determinar si las predicciones de las condiciones climáticas para ese año particular podrían contribuir a agravar la situación.

Desde el punto de vista de la variabilidad climática, resulta recomendable incorporar las diferentes dimensiones de la variación de la capacidad por actuaciones en el puerto (por ejemplo, nueva infraestructura), variación de la demanda (por ejemplo, proyecciones de aumento) y el posible factor debido al cambio climático. Con fines ilustrativos, se ha supuesto una disminución, debido al factor climático, de 0,5% de disminución lineal, a falta de un análisis económico detallado y específico.

Si bien la capacidad de atención portuaria muestra el total anual, la cantidad máxima posible de atender mensualmente no es homogénea y presenta un pico de demanda en marzo en torno al 23%, pero con un valor máximo observado del 39% (Subsecretaría de Transportes, 2012). No obstante, se prevé que tras las actuaciones proyectadas para el 2015, esta situación estacional se resuelva considerablemente.

Figura 4C.9

Evolución de la capacidad y demanda proyectada para el puerto de Valparaíso hasta el año 2020



Fuente: Elaborado a partir de los datos de Subsecretaría de Transportes (2012)..

La variación temporal de la demanda-capacidad y de las condiciones climáticas puede resultar conveniente de analizar y gestionar. Por ejemplo, si bien las estimaciones apuntan a una mayor probabilidad de saturación estacional, centrada en el mes de marzo, provocada por picos de demanda estacional, en el resto de los meses la probabilidad de saturación es más uniforme. Las mayores paradas (históricas) en función de las condiciones de oleaje ocurren especialmente en el período entre abril y septiembre. En este caso particular, el desfase temporal resulta beneficioso. Sin embargo, en el más largo plazo, se proyectan ligeros aumentos estacionales de la demanda en el futuro para los meses de mayor estrés climático, lo cual podría derivar en disminución de operaciones no estimadas a priori.

Impactos

De los posibles impactos de la variabilidad climática sobre las distintas regiones y operaciones de un puerto (ver Tabla 4C.1), en este caso práctico se discute en concreto dos impactos relevantes derivados de la acción del oleaje: (1) la fiabilidad de las estructuras de diseño y (2) el régimen de operaciones en las zonas de atraque interiores según la agitación, debido a onda corta (por ejemplo, oleaje).

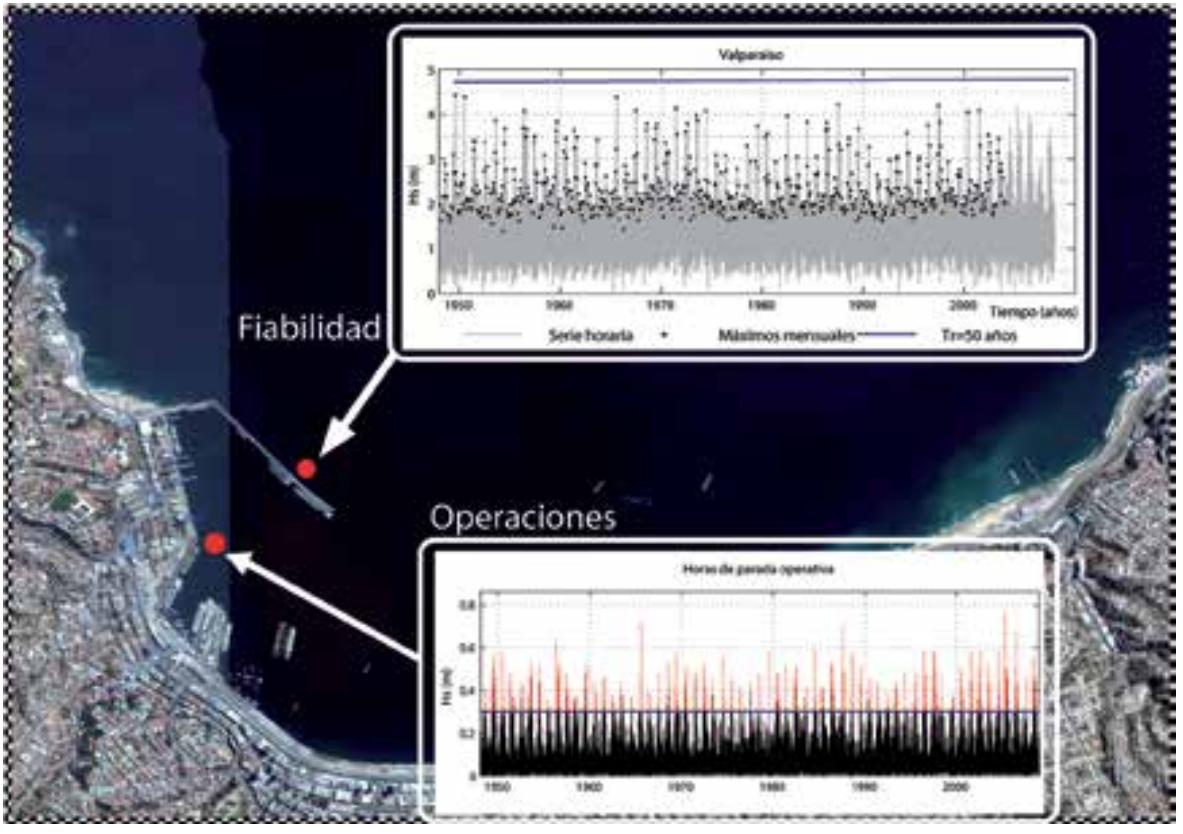
En primer lugar, a partir de datos de oleaje (registros de boyas, satélites y reanálisis numéricos) se pueden establecer series temporales históricas de las condiciones de oleaje, que convenientemente propagadas (véanse discusiones previas sobre escalas y modelos) desde aguas profundas hasta las inmediaciones del puerto definen las acciones del oleaje sobre las obras de protección del puerto de Valparaíso, tal y como se representa en la Figura 4C.10. El análisis de estas series temporales mediante modelos de extremos no estacionarios (por ejemplo, Menéndez et al., 2009) permiten determinar las acciones asociadas a ciertos períodos de retorno de diseño.

Para el caso particular de la altura de ola significante, en el panel superior de la Figura 4C.10 se muestra la serie temporal de alturas de ola para el período 1948-2008, destacándose los máximos mensuales y la evolución del valor asociado a un período de retorno de 50 años. El análisis de extremos realizado muestra que existe una tendencia estadística significativa en los extremos de altura de ola en Valparaíso, coherente con estudios previos para la región en aguas profundas .por ejemplo, Izaguirre et al., 2013). Si este cambio se mantuviera en las próximas décadas, implicaría que el período de retorno de 500 años se reduciría a 459, lo cual, adoptado este valor como el de diseño, supondría una disminución de un 8% en la seguridad sobre el diseño original. Es necesario advertir que los cambios de datos en las últimas tres décadas (por ejemplo. era satelital) reflejan tendencias más intensas, de hasta 3 cm/año (Izaguirre et al., 2013), lo cual implicaría un cambio en los períodos de retorno mucho más abruptos.

Por otro lado ha sido necesario realizar la propagación de las condiciones de oleaje al interior

Figura 4C.10

Representación de la planta del puerto de Valparaíso con la serie temporal de altura de ola significante en el exterior del puerto (panel superior) y la duración sobre el umbral límite recomendable para operaciones en los muelles de atraque según la ROM 2.0 (2011) (panel inferior)



Fuente : Elaboración propia basada en información de Google Earth.

del puerto. Para ello, y partiendo de la base de datos de oleaje exterior (GOW), se ha hecho un *downscaling* con las mallas que aparecen en la Figura 4C.8. La selección de casos de propagación se ha hecho siguiendo la técnica de Camus et al. (2011a, 2011b, 2013), paraela cual se incluyo una selección automática de 500 casos representativos de la serie temporal de 60 años de oleaje, utilizando la técnica Max-Diss (Camus et al., 2011a).

Esto, entre otras cosas, permite determinar el número de horas al año en que se exceden las condiciones de agitación interior recomendables para las operaciones en los muelles. En este caso, se ha tomado el umbral de 0,3 m, teniendo en cuenta la ROM 2.0 (2011). La serie temporal representada en el panel inferior de la Figura 4C.10 refleja la evolución de estas excedencias, observándose un gran rango de variación entre los distintos años. Durante el período 1948-2008, la duración de estas condiciones en el balance anual ha aumentado un 19,2%, y sería esperable que siguiera una evolución similar en las próximas décadas. No obstante, el rango de variación entre años es de hasta 215 h para el intervalo de confianza del 95% el 5% de las ocasiones la variación interanual es aún mayor). Esto es un reflejo de que la variabilidad interanual es muy significativa para el oleaje que afecta a la costa chilena, tal y como ha sido resaltado por trabajos previos CEPAL, 2011; Molina et al., 2011; Reguero et al., 2013), también en el puerto de Valparaíso.

De hecho, diversos estudios muestran la correlación entre el oleaje y el fenómeno ENOS en la región Reguero et al., 2013). Un análisis sencillo sobre estos datos muestra que también existe una ligera correlación lineal con el índice Niño3, explicando esta contribución aproximadamente un 10% de la señal.

Aunque los anteriores ejemplos exhiben dos casos muy concretos para el oleaje, tal y como expresa la relación de impactos de la Tabla 4C.1, en un análisis detallado es necesario establecer los efectos sobre otras actividades, como la navegación, y sobreootras acciones, como la del viento sobre las grúas y los equipos, o el régimen de inundaciones asociados a escenarios de aumentos del nivel del mar.

Discusión de resultados y conclusiones

Los cambios temporales de los forzamientos dinámicos a los que está expuesto un puerto pueden ser relevantes para distintas áreas y actividades del mismo. La consideración de la realidad no estacionaria de las acciones debe ser tenida en cuenta en el diseño y la gestión de los riesgos asociados a infraestructuras tan singulares por su importancia económica y largas vidas útiles como son los puertos.

En particular para el puerto de Valparaíso, las variaciones interanuales y de largo plazo del viento, niveles y oleaje deberían ser consideradas para la optimización de la actividad y para las estimaciones de capacidad y demanda futura, así como también en los planes de expansión de obras de

infraestructura, que se encuentran en proceso de diseño. Impactos en el *hinterland* deben ser también considerados en una visión más global de la economía local y del país.

Las proyecciones globales coinciden en que tanto las alturas de oleaje extremas como el nivel del mar estarían aumentando en el futuro. En el caso chileno, sin embargo, las tendencias respecto del nivel del mar no son concluyentes, debido a la fuerte actividad sismotectónica a la que está sometido el margen occidental del continente sudamericano, que redunda en frecuentes levantamientos o hundimientos del terreno. Por otro lado, los aspectos relacionados con la frecuencia de tormentas y marejadas son muy importantes de analizar, puesto que podrían tener consecuencias significativas en el funcionamiento de la infraestructura portuaria. Del mismo modo, el país requiere hacer esfuerzos adicionales para mejorar los sistemas de observación y medición de variables oceanográficas disponibles actualmente, con el objeto de aumentar la cobertura y resolución de esta información. De esta manera se estará en condiciones de cuantificar en forma más precisa las potenciales consecuencias del cambio climático en las costas de Chile y así anticipar medidas de adaptación adecuadas.

4D Aplicación a puentes

ELEONORA DEMARIA
JORGE GIRONÁS
SEBASTIÁN VICUÑA

Introducción

El Plan Director de Infraestructura 2010-2025 del Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2010) reconoce el importante rol que cumplen los proyectos de infraestructura de transporte en el logro de las metas de crecimiento y productividad del país, así como en la mejora del nivel de la calidad de vida de la población. Según el Plan, se espera invertir más de US$15 mil millones en proyectos relacionados con infraestructura vial (rutas, concesiones, mejoramientos y ampliaciones, *by-passes*, accesos portuarios). Es de destacar que el Plan identifica el cambio climático como un nuevo desafío a tener en cuenta en el continuo mejoramiento a futuro de la infraestructura del país.

La Dirección de Vialidad del MOP es el organismo central que dirige el desarrollo de infraestructura vial y puentes, desempeñando un rol fundamental

en todas las etapas del ciclo de vida de los correspondientes proyectos. En el caso particular de puentes, son el Departamento de Proyectos de Estructura y el Departamento de Puentes, ambos de esta Dirección, los que se ocupan de los puentes. El primero se encarga de los diseños y de los aspectos normativos, y el segundo de los aspectos de construcción y conservación. A la participación de la Dirección de Vialidad se agrega la labor de la Dirección de Planeamiento del MOP (DIRPLAN) y los gobiernos regionales en la etapa de planificación, así como el Ministerio de Desarrollo Social en las etapas de factibilidad y diseño, mediante la metodología de evaluación socioeconómica de los proyectos.

El Manual de Carreteras de la Dirección de Vialidad (MOP, 2012) es el documento central que regula el ciclo de vida de las obras de vialidad (desde la definición del perfil de estas hasta su operación y mantención). Este documento, de carácter normativo, guía las diferentes acciones de la Dirección, y entrega políticas, criterios, procedimientos y métodos asociados con proyectos viales que guardan relación con la planificación, el estudio, la evaluación, el diseño, la construcción, la seguridad, la conservación, la calidad y el impacto ambiental. El manual debe ser atendido por proyectistas, constructores y todos aquellos que desarrollen trabajos para la Dirección de Vialidad o sean supervisados por esta. Su relevancia radica en que uniformiza y sistematiza, dentro de lo posible, criterios y procedimientos.

De los distintos tópicos que abarca el Manual de Carreteras, dos son los más sobresalientes desde el punto de vista del cambio climático y su incorporación en el ciclo de vida de los proyectos: el capítulo 2, referente a procedimientos de estudios viales, y el capítulo 3, que contiene las instrucciones y los criterios de diseño. En estos capítulos se abordan los temas principales sobre la relación clima-agua-infraestructura vial. Por un lado, se presentan los estudios básicos de hidrología, hidráulica y transporte de sedimentos para estudios viales y, por el otro, se presentan los criterios de drenaje, saneamiento, mecánica e hidráulica fluvial, así como los riesgos y protección frente a avalanchas de nieve, y el diseño de puentes y estructuras afines.

En lo concerniente a los estudios básicos de hidrología, el diseño de infraestructura vial utiliza una serie de herramientas y metodologías basadas en el supuesto tradicional de estacionaridad hidroclimática. Estas incluyen principalmente: 1) el análisis de la frecuencia y el ajuste de distribuciones de probabilidad para la estimación de magnitudes y períodos de retorno, así como el riesgo adoptado en el diseño; 2) la construcción de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) para la definición de intensidades de precipitación para distintas duraciones y períodos de retorno; y 3) la definición de tormentas de diseño utilizadas en métodos lluvia-escorrentía para la estimación de caudales, velocidades y alturas de escurrimiento en cauces sin registros. Dado que la gran mayoría de estos métodos asume un período de retorno de la crecida igual al de la precipitación que la origina, los períodos de retorno del análisis probabilístico de las lluvias se

transfieren a los caudales estimados mediante un modelo lluvia-escorrentía. Por otra parte, si existen registros extensos de caudales en la zona de interés, el análisis de frecuencia muchas veces basta para calcular crecidas de diseño y sus correspondientes períodos de retorno.

La Tabla 4D.1 resume los períodos de retorno, vida útil y riesgos de falla correspondientes, identificados en el Manual de Carreteras (MOP, 2012) para el diseño y verificación de puentes en caminos y carreteras. Las inversiones y los tiempos de vida útil estipulados hacen de los puentes obras cuyo diseño debiese considerar el cambio climático según la metodología explicada anteriormente. El diseño y la verificación implican distintas condiciones de operación que el manual también define. Es interesante notar que, dada la extensa vida útil considerada, períodos de retornos importantes utilizados en el diseño no implican necesariamente condiciones mínimas de riesgo. Por ejemplo, existe un 40% de probabilidad de que un puente diseñado para la crecida de 100 años de período de retorno se vea enfrentado a un evento de igual o mayor magnitud durante un período de 50 años. Como se mencionó, los valores de las variables de diseño para estos períodos de retorno se obtienen a partir de un análisis de frecuencia y/o un ajuste de un modelo de distribución de probabilidad, eventualmente combinado con algún modelo hidrológico. Cualquiera sea el caso, se asume que los valores históricos conocidos son representativos del futuro. Junto con estas consideraciones, que apuntan al correcto funcionamiento de la infraestructura frente a eventos extremos de crecida, el manual también dispone de criterios de diseño que abordan la protección contra la socavación. Para este cálculo, se especifica considerar las crecidas de 5, 20, 50 y 100 años de período de retorno.

Tabla 4D.1

Períodos de retorno, vida útil y riesgo de falla para el diseño y verificación de puentes*

Obra	Tipo de ruta	Período de retorno T (años)		Vida útil supuesta (años)	Riesgo de falla (%)	
		Diseño	Verificación		Diseño	Verificación
Puentes	Carreteras	200	300	50	22	15
	Caminos	100	150	50	40	28

Fuente: MOP (2012).

* En el caso de los puentes, su altura no solo debe permitir el paso de la crecida de 100 o 200 años, sino que además se debe evaluar la socavación frente a distintas crecidas.

Estudios recientes han identificado significativas tendencias en variables hidrometeorológicas en la cuenca del río Mataquito (Falvey y Garreaud, 2009; Vicuña et al., 2013). En particular se ha detectado un posible aumento en la frecuencia de los eventos extremos de escorrentía, lo que ha significado que en las distintas estaciones fluviométricas de la cuenca aproximadamente 6 a 7 de las máximas 10 crecidas de los últimos 35 años ocurrieron después del año 2000. Estas crecidas estarían fuertemente vinculadas a eventos importantes de precipitaciones concurrentes con temperaturas elevadas (Vicuña et al., 2013). Esto se condice con proyecciones futuras en la zona central de Chile, donde se espera un aumento en la ocurrencia de inundaciones fluviales producto del alza en la línea de nieves. El carácter bastante prístino de esta cuenca permite concluir que los cambios observados se deberían fundamentalmente a las condiciones climáticas, por sobre otras modificaciones asociadas a cambios de uso de suelo o a la regulación artificial del agua. Por lo tanto, parece apropiado considerar esta zona para generar y evaluar una metodología que incorpore el cambio climático en el diseño hidrológico de un puente, ubicado en la parte baja de la cuenca, en este caso, cerca de la localidad de Licantén.

Este capítulo se estructura como sigue: la próxima sección presenta la metodología propuesta para incorporar el cambio climático en el diseño de puentes. Se discute la información requerida, los escenarios de cambio climático a adoptar, las distintas herramientas de modelación y su uso para la generación de información futura relevante en el diseño hidrológico. La sección siguiente discute en detalle la aplicación de esta metodología respecto del diseño de un puente sobre el río Mataquito, en la zona central de Chile, Región del Maule. Se presentan antecedentes generales, información sobre tendencias hidroclimáticas históricas, proyecciones futuras en las descargas generadas a través de la modelación, y estimaciones de crecidas y períodos de retornos relevantes para el diseño. Finalmente, la última sección se dedica a una discusión final y se presentan las principales conclusiones de este análisis.

Metodología propuesta

Modelación hidrológica

Una de las principales aplicaciones hidrológicas es la simulación y pronóstico de caudales máximos y de volumen de escurrimiento debido a eventos de precipitación intensos o a derretimiento de nieve. Para este fin, se usan modelos numéricos que simulan la respuesta de una cuenca a un evento meteorológico de delimitada magnitud y con determinadas características espacio-temporales. Estos modelos se denominan modelos de precipitación-escorrentía.

Los modelos de precipitación-escorrentía representan los procesos físicos en la cuenca involucrados en la generación de escurrimiento superficial a la salida de la cuenca. En estos modelos, las diferentes componentes del ciclo hidrológico:

evapotranspiración, infiltración, escurrimiento superficial, intercepción en la cobertura vegetal y contribución de agua subterránea, son representadas mediante ecuaciones empíricas o físicas, dependiendo del nivel de complejidad del modelo. Los modelos de precipitación-escorrentía más usados para el diseño de obras hidráulicas se basan en relaciones empíricas y/o conceptuales que aparentan dar resultados razonables. Este es el enfoque más frecuentemente empleado en métodos como el método racional, descrito en el tercer volumen del Manual de Carreteras (MOP, 2012).

El advenimiento de computadores más poderosos en las últimas décadas ha propiciado el desarrollo de modelos hidrológicos capaces de representar en gran nivel de detalle los procesos hidrológicos en una cuenca. El desarrollo de estos modelos ha sido también una consecuencia natural de: 1) un mayor entendimiento de los procesos hidrológicos a pequeña escala, 2) la disponibilidad de datos topográficos, climatológicos, de uso y tipo de suelo e hidrológicos, y 3) el desarrollo de algoritmos que permiten calibrar y validar los parámetros del modelo. Estos modelos se basan en ecuaciones físicas que representan numéricamente la respuesta de un evento de precipitación en grillas regularmente distribuidas en espacio y a escalas de tiempo horarias y diarias, por lo cual comúnmente se los denomina modelos distribuidos. Para cada grilla se obtiene la solución numérica de las ecuaciones de infiltración, evapotranspiración, y la generación de escurrimiento superficial y subterráneo.

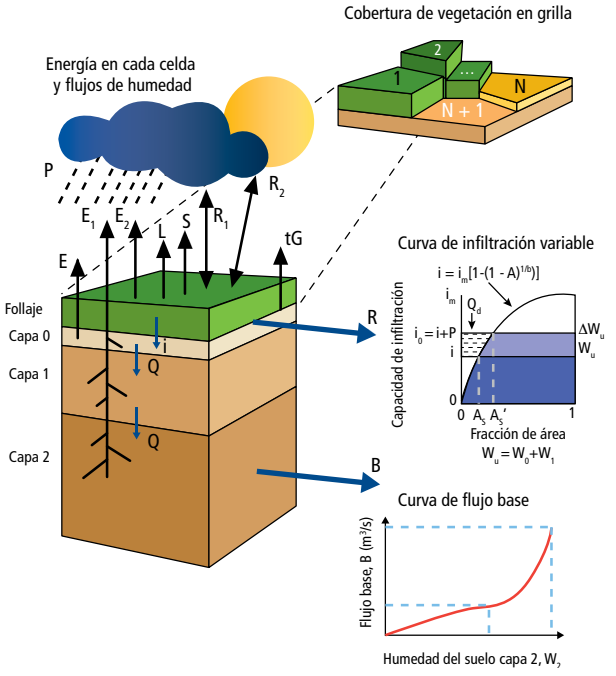
Uno de los modelos hidrológicos distribuidos más ampliamente implementados es el Variable Infiltration Capacity (VIC), desarrollado por la Universidad de Washington en Estados Unidos.* El modelo VIC es uno de gran escala, cuya particularidad es la de poder representar en escalas menores a la de la celda (o grilla) variaciones de vegetación, topografía, precipitación y almacenamiento de humedad del suelo (Liang et al., 1994; Liang et al., 1996). Una de las particularidades del modelo VIC es que puede ser corrido en modo de balance de masa o de energía, mediante lo cual se resuelven todos los flujos de energía con la atmósfera y puede ser acoplado con un modelo de circulación general de la atmósfera. VIC ha sido implementado en numerosas cuencas en diferentes ambientes hidroclimáticos (Demaria et al., 2013; Maurer et al., 2009; Nijssen et al., 2001b; Su et al., 2008).

El modelo VIC representa una cuenca con grillas o celdas a una escala espacial que varía desde 1,8° hasta 2° (12,5 km a 200 km, aproximadamente). Para cada celda, el subsuelo es representado con tres capas de distinto espesor y con diferentes propiedades de suelo (Figura 4D.1). Las variaciones de vegetación en cada celda del modelo son representadas por distintos tipos de cobertura vegetal, para los cuales se especifica el valor mensual de Índice de

* Visitar:
http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/

Figura 4D.1

Modelo hidrológico de gran escala



Fuente: Adaptada de Liang et al. (1994).

Área Foliar (LAI, por su sigla en inglés) y la proporción de raíces en cada capa de suelo. La tasa de evapotranspiración se calcula con la ecuación de Penman-Monteith, a la vez que el modelo también representa evaporación del suelo y de la cobertura vegetal. La evapotranspiración ocurre en las tres capas y es proporcional a la densidad de las raíces presentes en cada capa. Por lo tanto, los flujos de humedad del suelo entre capas, evapotranspiración y el escurrimiento varían dentro de cada celda dependiendo del tipo de vegetación. El drenaje vertical entre capas es por gravedad y sigue una relación entre el contenido de humedad del suelo y la conductividad hidráulica no saturada (Brooks y Corey, 1964). El agua infiltrada a las tres capas del modelo se transforma en flujo base (*base flow*) con una formulación lineal-nolineal que es función del contenido de humedad del suelo en la tercera capa del modelo. El escurrimiento superficial y base generado en cada celda es ruteado a través de una red de canales siguiendo la ecuación unidimensional de Saint Venant (Demaria et al., 2007; Lohmann et al., 1998; Nijssen et al., 1997; Nijssen et al., 2001a; Nijssen et al., 2001b; Nijssen et al., 2001c). El modelo calcula el equivalente de agua en nieve (Snow Water Equivalent o SWE, por su sigla en inglés) en cada celda del modelo, como una función de la temperatura

del aire respecto de la cual la precipitación cae como nieve. El modelo calcula sublimación y derretimiento de la capa de nieve.

El modelo VIC fue implementado en la cuenca del río Mataquito a una resolución espacial de 0,25° (25 km) y a escala diaria. La formulación del modelo para la cuenca usa tres capas de suelo de 0,1, 0,9 y 0,7 m de espesor de arriba hacia abajo y 10 tipos de vegetación. El balance de masa se calcula en cada celda y el escurrimiento superficial y base se transforma en escurrimiento mediante un hidrograma unitario. El hidrograma generado en cada celda es ruteado a la salida de la cuenca usando un método de ruteo en canales. El modelo fue calibrado con caudales observados mediante el método Multi-Objective Complex Evolution (MOCOM-UA).

Datos hidrometeorológicos usados en la implementación del modelo VIC

La implementación de un modelo distribuido de gran escala como el VIC requiere, como mínimo, valores diarios de precipitación y de temperatura mínima y máxima en cada celda. Esta información puede obtenerse de estaciones meteorológicas en la cuenca si los datos están disponibles a la resolución espacial y temporal requerida por el modelo. Para la realización del estudio en la zona central de Chile se utilizó una base de datos a escala global disponible a 0,25° de resolución espacial y a nivel diario, desarrollada por la Universidad de Princeton de Estados Unidos (Sheffield et al., 2006). Los datos meteorológicos se basan en el proyecto Reanálisis* y son generados por el National Center for Environmental-National Center for Atmospheric Research (NCEP-NCAR) para el período 1948-2008, de entre los cuales precipitación, temperatura máxima y mínima son obtenidos mediante una resolución espacial de dos grados. Los valores de temperaturas se basan en mediciones atmosféricas hechas con sondas meteorológicas, pero la precipitación es generada mediante un modelo atmosférico y por lo tanto exhibe sesgos significativos. Los valores de temperatura del Reánalisis son interpolados a una resolución espacial de 0,25° con un gradiente adiabático de temperatura de -6,5°C km-1, basado en la diferencia de elevación entre la escala del Reánalisis y la elevación en cada grilla de 0,25°. La precipitación es interpolada a una resolución de 0,25° usando un producto del satélite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM 3B42RT). Los totales mensuales se ajustaron con el fin de igualar la base de datos de la Climatic Research Unit (CRU) y del Global Precipitation Climatology Project, por lo tanto la secuencia diaria de días con lluvia y la probabilidad de transición de un día húmedo a un día seco no cambia. Las temperaturas máximas y mínimas son desagregadas para hacer coincidir la serie de tiempo de CRU usando los valores mensuales de CRU y el rango diario de temperatura.

* Reanálisis es un proyecto cuyo objetivo es representar el estado de la atmósfera utilizando observaciones y modelos de predicción del tiempo.

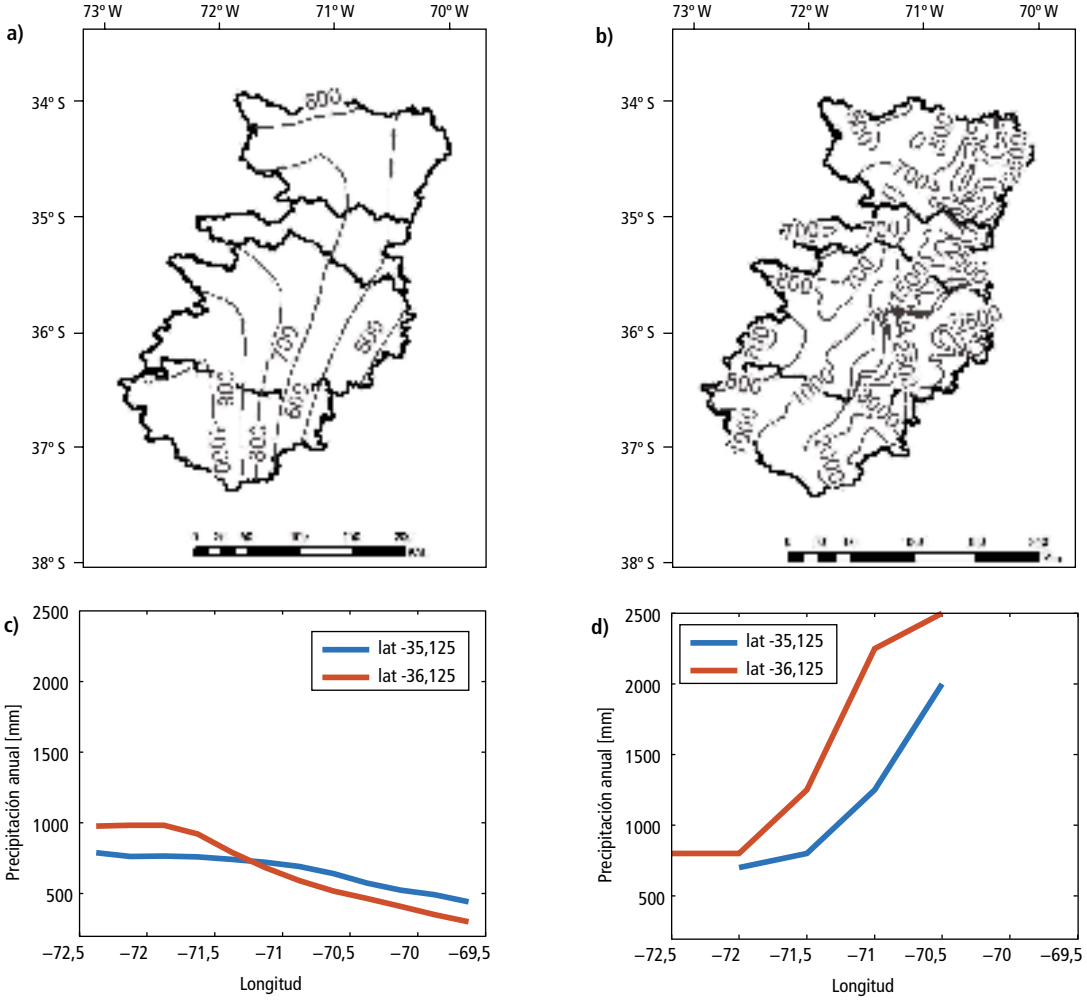
Mientras que la incorporación de múltiples fuentes de datos proporciona un producto invaluable para el análisis a nivel global y continental, en última instancia la caracterización de este tipo de producto a escala local puede ser rastreada mediante una red de observaciones de superficie que es altamente variable en densidad en diferentes regiones (Mitchell y Jones, 2005). En el caso de la región central de Chile (Figura 4D.2), un promedio de tres a cuatro pluviómetros son incluidos en la base de datos de CRU y ninguno en las inmediaciones de la cordillera los Andes. Esto da como resultado que haya unas pocas estaciones meteorológicas en Chile en la parte occidental de los Andes y que la próxima estación meteorológica se ubique al Este en la ladera seca de los Andes en Argentina. Por lo tanto, los campos de precipitación en grilla para esta región muestran un gradiente de precipitación opuesto al publicado por la Dirección General de Aguas. La Figura 4D.2a muestra la distribución espacial de los montos anuales de precipitación mediante la cual se pone en evidencia la disminución de lluvia con la elevación. Contrariamente, el mapa de precipitación de la DGA puede capturar la intensificación climatológica de la precipitación producto de la presencia de la cordillera de los Andes (Figura 4D.2b). Para las bandas latitudinales de 35,125° y 36,125° S, la precipitación muestra un gradiente negativo con elevación en la base de datos en grilla, mientras que los datos de la DGA exhiben un gradiente opuesto para el período 1951-1989 (Figuras 4D.2c y 4D.2d, respectivamente).

Cuando la base de datos de precipitación y temperatura descrita fue utilizada para simular el ciclo hidrológico de cuatro cuencas en la región, las deficiencias de los datos de precipitación se hicieron evidentes. En general, se puso en evidencia la pobre caracterización de la estacionalidad de los caudales bajos y que el pulso en primavera, debido al derretimiento de nieve, estaba ausente. La calibración del modelo no fue suficiente para recuperar los patrones observados de caudales, lo que indica que la distribución espacial de precipitación en la base de datos grillados cruda no era la más apropiada para simulaciones hidroclimáticas en esta región. La Figura 4D.3 muestra los resultados de la simulación para la cuenca del río Mataquito (una descripción detallada de la cuenca se encuentra en la sección "Cuenca del río Mataquito").

Para revertir el gradiente presente en los datos de precipitación grillados, un método simple fue implementado usando un grupo de estaciones pluviométricas proporcionadas por la DGA. La región donde la base de datos fue validada abarca las cuencas de los ríos Rapel, Mataquito, Maule e Itata. Para el período 1983-2007 (el período con la más completa cobertura), se seleccionaron estaciones pluviométricas que cumplieran dos criterios: 1) al menos 20 años de datos y 2) no más de 10% de datos faltantes. Como resultado, de un grupo de 70 estaciones disponibles solo 40 fueron seleccionadas. Excepto por la cuenca del río Itata, que cuenta con dos estaciones ubicadas a 1.200 y 2.400 m sobre el nivel del mar, la mayoría de los pluviómetros

Figura 4D.2

Mapas de precipitación anual para el período 1951-1980, cuenca del río Mataquito

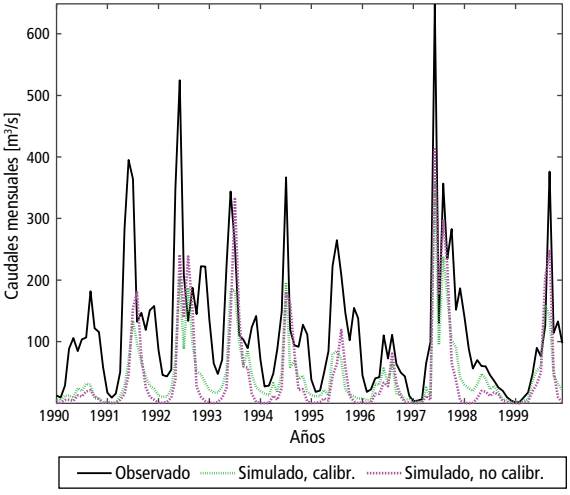


Fuente: Elaboración propia.

Nota: a) Observaciones globales en grilla, b) DGA. Gradiente de precipitación para bandas latitudinales -35.125° S y -36.125° S para c) precipitación en grilla y d) DGA.

Figura 4D.3

Caudales mensuales simulados para el río Mataquito en Licantén con precipitación grillada con y sin calibración del modelo hidrológico



Fuente: Elaboración propia.

seleccionados se encuentran en elevaciones menores a 500 m.

La precipitación media mensual fue calculada para cada mes del año, lo que dio por resultado 12 valores de precipitación para cada estación para el período climatológico. Estos valores mensuales fueron interpolados a una grilla de 0,25° usando *cokrigging* con elevación como variable dependiente. A su vez, este método generó 12 mapas de precipitación mensual para la región. Para el mismo período (1983-2007), los datos diarios fueron extraídos de la base de datos grillada. El cociente (12, uno para cada mes) entre la climatología observada y los datos en grilla se calculó para cada punto de grilla. Los valores mensuales en grilla fueron corregidos por este cociente para crear una nueva serie de datos diarios (P_{adj}) usando la siguiente ecuación:

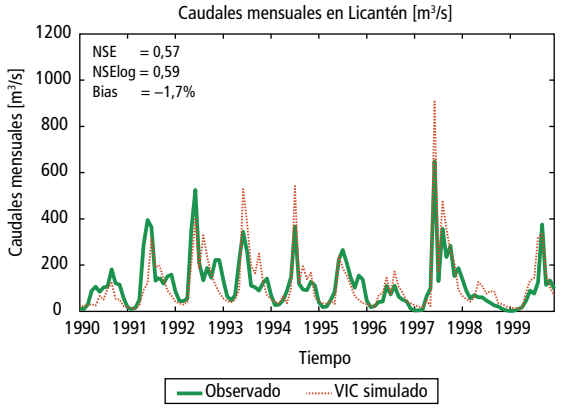
$$P_{adj}(i,j,t) = P_{grid}(i,j,t) \times \frac{\overline{P}_{obs,mon}(i,j)}{\overline{P}_{grid,mon}(i,j)} \quad (1)$$

donde P_{grid} es el dato de precipitación mensual en la grilla de 0,25° en el lugar (i,j), P_{obs} es el valor de precipitación observado climatológico interpolado, las barras indican la media 1983-2007, y el subíndice "mon" indica el mes de la climatología en el cual el día t se ubica.

Cuán efectivo es el ajuste aplicado a los datos de precipitación en grilla se pone en evidencia en la Figura 4D.4, en la que se muestran los caudales mensuales observados y simulados con los datos de precipitación ajustados para la estación Licantén. La figura muestra que el ajuste realizado ayuda a capturar importantes características hidrológicas en la cuenca, incluyendo los caudales bajos y los pulsos asociados al derretimiento de nieve. La presencia de picos simulados más grandes que los observados, sugiere que el proceso de escalamiento realizado ha generado valores de precipitación desproporcionados en parte de la cuenca; sin embargo, esto no es evidente en los caudales bajos. Los datos estadísticos calculados durante el período de calibración:

Figura 4D.4

Caudales mensuales observados y simulados usando datos de precipitación en grilla ajustados con ecuación 1 para el período 1990-1999



Fuente: Elaboración propia.

Nash-Sutcliffe (NSE) para caudales medios y el logaritmo de los caudales (NSElog) y el *Bias*, dan cuenta de que, si bien el ajuste no es perfecto, se puede considerar satisfactorio siguiendo criterios de calibración ampliamente establecidos. Una razonable representación de los picos, caudales bajos y un set de parámetros estadísticos satisfactorios durante la calibración indican que la meteorología que está forzando el ciclo hidrológico de la cuenca está bien representada. Estos resultados confirman que un método simple como el de *cokrigging* puede ampliamente mejorar la calidad de los datos globales en grilla disponibles para zonas montañosas, y de esta manera aumentar su utilidad para simular procesos hidrológicos en la zona central de Chile.

Modelos de circulación global: proyecciones climáticas para el siglo XXI

Los hidrólogos hacen uso de proyecciones climáticas generadas con Modelos de Circulación General (GCM, por su sigla en inglés) para simular los impactos de climas futuros en los recursos hídricos de una región. Estos modelos, que representan procesos físicos en la atmósfera, los océanos, la criósfera y la superficie terrestre, son las herramientas más avanzadas disponibles hoy en día para simular la respuesta del sistema climático global ante cambios en la concentración de gases de efecto invernadero. Los GCM pueden representar el clima con una grilla en tres dimensiones, generalmente con una resolución espacial de entre 250 y 600 km, 10 a 20 capas verticales en la atmósfera y en ocasiones hasta 30 capas en los océanos. Debido a su gruesa resolución, muchos procesos físicos, como los relacionados con nubes que ocurren a escalas menores a la de la grilla de los modelos, no pueden ser apropiadamente modelados. Por esta razón, diferentes modelos usan diferentes parametrizaciones para representar estos procesos. Esto genera una de las fuentes de incertidumbre en simulaciones de clima al usar GCM y es la razón por la cual distintos modelos dan diferentes proyecciones para una misma región y para el mismo forzante de dióxido de carbono. Otra fuente de incertidumbre proviene de una deficiente

representación de mecanismos de retroalimentación (*feedback*) relacionados al vapor de agua, nubes, hielo, albedo, circulación oceánica, entre otros.

El Proyecto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, por su sigla en inglés) es un esfuerzo internacional para modelar un nuevo set de experimentos climáticos usando GCM (Taylor et al., 2012). Estos experimentos proporcionan simulaciones del clima durante el siglo XX y proporcionarán proyecciones para el siglo XXI que constituirán la base del Fifth Assessment Report (AR5), documento que será publicado en septiembre de 2013. El CMIP5 promueve el uso de un grupo de simulaciones con GCM para poder evaluar cuán realísticos son estos modelos simulando el clima pasado (1950-2005), al tiempo que genera proyecciones de cambio climático futuro a corto plazo (hasta el año 2035) y a largo plazo (hasta el año 2100). Además, el CMIP5 usa escenarios, denominados Representative Concentration Pathways (RCP), que representan sendas de forzantes de radiación (cambio en el balance entre energía emitida y recibida como resultado de cambios en la composición de la atmósfera). Cada RCP representa un set de supuestos socioeconómicos, tecnológicos, uso del suelo y población que concurren para generar una determinada senda de forzantes de radiación. La Tabla 4D.2 brinda una descripción general de los RCP.

La Figura 4D.5 muestra proyecciones de cambios de temperatura media global para cuatro RCP para el período 1950-2300. Los cambios de temperatura expresados corresponden tanto al período 1980-1999 (eje y izquierdo) como al período preindustrial (eje y derecho). Las simulaciones con GCM indican que bajo el RCP 4.5 (con menor nivel de impacto) la temperatura media global a fines del siglo XXI será de aproximadamente 2,0°C más cálida que en el período 1980-1999, mientras que el cambio será de aproximadamente 4,0°C para el RCP 8.5. Cambios relativos al período preindustrial serán de 3,0 y 4,5°C para el RCP 4.5 y 8.5, respectivamente (Rogelj et al., 2012).

Tabla 4D.2

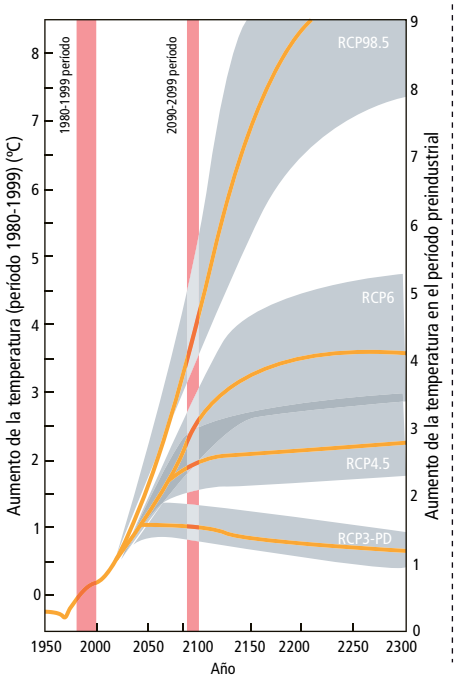
Descripción de los Representative Concentration Pathways (RCP) usados en el proyecto CMIP5

Nombre RCP	Descripción
RCP 4.5	Estabilización sin exceder 4.5 W/m^2 después del año 2100
RCP 6.0	Estabilización sin exceder 6.0 W/m^2 después del año 2100
RCP 8.5	Forzantes radiativas conduciendo a 8.5 W/m^2 en el año 2100

Fuente : Elaboración propia.

Figura 4D.5

Proyecciones de temperatura para cuatro RCP



Fuente: Adaptada de Rogelj et al. (2012).

Nota: La banda gris representa el rango con 66% de probabilidad de que la temperatura estimada por el GCM sea mayor que durante el período preindustrial.

De GCM a simulación de caudales en una cuenca: cómo obtener y procesar información climática

Las proyecciones climáticas coordinadas por el Proyecto CMIP5 han sido compiladas y están disponibles gratuitamente para aplicaciones científicas e ingenieriles. Sin embargo, para hacer uso de estos datos climáticos en simulaciones hidrológicas es necesario seguir una serie de pasos para adecuar la resolución espacial y temporal a las necesidades del modelo hidrológico. La Figura 4D.6 muestra esquemáticamente los pasos necesarios en el proceso:

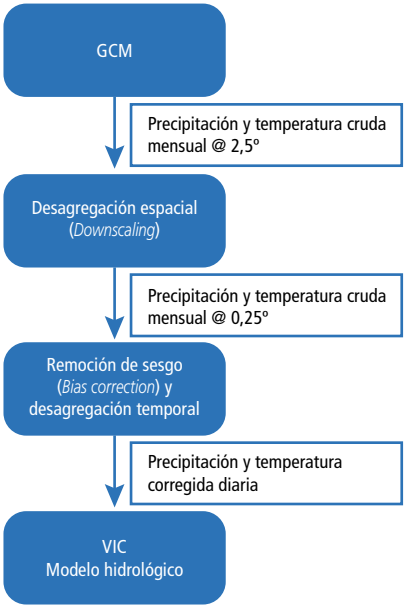
1. Las proyecciones climáticas de CMIP5 están archivadas en el sitio de internet http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/. Un total de 25 instituciones a nivel mundial han contribuido con simulaciones de GCM al proyecto mediante el aporte de algunos de sus centros de más de una versión del modelo GCM. La amplia gama de simulaciones disponibles plantea el interrogante de cuál GCM usar. Debido a la incertidumbre que las proyecciones climáticas ofrecen, el procedimiento preferido por la comunidad científica es el de seleccionar cuantos GCM estén disponibles y de esta manera poder caracterizar la incertidumbre de las proyecciones con un abanico (*ensemble*) de modelos. Las proyecciones mensuales de precipitación y temperatura máxima y mínima se obtienen a partir de los GCM seleccionados. Estas proyecciones tienen una resolución espacial promedio de

2,5°, dependiendo del modelo, y una resolución temporal mensual o en algunos casos diaria.

2. Los datos de precipitación y temperatura deben ser desagregados (proceso llamado *downscaling*) a una resolución espacial congruente con la del modelo hidrológico. Este proceso generalmente se realiza mediante dos métodos: con un método estadístico y con otro de modelos climáticos regionales. El primero es el más usado, debido a su simplicidad de implementación, que permite desagregar una variedad de GCM con diferentes escenarios. El segundo corresponde a un modelo climático con una resolución espacial más detallada que permite capturar procesos atmosféricos a una escala de aproximadamente 30 km. Sin embargo, el proceso es lento y costoso, y no ha demostrado mejoras significativas desde el punto de vista de la reducción de sesgos (Racherla et al., 2012).
3. Las proyecciones de GCM generalmente no concuerdan bien con datos observados, por lo que se hace necesario corregirlas para acercarlas a las observaciones. A pesar de ser la variable climática más importante desde el punto de vista de los recursos hídricos, precipitación es la variable más difícil de simular en un GCM, ya que depende de procesos de pequeña escala que no pueden ser bien representados por estos modelos. Este proceso se denomina "remoción del sesgo" (o *bias correction* en inglés) y se realiza con métodos estadísticos que igualan la distribución de probabilidad simulada mensual de precipitación y temperatura a la observada. Concurrentemente, los datos mensuales necesitan ser desagregados a una escala diaria para poder ser utilizados en el modelo hidrológico. Este proceso se realiza para cada grilla, por lo tanto es indispensable contar con datos observados de precipitación y temperatura espacialmente distribuidos en una grilla

Figura 4D.6

Representación esquemática de los pasos necesarios para utilizar proyecciones climáticas en simulaciones hidrológicas



Fuente: Elaboración propia.

regular (ver sección "Datos hidrometeorológicos usados en la implementación del modelo VIC").

4. Los datos de precipitación y temperatura desagregados espacial y temporalmente y corregidos (sin sesgo), se usan como variables de entrada para el modelo hidrológico.

Caso puente sobre el río Mataquito

Esta sección presenta un caso de simulación hidrológica usando 12 GCM para el estudio de la cuenca del río Mataquito, ubicada en la región central de Chile. Primeramente, se efectuó un análisis estadístico de tendencia en los caudales observados, seguido de una evaluación de los caudales para la segunda mitad del siglo XXI. Las simulaciones hidrológicas fueron realizadas con el modelo hidrológico distribuido VIC, el cual ha demostrado poder representar de manera realista la hidrología de la cuenca. Para evaluar el impacto del cambio climático en niveles de alerta y respecto de la vulnerabilidad de las obras hidráulicas en la región, se usaron los caudales máximos anuales simulados con dos escenarios climáticos, RCP 4.5 y RCP 8.5.

Cuenca del río Mataquito

La cuenca del río Mataquito tiene un área total de 6.200 km^2 y está ubicada en la VII Región del Maule, entre los 34,5° y 35,3° de latitud Sur. El río Mataquito se origina de la confluencia del río Teno, que drena la zona norte de la cuenca, y del río Lontué, que drena la porción sur. A partir de esta confluencia, localizada a 12 km al Oeste de Curicó, el Mataquito recorre cerca de 100 km por un valle ancho hacia el Oeste hasta desembocar en el océano Pacífico. El Mataquito recibe afluentes de escasa consideración, los que en su mayoría se originan en depresiones de la cordillera de la Costa (DGA, 2004). Las elevaciones máximas de la cuenca son del orden de los 4.000 m.

La cuenca del Mataquito se encuentra bajo la influencia de un clima mediterráneo, caracterizado por presentar al menos dos meses consecutivos de déficit hídrico durante el verano. Las variaciones pluviales, junto con las diferencias térmicas que ocurren en la cordillera andina, definen dos bioclimas en la cuenca del Mataquito (DGA, 2004): 1) un bioclima mediterráneo pluviestacional-oceánico, con influencia sobre los sectores costeros, la cordillera de la Costa, el Valle Central y elevaciones menores a los 2.000 m en la cordillera de los Andes, y 2) un bioclima mediterráneo pluviestacional-continental, con efectos por sobre los 2.000 m. La precipitación anual es de aproximadamente 740 mm anuales (DGA, 2001), concentrándose en los meses de otoño e invierno (época pluvial). Durante los meses de primavera y verano (época de deshielo), se registran las mayores temperaturas, así como los caudales máximos en las zonas altas de la cuenca producto del derretimiento de la nieve acumulada. Junto al río Mataquito, los principales cursos que componen la red hidrográfica

de la cuenca son los ríos Teno, Lontué, Colorado, Claro, Palos y el estero Upeo (Figura 4D.7).

El valle central alberga una importante zona agrícola que abarca aproximadamente el 12,7% del área total de la cuenca del río Mataquito (INE, 2007), la que comparte las demandas hídricas principalmente con la ciudad de Curicó, cuya población es de aproximadamente 140 mil habitantes (INE, 2012), y con otros usuarios de carácter industrial ubicados en distintos puntos de la cuenca. En general, esta cuenca es considerada una de las más prístinas de la zona centro-sur del país, ya que no existen grandes obras de almacenamiento de agua, y el proceso de acumulación y derretimiento nival es el que modula el régimen hídrico.

Para el ejemplo en desarrollo, se supondrá la ubicación del puente a la altura de la estación fluviométrica de Licantén, situada en las cercanías de la desembocadura del río en el océano Pacífico. Mayores detalles sobre la cuenca, su clima, relieve y geomorfología, se pueden encontrar en los estudios de la DGA (2001, 2004).

Análisis histórico de tendencias hidroclimáticas

El estudio reciente de Vicuña et al. (2013) analiza el comportamiento de las principales variables hidroclimáticas observadas desde 1976 hasta 2009 en distintas estaciones en la zona (Tabla 4D.3). Este análisis consideró información a nivel diario de temperatura *T*, precipitación *P* y caudales *Q*, y evaluó el comportamiento tanto de estas variables como de indicadores construidos a partir de estas (Zhang et

Figura 4D.7

Cuenca del río Mataquito, ubicación, principales afluentes y centros poblados

Fuente: Elaboración propia.

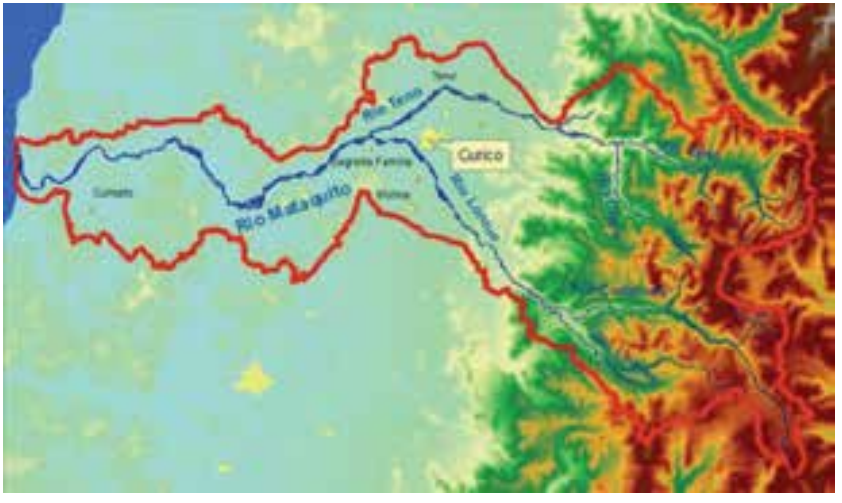


Tabla 4D.3

Estaciones y variables hidrometeorológicas utilizadas en el estudio de Vicuña et al. (2013)

Estación	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Elevación (m)	Años de registro	T_{media} (°C)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	P (mm)	Q (m^3s^{-1})
Curicó (CU)	-35	-71,25	195	1976-2010	✓	✓	✓	✓	-
Potrero Grande (PG)	-35,18	-71,1	445	1976-2009	✓	✓	✓	-	-
Potrero Grande (PG)	-35,18	-71,1	445	1978-2009	-	-	-	✓	-
Colorado (CO)	-35,63	-71,27	420	1981-2009	✓	✓	✓	-	-
Talca (TA)	-35,41	-71,63	110	1982-2009	✓	✓	✓	-	-
Río Teno (RT)	-35	-70,81	680	1976-2009	-	-	-	✓	-
El Manzano (EM)	-34,96	-70,92	574	1977-2009	-	-	-	✓	-
Lontué (LO)	-35,04	-71,29	195	1977-2010	-	-	-	✓	-
Santa Susana (SS)	-34,91	-71,04	410	1985-2009	-	-	-	✓	-
Estero Upeo en Upeo (UP)	-35,18	-71,1	450	1976-2009	-	-	-	-	✓
Río Colorado en junta con Palos (CP)	-35,28	-71	600	1976-2009	-	-	-	-	✓
Río Palos en junta con Colorado (PC)	-35,28	-71,02	600	1976-2009	-	-	-	-	✓
Río Teno después de junta con Claro (RTC)	-35	-70,82	647	1976-2009	-	-	-	-	✓
Río Mataquito en Licantén (LI)	-35	-70,81	20	1987-2009	-	-	-	-	✓

Fuente: Adaptada de Vicuña et al. (2013).

Nota: T_{media}, T_{min} y T_{max} hacen referencia a la temperatura media, mínima y máxima, respectivamente.

al., 2011). El análisis se hizo a escala 1) estacional (otoño, invierno, primavera y verano), 2) según la época pluvial (abril-septiembre) y de deshielo (octubre-marzo), y 3) a escala anual. Adicionalmente, se estudió en detalle el comportamiento de eventos extremos y, en particular, de las grandes crecidas, sus fechas de ocurrencia y las características climáticas asociadas.

Tendencias climáticas

El análisis de tendencias estadísticamente significativas de las temperaturas (Tabla 4D.4) muestra que tanto T_{media}, T_{min} y T_{max} en general presentan una tendencia al alza, particularmente durante los meses de primavera y verano. Esta situación no es del todo clara en otoño, ya que incluso se aprecian ciertas

tendencias a la baja en algunos registros de T_{min} y T_{max}. Los registros de la T_{media} diaria en las estaciones de CU y PG exhiben las más fuertes tendencias (0,6°C/dec en CU durante la primavera, y 0,5°C/dec en PG durante el verano), a la vez que T_{max} también experimenta un alza. En la estación CU esto ha ocurrido principalmente en primavera e invierno, mientras que se observa una tendencia negativa en otoño. Estas tendencias estacionales son de tal magnitud que a nivel anual se observa un alza de 1°C durante el período 1976-2009. Adicionalmente, T_{min} diaria en primavera y verano ha aumentado a una tasa de 0,5°C/dec en la estación CU, mientras que el promedio anual de T_{min} ha aumentado 1°C en el período.

Por otra parte, se constata que las precipitaciones han disminuido en general (Tabla 4D.4). Por ejemplo, a nivel anual, esta reducción ha sido del orden de 300 mm en la estación de CU, con 200 mm ocurriendo en invierno y 50 en primavera. Tendencias similares se observan en primavera en las estaciones de RT y EM (47,6 mm/dec y 31,4 mm/dec, respectivamente). La única tendencia positiva de precipitación invernal se observa en la estación SS.

Adicionalmente, los eventos extremos de temperatura son cada vez más extremos, particularmente en otoño e invierno. Por un lado, se detecta una tendencia positiva significativa en la máxima de las temperaturas máximas diarias y en el número de días con temperaturas máximas superiores a 25°C. Por otra parte, los días y las noches son cada vez más cálidos, y existe una tendencia significativa a la baja en la mínima de las temperaturas mínimas, y un alza importante en la cantidad de días con temperaturas mínimas inferiores a 0°C. Por consiguiente, el rango o diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima también ha aumentado significativamente.

Junto a lo anterior, se observa una tendencia a la baja tanto en la magnitud como en la frecuencia de las precipitaciones, principalmente durante la primavera. En particular, se advierte una reducción significativa en la magnitud de los eventos de precipitación de gran magnitud que ocurren en períodos de uno y cinco días, y un alza en la cantidad de días del año sin lluvia en muchas estaciones. Por otra parte, se detecta una disminución significativa en el número de días con precipitaciones significativas mayores a 10 y 20 mm.

Tendencias en los caudales

El análisis de tendencias en los caudales y otros indicadores representativos de la escorrentía muestra que en muchos casos hay tendencias estadísticamente no significativas, pero sí bastante consistentes para todas las estaciones. Los caudales medios decrecen significativamente solo en la estación Estero Upeo durante primavera y verano. En este mismo estero se detectó una baja significativa en el porcentaje del volumen anual escurrido en primavera (2,9%/dec) y verano (0,4%/dec), lo que implica que un 11% del flujo anual que ocurría en la época de deshielo, ahora ocurre en el otoño. En

Tabla 4D.4

Tendencias climáticas de precipitación y temperatura en la cuenca del río Mataquito

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

Fuente: Adaptada de Vicuña et al. (2013).

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

el caso de la estación Río Colorado en junta con Palos existen similares tendencias, pero de menor magnitud, de modo que no son significativas a nivel de estaciones del año, pero sí lo son al agregar los caudales en épocas pluviales y de deshielo. Estas tendencias ocurren a pesar de la diferencia en el régimen hidrológico correspondiente (régimen nival en la estación Río Colorado en junta con Palos vs. régimen pluvial en la estación Estero Upeo). Las mismas tendencias se observan en la estación Río Palos en junta con Colorado. Finalmente, el registro de caudales en la estación de Licantén también muestra una tendencia negativa en el porcentaje del volumen de escurrimiento que ocurre en primavera. En general, se encontró que los incrementos en caudales y volúmenes escurridos de la época pluvial ocurren en otoño.

Con respecto a los eventos extremos de escorrentía, en general se observan tendencias negativas en el caudal mínimo y en el caudal promedio de los siete días consecutivos más secos, tanto para los períodos pluvial, de deshielo y a nivel anual. Los mayores y menores caudales diarios máximos en las épocas pluviales y de deshielo, respectivamente, han originado un aumento significativo en la diferencia de los caudales máximos en cada una de estas dos estaciones. Por otra parte, solo en la estación Río Colorado en junta con Palos la tendencia en el aumento del caudal máximo instantáneo es significativa, aunque se observan más comúnmente valores mayores en años recientes en todas las estaciones fluviométricas. Finalmente, cabe mencionar que para todas las estaciones se observa un adelantamiento no significativo en el régimen hidrológico, llegándose a valores bastante altos, como por ejemplo de 15 días en 35 años en la estación Río Palos en junta con Colorado.

Eventos de crecidas extremas y su relación con las condiciones climáticas

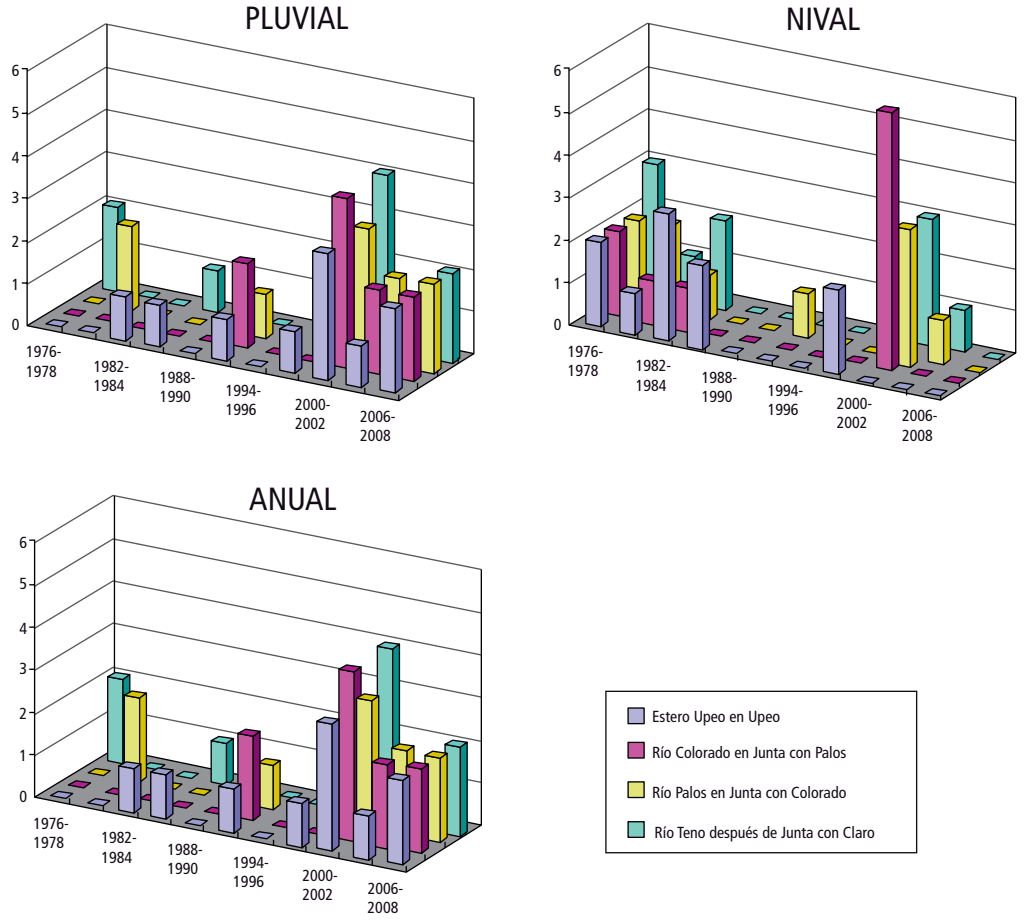
La identificación de la ocurrencia temporal de las 10 mayores crecidas del registro en todas las estaciones muestra que en general 6 a 7 de estas han ocurrido entre los años 2000 y 2009 (Figuras 4D.8 y 4D.9). Todas estas crecidas ocurren en la época pluvial. Por otra parte, pareciera haber un comportamiento distinto para las 10 máximas crecidas de la época de deshielo, las que ocurren mayoritariamente al inicio y al final del registro.

Un análisis detallado muestra que las variables climáticas más relevantes que explican estas crecidas corresponden a la temperatura mínima y a la precipitación. Vicuña et al. (2013) demuestran que, en promedio para todas las estaciones, solo 2 o 3 de las 33 máximas crecidas anuales no están relacionadas con eventos de precipitación significativos (mayores al percentil 90 para el mes en que ocurre) y/o elevadas temperaturas mínimas (por sobre el percentil 90 para el mes en cuestión). Además, en promedio, 8 de las 10 máximas crecidas están relacionadas con ambas condiciones ocurriendo simultáneamente.

Este análisis expone la relevancia de las denominadas tormentas cálidas, eventos de precipitación

Figura 4D.8

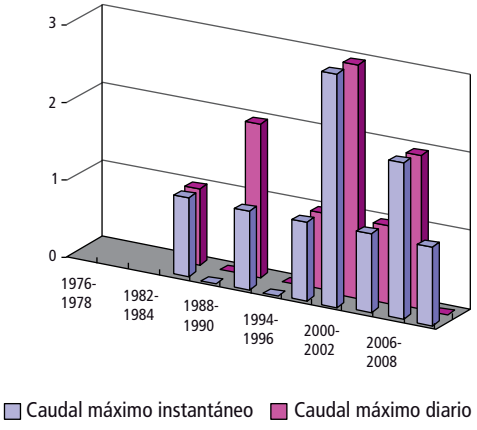
Histograma de las 10 mayores crecidas máximas para todas las estaciones (período 1976-2008), a excepción de la estación Río Mataquito en Licantén



Fuente: Vicuña et al. (2013).

Figura 4D.9

Histograma de las 10 mayores crecidas máximas: estación Río Mataquito en Licantén (1987-2009)



Fuente: Vicuña et al. (2013).

importantes con elevadas temperaturas, fenómeno que implica una proporción inusual de precipitación líquida. Un ejemplo de este tipo de fenómenos es el que ocurrió el 23 de mayo de 2008, que significó una crecida del período de retorno superior al de 200 años y la pérdida de la estación fluviométrica de Licantén (DGA, 2008). Esta mayor proporción de precipitación líquida en desmedro de la precipitación nival durante la temporada otoño-invierno significaría un manto nival más reducido que se derrite más tempranamente durante la época de deshielo.

A pesar de las mayores temperaturas que ocurren en esta temporada, particularmente en los meses de enero y febrero, la poca acumulación de nieve se traduce en caudales mínimos cada vez más bajos, tal como se mencionó anteriormente. Finalmente, pareciera ser que las crecidas importantes durante la época de deshielo se explicarían por la ocurrencia de precipitación líquida más que por grandes caudales de deshielo.

Síntesis de tendencias hidroclimáticas

Los resultados presentados previamente se pueden resumir de la siguiente manera, apoyándose en la Figura 4D.10, la que ejemplifica estas tendencias:

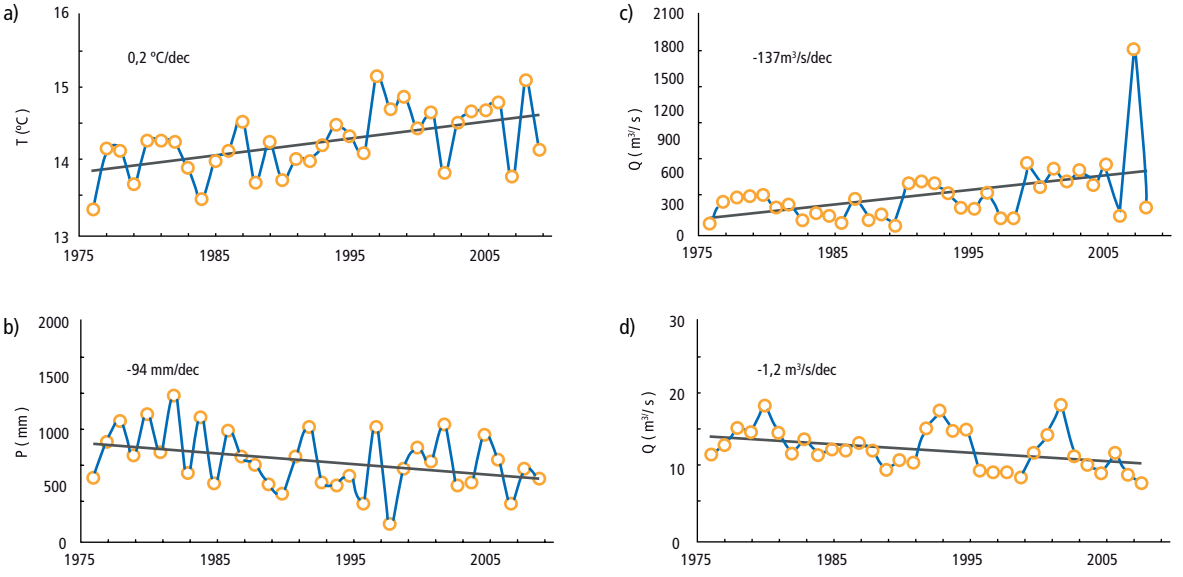
- Las temperaturas han aumentado en forma estadísticamente significativa en la cuenca. Esta señal se observa especialmente durante la primavera para la temperatura media. La Figura 4D.10a ejemplifica el comportamiento de esta variable en la estación de Curicó.
- La magnitud y frecuencia de precipitaciones en la época de primavera ha disminuido, lo que en algunos casos ha significado una reducción significativa de la precipitación anual, como se ejemplifica en la Figura 4D.10b para la estación de Curicó.
- Existen cambios en la temporalidad de caudales y una ocurrencia de eventos extremos más frecuentes. En particular, se observa que estos eventos extremos se asocian a altos

valores de precipitaciones y temperaturas mínimas anormalmente altas. En el caso de la estación de Colorado en Junta con Palos, esto ha devenido en un aumento significativo en los caudales máximos instantáneos (Figura 4D.10c).

- Se aprecia una disminución de acumulación de nieve (particularmente en otoño) que repercutiría en el ritmo y magnitud de la descarga de caudales, especialmente en verano. Esto ha significado una reducción en los caudales mínimos, como lo ilustra la Figura 4D.10d.

Figura 4D.10

Ejemplos de tendencias hidroclimáticas en la cuenca del río Mataquito



Fuente: Vicuña et al. (2013).

Nota: a) Temperatura media anual, estación de Curicó; b) precipitación anual, estación Curicó; c) caudal máximo instantáneo, estación Río Colorado en Junta con Palos; y d) caudal promedio de los siete días más secos, estación Palos Colorado.

Proyecciones climáticas futuras

Para modelar los impactos del cambio climático en la cuenca del río Mataquito, datos diarios de precipitación y de máxima y miníma temperatura se recolectaron con el procedimiento descrito en la sección "Datos hidrometeorológicos usados en la implementación del modelo VIC". Proyecciones del clima futuro fueron obtenidas mediante el Proyecto CMPI5 para 12 GCM (Tabla 4D.5) y dos escenarios: RCP 4.5 y RCP 8.5 (Tabla 4D.2). Estos GCM fueron seleccionados en razón de ser los modelos más consistentemente usados para simulaciones climáticas. Para facilitar la comparación entre modelos y para correr el modelo hidrológico VIC, todos los GCM fueron interpolados espacialmente a una grilla regular de 0,25° x 0,25° usando un método denominado *distance-weighted average mapping*. Este paso constituye la desagregación espacial o *downscaling*.

Tabla 4D.5

Nombres de los modelos GCM usados en el estudio e instituciones responsables

ID	Nombre del modelo	Grupo responsable
1	canesm2	Canadian Centre for Climate Modeling & Analysis, Canadá
2	cnrm-cm5	Météo-France / Centre National de Recherches Météorologiques, Francia
3	csiro-mk3-6-0	CSIRO Atmospheric Research, Australia
4	gfdl-cm3	GFDL, Estados Unidos
5	giss-e2-r	NASA / Goddard Institute for Space Studies, Estados Unidos
6	inmcm4	Institute for Numerical Mathematics, Rusia
7	ipsl-cm5a-mr	Institute Pierre Simon Laplace, Francia
8	miroc5	Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier, Japón
9	mpi-esm-lr	Max Planck Institute for Meteorology, Alemania
10	mri-cgcm3	Meteorological Research Institute, Japón
11	ccsm4	National Center for Atmospheric Research, Estados Unidos
12	hadgem2-cc	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, Reino Unido

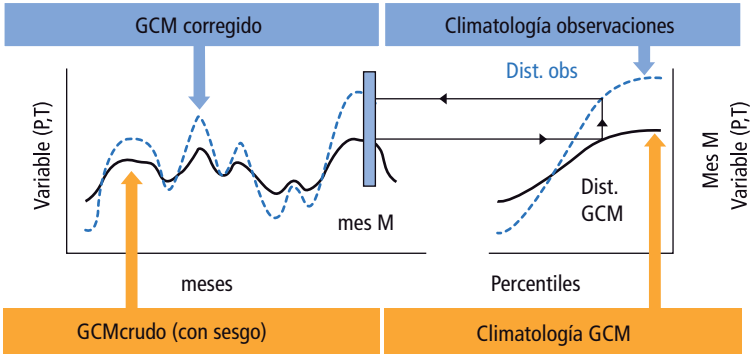
Las observaciones para el período 1960-1999 se utilizaron para efectuar la remoción del sesgo. El período 1960-1999 constituye el período histórico o de referencia. Se seleccionaron dos períodos futuros en el siglo XXI para comparar cambios relativos al período histórico: 2020-2049 y 2070-2099. Siguiendo la distribución temporal de lluvia en la cuenca, el año fue dividido en dos estaciones: la estación pluvial de abril a septiembre y la estación de deshielo de octubre a marzo.

Los sesgos existentes en los campos atmosféricos fueron removidos mediante un método estadístico que usa un mapeo de cuantiles para ajustar la distribución mensual simulada por el GCM respecto de la observada (Figura 4D.11). Para cada mes se calcula la distribución de probabilidades empírica observada y la del GCM. Para cada valor simulado de precipitación o temperatura se obtiene en la distribución de probabilidades del GCM la probabilidad de excedencia de un determinado monto de precipitación y ese mismo valor se obtiene en la distribución observada. Para esa probabilidad se encuentra el valor de precipitación o temperatura observado y se usa este para actualizar el valor simulado por el GCM. De esta manera, se igualan los momentos de la distribución empírica simulada a la observada. Este método tiene la desventaja de forzar la igualdad entre los momentos de la distribución futura y la del período histórico, lo que no es necesariamente esperable si la intensidad de precipitación cambia radicalmente en el futuro. Sin embargo, este método ha sido ampliamente usado para estudios hidrológicos en numerosas cuencas, debido a su fácil implementación y por permitir incluir tantos GCM como sean necesarios y de esta manera evaluar la incertidumbre de las proyecciones (Maurer et al., 2009; Wood et al., 2002, 2004).

Figura 4D.11

Representación esquemática del método estadístico usado para eliminar el sesgo en GCM precipitación y temperatura

Fuente: Adaptada de Wood et al. (2004).



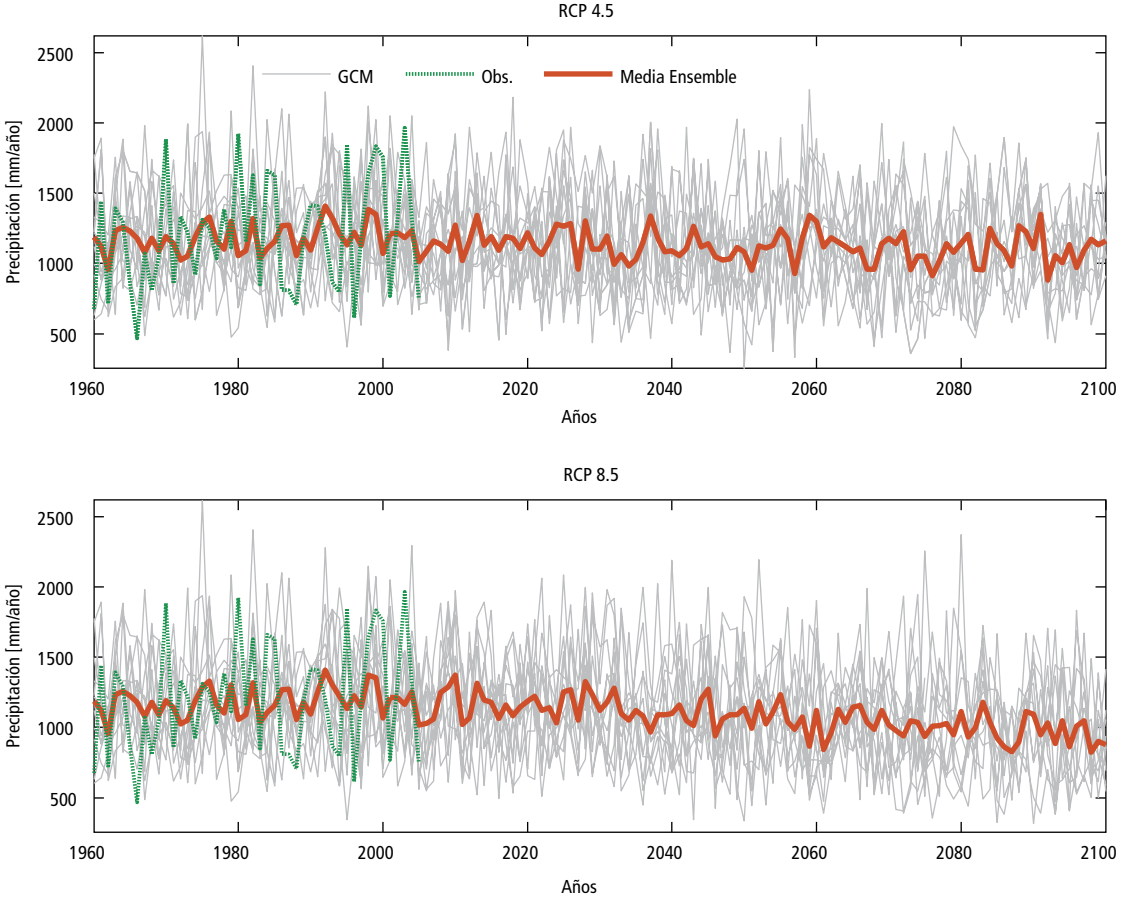
La desagregación temporal de mes a día se realiza seleccionando aleatoriamente un mes de las observaciones (por ejemplo, junio de 1999). Para cada grilla se usa la secuencia diaria observada para desagregar los valores mensuales de precipitación y temperatura (por ejemplo, junio de 2045). En el caso de las temperaturas mínimas y máximas, los valores observados diarios se desplazan de manera que la media mensual, $T_{media} = (T_{max} + T_{min})/2$, iguale a la media del GCM. La anomalía entre la media observada y la del GCM se suma a cada observación diaria y esta nueva serie constituye la serie diaria del GCM. Valores diarios de precipitación se obtienen mediante el cociente entre el total mensual observado y el del GCM PGCMi,j,dia = (Pobsi,j,dia/ Pobsi,j,m) x PGCMi,j,m), donde PGCMi,j,dia es el valor diario de precipitación del GCM en el mes m, y la grilla i,j; (Pobsi,j,dia/ Pobsi,j,m) es el porcentaje de precipitación diaria en el mes m, y PGCMi,j,m es la precipitación total mensual en el GCM.

Tendencias en proyecciones de precipitación y temperatura para la cuenca del río Mataquito

La tendencia en la precipitación media para la cuenca del río Mataquito para los 12 GCM descritos en la Tabla 4D.5 se presenta en la Figura 4D.12. Los valores anuales fueron suavizados con una media móvil de 11 años. Las proyecciones de precipitación para el siglo XXI muestran una tendencia decreciente con cambios relativos al año 1960 de -7 y -20% en el año 2099 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. Por el contrario, las temperaturas medias exhiben un aumento sostenido durante el curso del siglo del orden de 1,5 a 3,6°C para el RCP 4.5 y del orden de 2,0 a 4,2°C para el RCP 8.5 (Figura 4D.13). Los caudales y la nieve en la cuenca (simulados como SWE) es muy probable que disminuyan como resultado de menos precipitaciones y más temperaturas cálidas (Figuras 4D.14 y 4D.15).

Figura 4D.12

Tendencia de precipitación media en la cuenca, simulada mediante GCM

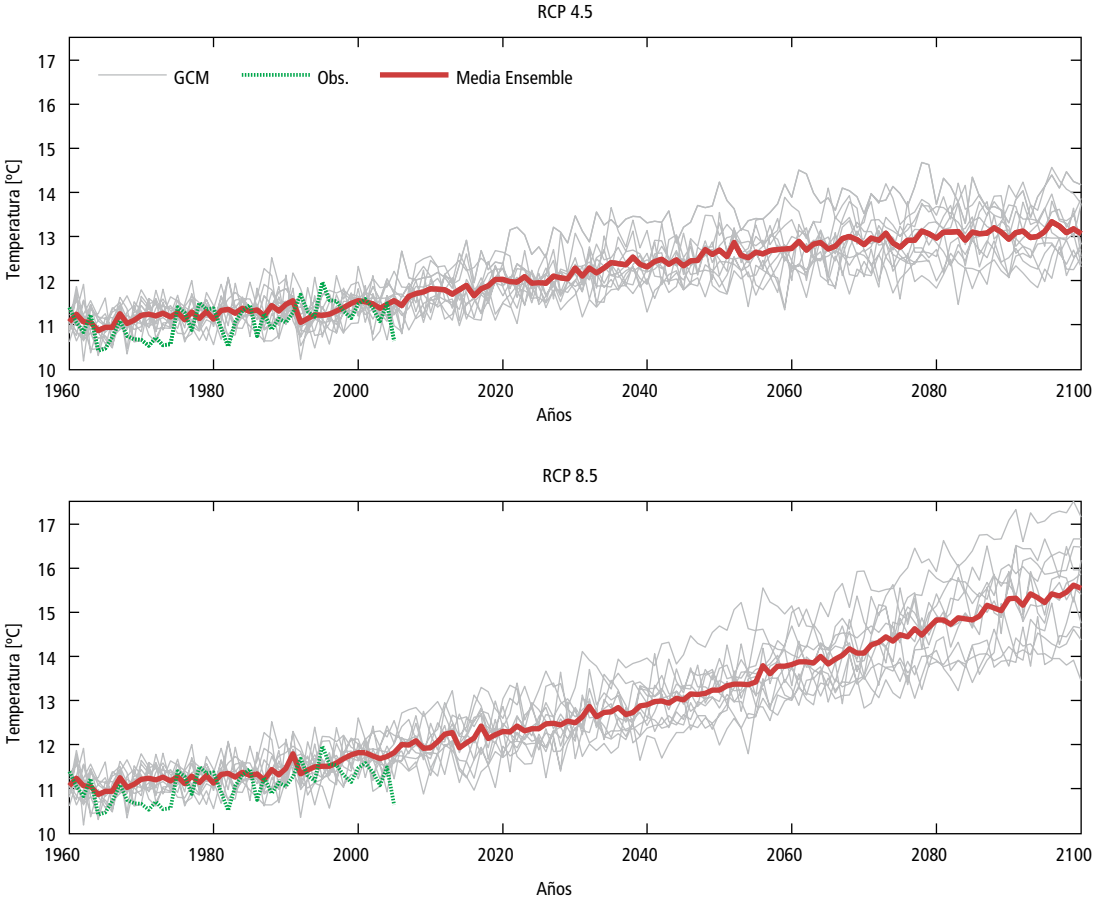


Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las series de tiempo fueron suavizadas con una media móvil de 11 años.

Figura 4D.13

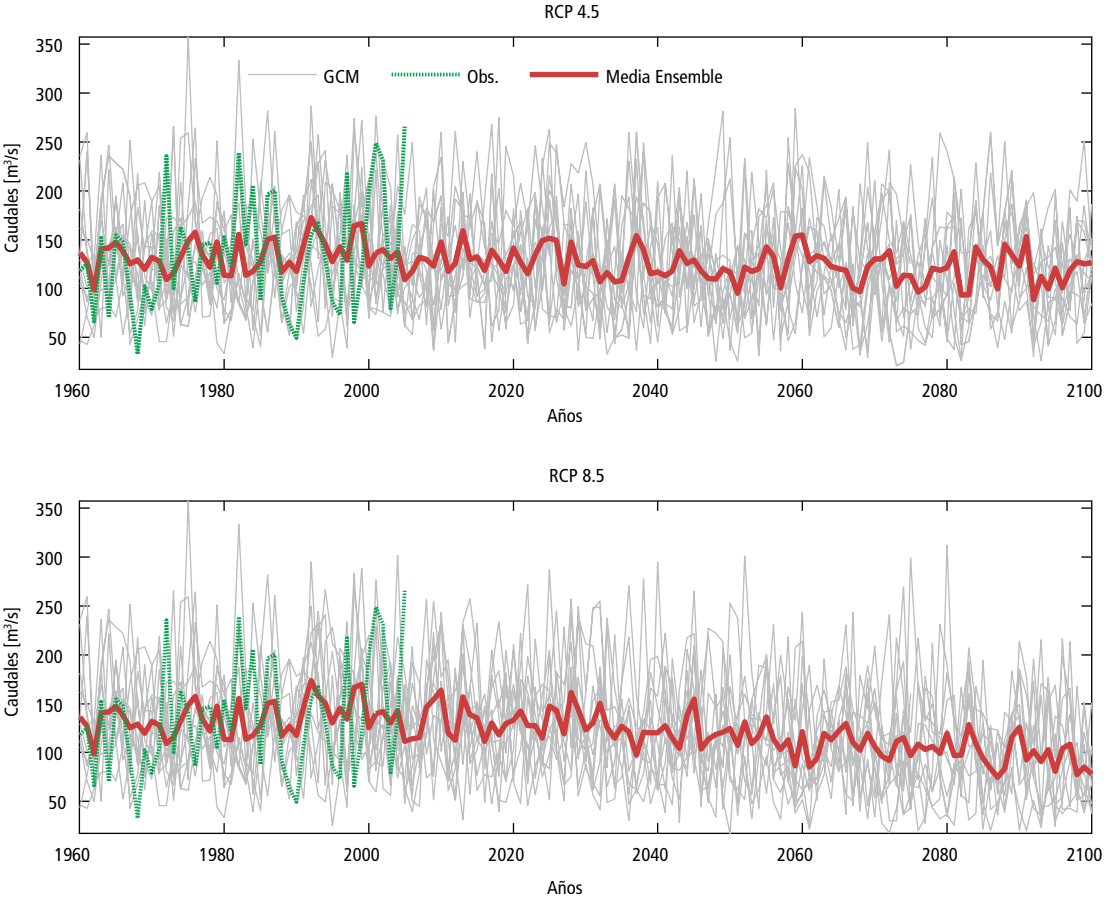
Tendencia de temperatura media anual en la cuenca, simulada mediante GCM



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4D.14

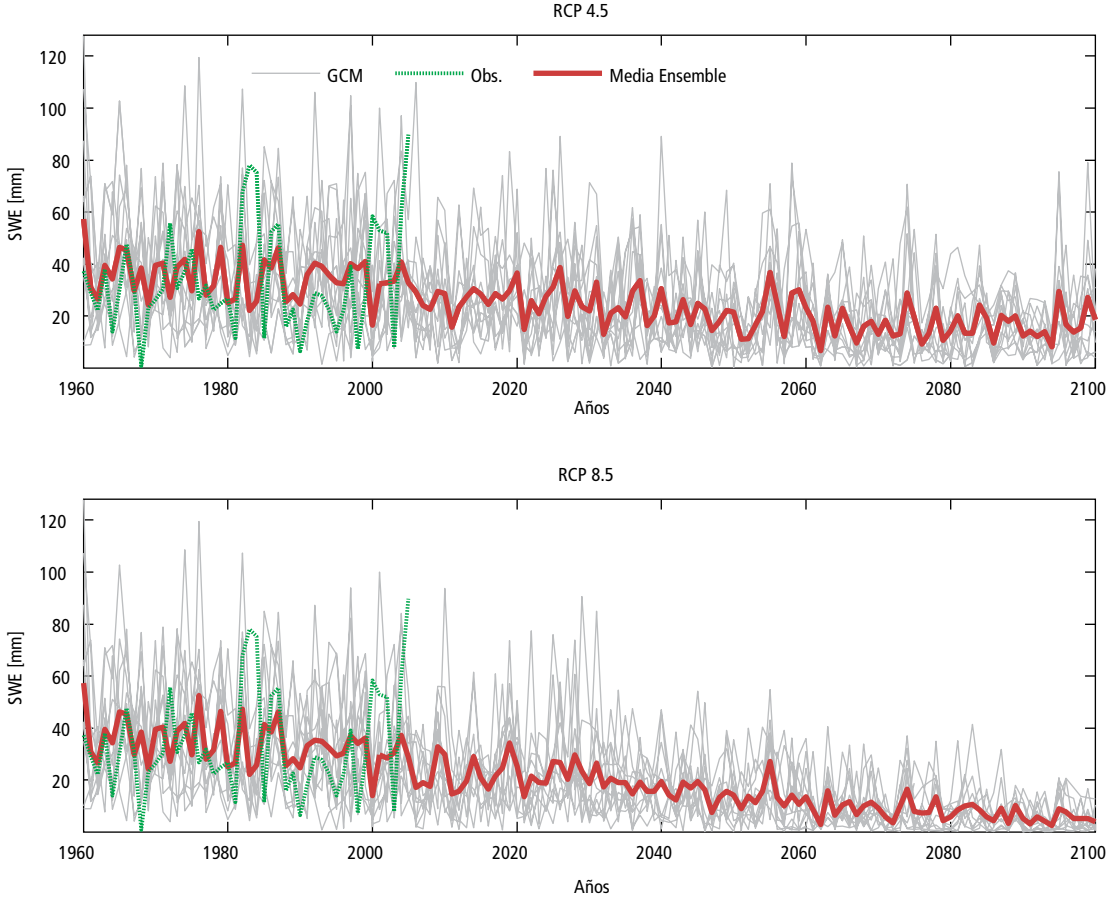
Tendencia de caudales medios anuales en la cuenca, simulada mediante GCM



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4D.15

Tendencia de agua equivalente en nieve (SWE) en la cuenca, simulada mediante GCM



Fuente: Elaboración propia.

Cambios en la intensidad de las precipitaciones y los caudales

Si bien las tendencias en los valores anuales de las variables hidrometeorológicas dan una idea de los impactos del cambio climático a largo plazo, hidrólogos e ingenieros están más interesados en estudiar cómo la magnitud de los caudales picos puede ser afectada por un clima más cálido y ligeramente más seco. Para ello es útil seleccionar los máximos anuales de precipitación y caudales, y analizarlos estadísticamente usando una distribución teórica de probabilidades. En los últimos años se han dado intensas discusiones dentro de la comunidad científica respecto de la validez del concepto de estacionalidad en las series de tiempo de precipitación y caudales observadas, como consecuencia de cambios en el clima. Uno de los aspectos cuestionados de este concepto es si es todavía razonable modelar procesos hidrológicos como procesos estacionarios en el tiempo (Milly et al., 2008). En relación a este cuestionamiento, Vogel et al. (2011) presentaron un método que tiene en cuenta cambios en la media y varianza de estas variables en el futuro. Sin embargo, existe otro enfoque que consiste en considerar que las propiedades estadísticas de las series de tiempo no cambian en períodos en el futuro para períodos de tiempo relativamente cortos. Es nuestro análisis, se utilizaron períodos de 30 años para ajustar la Generalized Extreme Value (GEV, por su sigla en inglés) o distribución de probabilidades, la cual es ampliamente usada para modelar máximos (Hurkmans et al., 2010). Para minimizar el impacto de *outliers* en el ajuste de la distribución, una ventana móvil de tres días se aplicó a los datos diarios de precipitación y caudales. Para cada GCM se seleccionó el máximo anual para el período histórico y el período futuro (2070-2099) y se ajustó una distribución GEV para cada período de 30 años.

La intensidad de las precipitaciones aumentará durante el siglo XXI para períodos de retornos grandes. Para el escenario RCP 8.5, los cambios en promedio serán de entre 23,8 y 30,7% para los períodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente. Es importante destacar que dos GCM empleados en el análisis tienen valores de precipitación grandes, lo que desvía la media del abanico de modelos hacia arriba (Figuras 4D.16a y b).

El Manual de Carreteras (MOP, 2012) establece criterios para seleccionar los caudales de diseño para dimensionar diferentes obras de infraestructura. En la Tabla 3.702.2B del tercer volumen, se establece un período de retorno de 100 (200) años para el diseño de puentes y viaductos sobre caminos (carreteras), con una vida útil supuesta de 50 años. Un análisis similar al de las precipitaciones fue realizado para los 3-días caudales máximos anuales. Cambios en la intensidad de los caudales picos serán consistentemente positivos para la mitad y finales del siglo, con valores promedios de 36% para RCP 8.5 para períodos de retorno de 100 años (Figuras 4D.16c y d). El incremento en la magnitud de los caudales está relacionado con aumentos en la intensidad de las tormentas, ya que precipitaciones más intensas

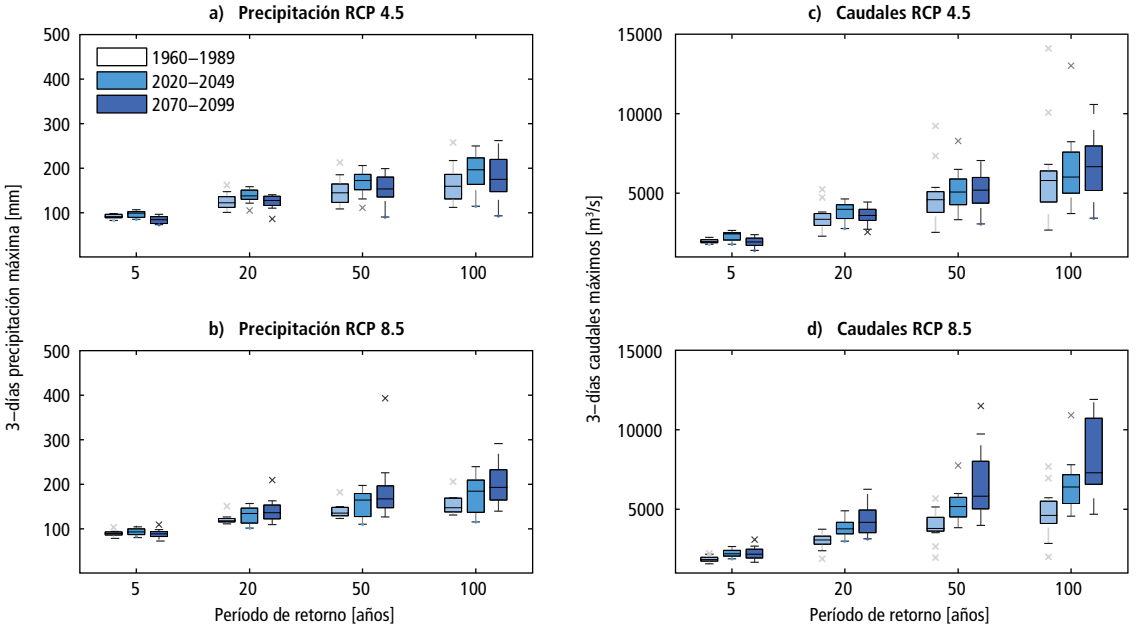
producen más escurrimiento, aun cuando los suelos están relativamente secos. Para poner estos resultados en contexto, el más reciente pico en la cuenca, registrado en mayo de 2008, fue de 2.690 m^3/s (con valores instantáneos que superan los 4.200 m^3/s). La ocurrencia de eventos de esta magnitud se proyectan en promedio cada 10-20 años durante el siglo XXI, bajo los dos escenarios de gases invernadero.

Determinación de umbrales de alerta de caudales bajo cambio climático

Identificar los caudales de crecidas y las áreas inundables para ciertos umbrales de crecida en el contexto de cambio climático, constituye una herramienta útil para anticipar y organizar medidas paliativas y de diseño estructural, de manera de poder

Figura 4D.16

Máximo anual de precipitación media areal (3-días) para diferentes períodos de retorno usando una distribución GEV



Fuente: Demaria et al. (2013).

Nota: a) RCP 4.5, b) RCP 8.5, y c) y d) para caudales máximos medios de 3-días.

enfrentar eventos de desborde e inundaciones. El MOP realizó un estudio para determinar los umbrales de alerta de caudales con el fin de implementar sistemas de alerta en varias cuencas del país (DGA, 2010). Usando un análisis hidráulico se construyó una curva nivel-caudal para la estación Licantén, ubicada a la salida de la cuenca del río Mataquito. El umbral de inundación de la ciudad de Licantén ha sido definido en 7,0 m, el cual corresponde a un nivel de alerta roja. La Tabla 4D.6 muestra los umbrales de alerta para distintos caudales y niveles.

Tabla 4D.6

Determinación de umbrales de alerta de caudales en Licantén

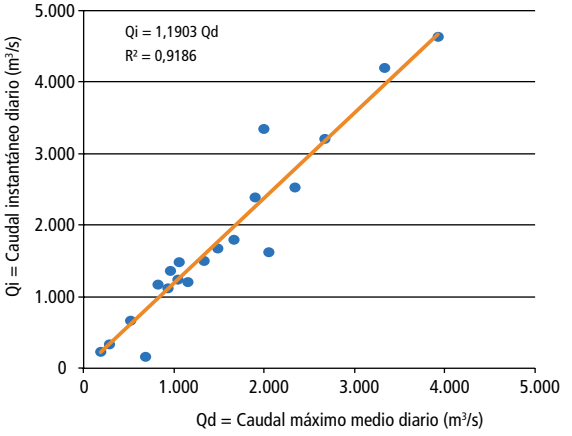
	Alerta Azul	Alerta Amarrilla	Alerta Roja
Q (m^3/s)	1516,0	2355,0	3038,0
H (m)	5,5	6,4	7,0

Fuente: DGA (2010).

Para estimar cómo el umbral de alerta será afectado debido al incremento en la magnitud de los caudales picos en la cuenca, se ajustó una ecuación lineal entre caudales máximos diarios anuales y caudales máximos instantáneos a datos observados para el período 1987-2006 (McCuen y Beighley, 2003). Los caudales máximos anuales están altamente correlacionados con los valores instantáneos, como se pone en evidencia con un R^2 de 0,91 (Figura 4D.17).

Figura 4D.17

Relación entre caudales máximos medios anuales y caudales máximos instantáneos en Licantén



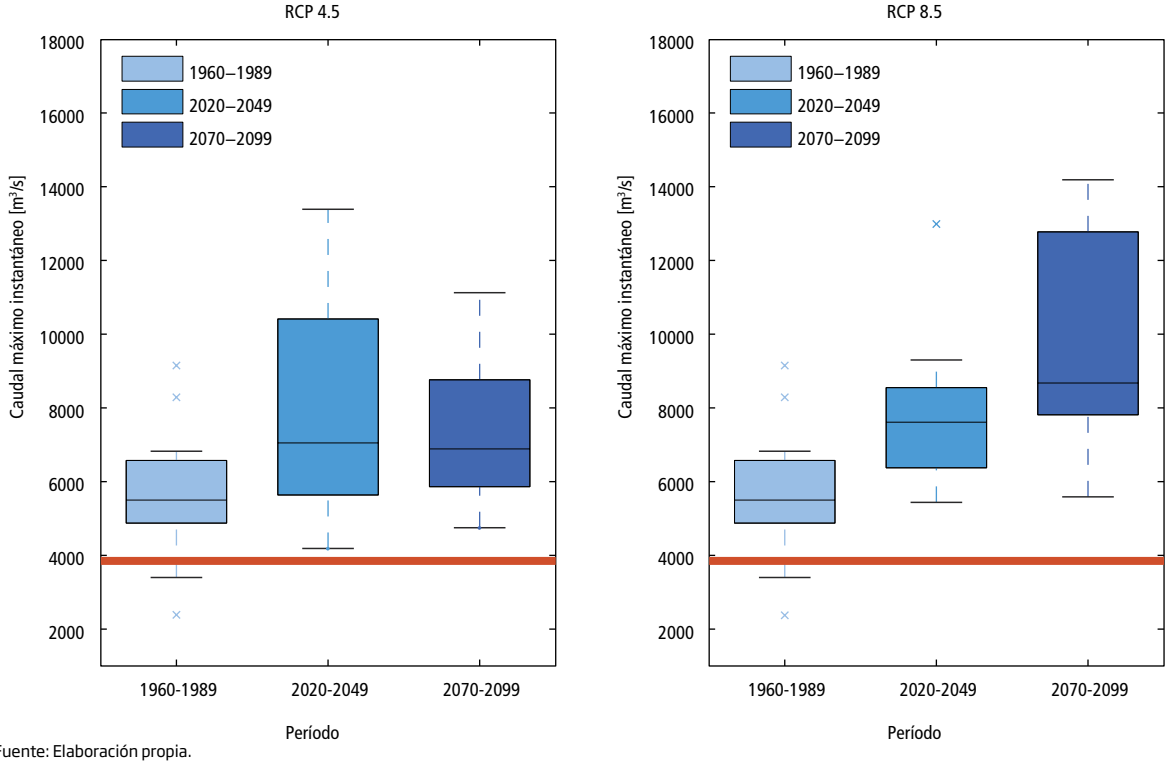
Fuente: Elaboración propia.

La relación entre caudales medios e instantáneos es igual a Qi = 1,19 Qd para la cuenca. Esta relación se usó para convertir los caudales de la Figura 4D.16, de manera de comparar proyecciones futuras con el umbral de alerta roja. La Figura 4D.18 muestra que el umbral de alerta roja será ampliamente superado en el futuro bajo los dos escenarios climáticos. Al igual que los caudales medios máximos, caudales instantáneos aumentan más drásticamente bajo el escenario con mayor forzante radiativa (RCP 8.5) para finales del siglo XXI. La magnitud de los caudales instantáneos para ese período será, en promedio, dos veces mayor que la magnitud del caudal

de alerta roja. Los cambios en el escenario RCP 4.5 son menos marcados entre la primera y la segunda mitad del siglo, con valores de caudales 7.000 m³/s. Estos resultados manifiestan que el calentamiento global puede afectar la magnitud de los caudales máximos en la cuenca, y muy probablemente en la región central de Chile, por lo cual se hace indispensable contar con un sistema de alerta temprana y medidas de mitigación que permitan hacer frente a estas condiciones extremas.

Figura 4D.18

Caudal máximo anual instantáneo para una recurrencia de 100 años para el período histórico (1960-1989) y dos períodos futuros (2020-2049 y 2070-2099)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: La línea roja representa el caudal de Alerta Roja.

Impactos del cambio climático en el diseño de obras hidráulicas

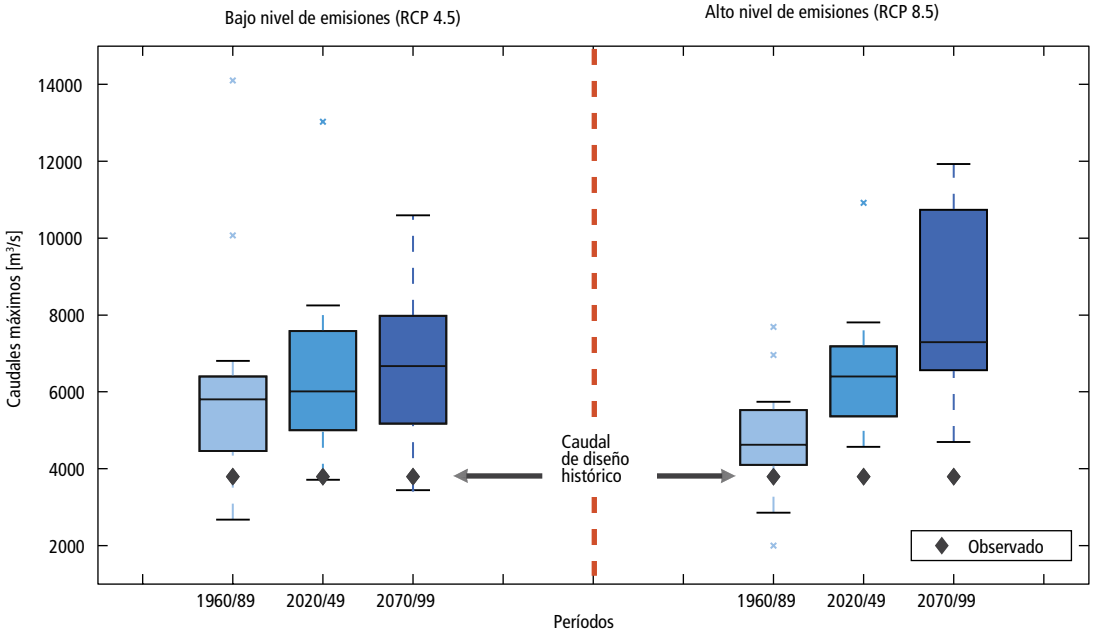
El diseño de obras hidráulicas en un cauce requiere conocer, además de la geometría del cauce, el caudal de diseño para estimar una determinada probabilidad de ocurrencia, la que determina la vida útil de la obra. No solo el diseño estructural de las obras está íntimamente condicionado por el mencionado caudal de diseño, sino que también la estabilidad de la estructura se podría ver amenazada por caudales extraordinarios que no han sido registrados durante el registro de caudales observados disponibles. Procesos naturales de socavación tienden a ocurrir en las cercanías de un puente, debido a la contracción de la geometría del cauce por la presencia de estribos. La erosión o socavación en un puente pueden ser exacerbadas en casos de crecidas, como resultado de un incremento en la velocidad del flujo, y causadas por remolinos en las cercanías de los pilares del puente o de los estribos. Dependiendo de la composición del material de fondo del río, la erosión general de fondo también puede provocar serios daños en este tipo de estructuras.

La intensificación de los eventos de precipitación como consecuencia del cambio climático traerá aparejado un incremento en la magnitud de los caudales picos en una cuenca, como se ejemplificó para la cuenca del río Mataquito en las secciones precedentes. Por lo tanto, es importante poder evaluar los efectos de incrementos en los caudales máximos en la vulnerabilidad de obras hidráulicas, de manera de poder considerar su probabilidad de falla frente a un evento de extrema magnitud. Análisis de este tipo permitirán diseñar mapas de vulnerabilidad de estructuras y de esta manera estimar con suficiente antelación el costo asociado a su reemplazo o reparación.

En el tercer volumen del Manual de Carreteras (MOP, 2012) se estipulan métodos para calcular la socavación por contracción en las pilas de un puente y la erosión generalizada. Todos ellos requieren información de caudales máximos para una recurrencia determinada. La Figura 4D.19 muestra cómo los caudales de diseño para un período de retorno de 100 años probablemente se alterarán como resultado de cambios en las condiciones climáticas de la cuenca del Mataquito. El caudal de diseño histórico, indicado con un rombo en la figura, será ampliamente excedido en el futuro en los dos escenarios climáticos; sin embargo, los mayores cambios a finales del siglo XXI ocurrirán para el escenario RCP 8.5. Estos resultados indican que los ingenieros deben adaptar sus cómputos para tener en cuenta estos cambios y así minimizar el riesgo de falla de futuras obras.

Figura 4D.19

Cambios en el caudal del diseño con recurrencia de 100 años para dos escenarios climáticos: bajo nivel de emisiones (panel izquierdo) y alto nivel de emisiones (panel derecho)



Fuente: Elaboración propia.

Discusión de resultados y conclusiones

Hay contundentes evidencias de que el clima en la región central de Chile ha cambiado en el transcurso del siglo XX y de que estas tendencias van a continuar durante el presente siglo. Como consecuencia de estos cambios, el concepto de estacionalidad de las series de tiempo hidrológicas no es aplicable y nuevos caudales de diseño necesitan ser considerados en la realización de proyectos hidráulicos. En la cuenca del río Mataquito, las temperaturas han aumentado especialmente durante los meses de primavera. Estas tendencias han sido estadísticamente robustas durante los últimos 30 años (1976-2008). La magnitud de precipitación ha disminuido; sin embargo, se registra un incremento en la frecuencia de caudales extremos en la cuenca. Proyecciones climáticas de 12 GCM indican que estas tendencias van a continuar durante el siglo XXI, incrementando así la vulnerabilidad de las obras hidráulicas existentes y la probabilidad de ocurrencia de desbordes del río. La frecuencia y magnitud de los caudales máximos anuales posiblemente aumentarán como consecuencia de eventos de precipitación más intensos y de cambio en la proporción de días con precipitación líquida con respecto a precipitación sólida durante los meses de invierno.

Como muchas otras cuencas en América del Sur, la cuenca del río Mataquito no posee una red de estaciones pluviométricas adecuada para la implementación de modelos hidrológicos distribuidos a escala de la cuenca. Esto deja como único recurso el uso de datos de precipitación globales obtenidos con una fusión de datos de satélite y de modelos, y validados con unos pocos pluviómetros disponibles en la región. Desafortunadamente, estos datos globales son deficientes para representar los gradientes de precipitación en las cercanías de la cordillera de los Andes y deben ser corregidos. Sin embargo, el uso de una red de pluviómetros disponible localmente y un simple método *cokrigging* con elevación como variable dependiente puede mejorar notablemente las características espaciales de los datos globales en grilla, lo que los hace sumamente útiles para evaluar los impactos del cambio climático en la región central de Chile.

La utilización de datos climáticos futuros para realizar el diseño de obras de infraestructura en una cuenca requiere la aplicación de una serie de métodos que permitan convertir los datos de los modelos de circulación general de la atmósfera, disponibles a escalas espaciales y temporales inadecuadas para uso hidrológico, en series de tiempo con las características espacio-temporales necesarias para un modelo hidrológico. Estos pasos incluyen desagregar espacial y temporalmente los datos de precipitación y temperatura, y remover los sesgos existentes en las proyecciones climáticas usando las observaciones históricas.

Resultados para la cuenca del río Mataquito indican que las magnitudes de los caudales máximos anuales aumentarán y que por lo tanto los caudales de diseño usados en el diseño y verificación de

obras hidráulicas en la cuenca se verán afectados. Para el diseño de obras futuras no solo se debe tener en cuenta el impacto del cambio climático, sino que también debe ser verificada la tasa de erosión para obras existentes. Esto permitirá evaluar la probabilidad de falla de puentes y otras obras, con el fin de programar las medidas de protección necesarias. Como consecuencia de caudales picos más extremos y frecuentes, se hace asimismo necesario adecuar los umbrales de alerta por inundación y diseñar planes de evacuación acordes. Si bien los resultados presentados en esta sección son válidos para la cuenca del río Mataquito, bosquejan los procedimientos necesarios que deben ser implementados para evaluar los efectos de climas más cálidos en otras cuencas en Chile.

5

Recomendaciones para el desarrollo de un marco estratégico para la adaptación al cambio climático en la infraestructura pública en Chile

5

GUILLERMO DONOSO
MATÍAS CAMAÑO
SEBASTIÁN VICUÑA
JORGE GIRONÁS
RODRIGO CIENFUEGOS

Estado actual de la planificación de infraestructura pública en Chile

El Ministerio de Obras Públicas (MOP) inició en el año 2007 un Programa de Fortalecimiento Institucional (PFI), apoyado por el Banco Mundial (BM). Uno de los objetivos claves de este Programa de Fortalecimiento fue mejorar las capacidades del MOP para la planificación de la infraestructura. Consecuentemente con lo anterior, en los últimos años el MOP ha diseñado un proceso de planificación integrada de los servicios de infraestructura, que se explicita en la "Guía para la elaboración de planes",* de la Dirección de Planeamiento del MOP

* http://www.dirplan.cl/centrodedocumentacion/Documents/Metodologia/Guia_Elaboracion_Planes_marzo_2011.pdf

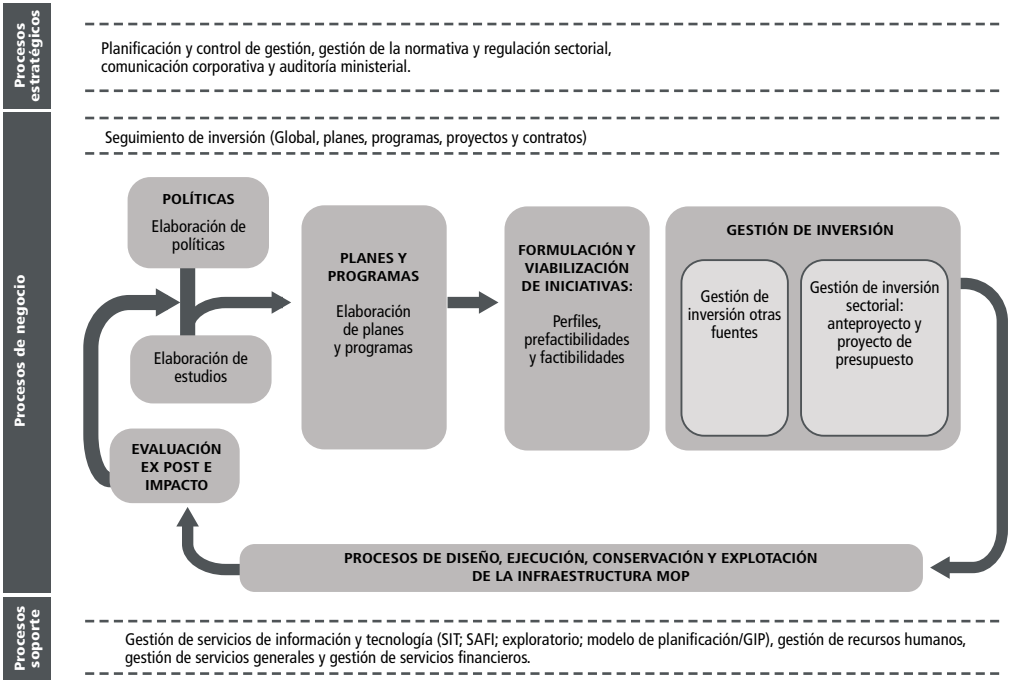
(DIRPLAN). El objetivo de dicha guía es planificar estratégica e integradamente las inversiones en infraestructura, vinculando los requerimientos de los sectores productivos, de la sociedad y territoriales con una visión de largo plazo, de manera de contar con la infraestructura en forma oportuna y compatible con las demandas que plantea el proceso de desarrollo económico a futuro.

El proceso de planificación en el MOP, a cargo de la DIRPLAN se presenta esquemáticamente en la Figura 5.1.

De la Figura 5.1 se desprende que el actual proceso de planificación está compuesto por los macroprocesos estratégicos, de negocios y de soporte. Los procesos de planificación estratégicos fomentan la planificación integrada entre los sectores de

Figura 5.1

Esquema del proceso de planificación en el MOP



Fuente: MOP (2013).

infraestructura. En los procesos de negocios se desarrollan los planes del MOP, los cuales se indican en la Figura 5.2, en orden jerárquico.

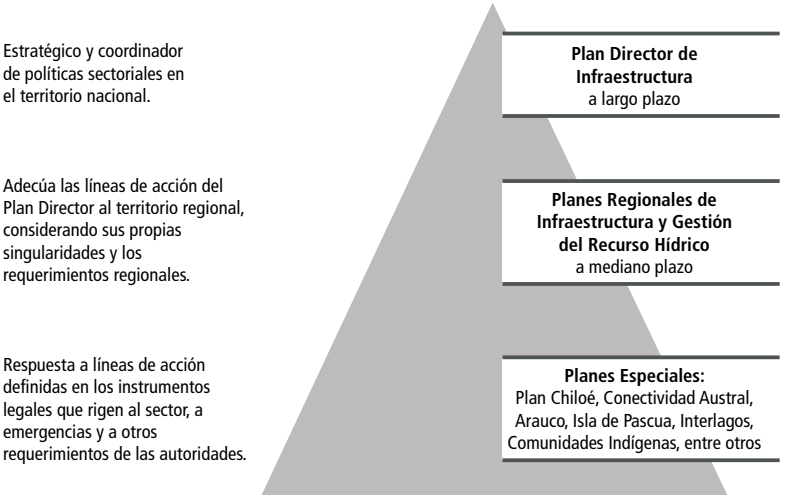
El Plan Director de Infraestructura es un plan de largo plazo, con un horizonte de al menos 20 años. El territorio objeto de análisis en este plan es el nacional. Este plan constituye el instrumento de coordinación de las políticas sectoriales en materia de servicios de infraestructura. Es elaborado por la DIRPLAN en conjunto con los servicios del MOP y en coordinación con otros agentes públicos y privados. Es importante destacar que este plan es vinculante para los servicios del MOP y se revisa cada cuatro años.*

Los Planes Regionales son instrumentos de planificación de mediano plazo, con horizontes de ocho años, alineados con la visión estratégica del Plan Director, que define líneas de acción para las necesidades y brechas particulares de la región. Hasta la fecha se han elaborado 15 planes, liderados por los

* Lapso que es correspondiente al período gubernamental, durante el cual pueden cambiar en forma importante los lineamientos básicos de política.

Figura 5.2

Tipos y jerarquías de planes en el MOP



Fuente: DIRPLAN, MOP (2011).

seremis regionales del MOP. A su vez, estos planes son un insumo para el proceso de elaboración de los Planes Regionales de Ordenamiento Territorial (PROT). El producto de este plan es una cartera de proyectos con fechas de ejecución de corto y mediano plazo. Con respecto al recurso hídrico, la DGA se encuentra en un proceso de elaboración de los Planes Maestros Regionales de Recursos Hídricos, los cuales son un nuevo instrumento implementado, producto de las necesidades planteadas por la DIRPLAN.

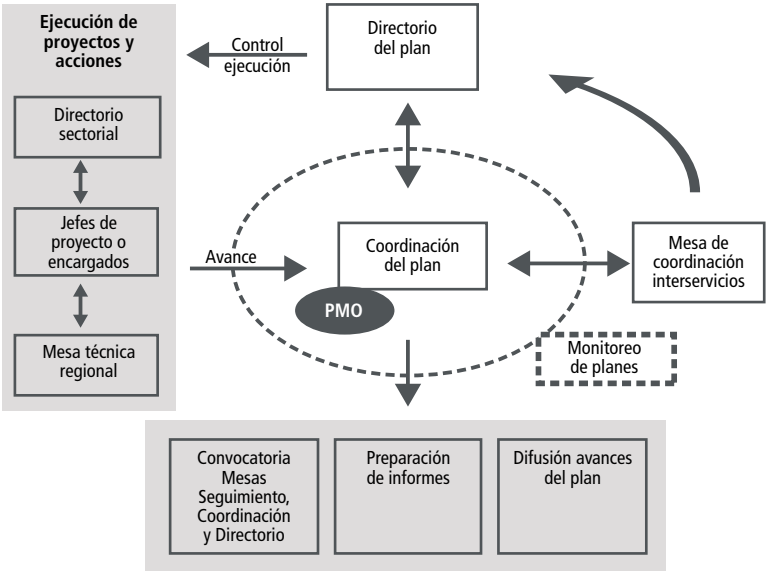
Los Planes Especiales son planes que abordan temas específicos definidos en diversos instrumentos, como pueden ser el Plan Director de Infraestructura, Planes Regionales de Infraestructura, leyes que rigen al Ministerio o sus Servicios, respuestas a emergencias y otros requerimientos de las autoridades. En definitiva, se conciben para contribuir al logro de un objetivo específico.

La DIRPLAN elaboró una guía para la gestión y monitoreo de los diversos planes. En esta se indica la necesidad de que cada plan contenga un modelo de gestión, el establecimiento de los roles de los involucrados en el desarrollo del plan, el sistema de monitoreo del plan y los sistemas de información a utilizar en su respectiva administración de los planes. El modelo de gestión y monitoreo de los planes se presenta esquemáticamente en la Figura 5.3.

Figura 5.3

Modelo de gestión y monitoreo de planes

Fuente: DIRPLAN, MOP (2011).



Se estableció como meta que todos los Planes Regionales de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico, y los Planes Especiales cuenten con un monitoreo anual.

Brechas para incluir la adaptación al cambio climático

Del análisis del proceso de planificación de infraestructura en el MOP se desprende que este no considera el cambio climático y las necesidades de adaptación. No obstante, en la DIRPLAN y los servicios del MOP, incluida la Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio (SEMAT), existe conciencia de la necesidad de incorporar tempranamente en el proceso de planificación, así como los respectivos requerimientos de adaptación para reducir las vulnerabilidades de un territorio a este fenómeno.

El logro de esta integración pasa por entender las características de la planificación para la infraestructura y la gestión del riesgo, así como de la planificación para la adaptación al cambio climático. Las características de estos procesos se presentan en la Tabla 5.1.

De la Tabla 5.1 se desprende que ambos procesos de planificación se centran en el manejo del riesgo con el objeto de reducir la vulnerabilidad de la sociedad a los eventos extremos. Sin embargo, los procesos presentan diferencias significativas en

Tabla 5.1

Características de los procesos de planificación para la infraestructura pública y la adaptación al cambio climático

Adaptación al cambio climático	Reducción de riesgo ante desastres naturales
Manejo del riesgo	Manejo del riesgo
Fuerte base científica	Basado en conocimiento ingenieril y las ciencias naturales
Perspectiva desde la ciencia ambiental	Enfoque tradicional entre "evento y exposición", y en soluciones tecnológicas
Altamente interdisciplinario	Paso de la respuesta y recuperación a conciencia y preparación
Perspectiva desde la vulnerabilidad	Perspectiva a corto plazo, pero aumentando a una perspectiva a largo plazo
Perspectiva a muy largo plazo	Perspectiva a mediano plazo
Escala global	Escala local
Base jerárquica	Basado en la comunidad

Fuente: Thomalla et al. (2006).

sus enfoques. Es así como el proceso de planificación de la infraestructura se basa en un enfoque más ingenieril; el de adaptación posee una fuerte base científica con una perspectiva de la ciencia ambiental. Por lo anterior, el proceso de planificación para la adaptación es altamente interdisciplinario, mientras que el de infraestructura es ingenieril, en aras de lograr una respuesta efectiva y la recuperación de los riesgos. Sin embargo, es importante destacar que la planificación para la infraestructura ha comenzado a evolucionar hacia un enfoque que plantea tomar en consideración la conciencia de la sociedad y su preparación.

Los horizontes de planificación son muy distintos entre los dos enfoques. El proceso de planificación de infraestructura se caracteriza por plazos más bien cortos a mediano plazo. Por ejemplo, los Planes Directores, Planes Regionales y de Gestión del Recurso Hídrico son de corto y mediano plazo. La planificación de adaptación al cambio climático, en cambio, considera el futuro a mediano (próximos 30 años) y largo plazo (50 a 100 años).

De lo anterior se desprende que la mayoría de las diferencias entre estos enfoques se relacionan con distinciones en la percepción de la naturaleza de los riesgos y en los plazos de la amenaza. Los desastres causados por eventos extremos tienden a ser tiempo y espacio específicos. En el caso de muchos riesgos por desastres naturales, existe un considerable conocimiento y certeza acerca de las características del evento (tipo de peligro, áreas geográficas con riesgo, frecuencia, magnitud, probabilidad de recurrencia), como en cuanto a las características de exposición (geología, altitud, número de personas en situación de riesgo), sobre la base de experiencias históricas. En cambio, la mayoría de los impactos del cambio climático son más difíciles de percibir ya que se fundan en proyecciones futuras basadas en herramientas e información con altos niveles de incertidumbre, especialmente cuando los plazos son largos.

Estas brechas generales se materializan también en brechas particulares distintas que dependen del tipo de infraestructura considerado en la planificación. En las secciones en las que se presentan las metodologías específicas, se describen algunos elementos esenciales de estas brechas. El avanzar en la disminución tanto de las brechas generales como de las especificas se considera de manera proactiva en la propuesta que se presenta en la siguiente y última sección de este libro.

Propuestas de incorporación del cambio climático en el proceso de planificación ministerial

La experiencia con respecto a la adaptación al cambio climático ha ido creciendo rápidamente en los últimos años, motivada fuertemente por la falta de acuerdo en materia de negociaciones internacionales para lograr reducir las emisiones de GEI a niveles que impidan o reduzcan al máximo la existencia

de este fenómeno. Sin embargo, quedan todavía muchos desafíos por resolver, como por ejemplo, el poder aminorar la incertidumbre con respecto a escenarios climáticos futuros o poder pronosticar la ocurrencia de eventos extremos futuros. En este sentido, es importante destacar que la propuesta que se plantea en este texto debe ser considerada como el inicio de un proceso de largo plazo, en el que se irán resolviendo paso a paso distintos elementos claves para poder ir incorporando la adaptación al cambio climático en la planificación de la infraestructura pública en Chile. De manera concreta, se plantean tres aspectos que deben ir desarrollándose en paralelo para iniciar este proceso:

- Promover la discusión interministerial relativa a la incorporación del cambio climático en el proceso de decisión de obras de infraestructura.
- Mejorar los sistemas de monitoreo de amenazas y vulnerabilidad.
- Avanzar en el desarrollo de metodologías específicas para poder incorporar el cambio climático en la planificación de infraestructura

Promover la discusión interministerial relativa a la incorporación del cambio climático en el proceso de decisión de obras de infraestructura

Para realmente incorporar las proyecciones de cambio climático en el proceso de planificación de obras de infraestructura pública, es importante reconocer que existe una serie de organismos estatales, aparte del MOP, que como punto de partida tienen que estar de acuerdos con la idea de incorporar estos nuevos elementos. Entre ellos, para este tema en particular, destacan aquellos organismos asociados al desarrollo de la necesidad de infraestructura como la CNR del Ministerio de Transporte o la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) a nivel central, o los mismos gobiernos regionales a nivel local. O también organismos como el Ministerio de Desarrollo Social, que a través de sus componentes de planificación participan en la evaluación de la pertinencia de inversiones en infraestructura como asimismo en otro tipo de gastos públicos enfocados al desarrollo del país.

La tabla 5.2 presenta, por los tipos de obras analizados en este trabajo, los actores que debieran estar involucrados en esta discusión interministerial.

El fondo de esta discusión interministerial tendría que considerar aspectos integrales relacionados con la planificación de infraestructura para entender su necesidad, pero también la necesidad de considerar instrumentos complementarios para lograr una eficaz reducción de vulnerabilidades y amenazas. Un ejemplo claro de estos instrumentos complementarios es la planificación y gestión territorial. En el caso de ocurrencia de eventos extremos, por ejemplo, las modificaciones futuras del uso de suelo deben tener en cuenta diseños actuales que por lo general no consideran estas nuevas condiciones. Algo similar sucede con las políticas de desarrollo rural o agrícola y su efecto en la

Tabla 5.2

Organismos estatales involucrados en el proceso de planificación de diferentes obras de infraestructura

Obra de infraestructura	Organismos estatales relevantes
Embalses de riego	CNR, MOP (DGA, DOH, DIRPLAN), Ministerio de Desarrollo Social
Puertos	MOP (DOP, DIRPLAN), Ministerio de Desarrollo Social, Ministerio de Defensa, Fuerzas Armadas DIRECTEMAR, SHOA.
Puentes	MOP (DIRPLAN, VIALIDAD), Ministerio de Desarrollo Social, Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.

Fuente: Elaboración propia.

demanda de agua en regiones que pueden verse afectadas por el cambio climático.

Finalmente se requiere que, producto de esta discusión interministerial y tomando como base aspectos tanto de monitoreo como metodológicos (que se describen a continuación), se revisen o desarrollen nuevos manuales de metodologías y/o procedimientos que consideren la nueva documentación técnica y regulatoria. En el futuro es indispensable contar con procedimientos administrativo adecuados para implementar modificaciones y/o nuevos protocolos de diseño. Esto puede significar modificar instrumentos ya existentes como el Manual de Carretera, Manual de Desarrollo de Grandes Obras de Riego, documentos oficiales que rigen en el país el desarrollo de infraestructura vial y de riego, respectivamente. En el caso de obras portuarias es menester desarrollar manuales y/o recomendaciones para el diseño y seguimiento de obras marítimas que recojan la experiencia internacional y nacional. El proceso seguido por España con el programa ROM puede ser de utilidad para Chile como ejemplo a considerar y seguir en el contexto de la definición de metodologías o estándares para el diseño de obras marítimas en la situación de un clima cambiante. El diálogo entre entes administrativos, técnicos, económicos y científicos debe ser fluido, de manera de garantizar la actualización apropiada de estos documentos.

Mejorar los sistemas de monitoreo de amenazas y vulnerabilidad

Esta parte de la estrategia no es algo nuevo, ya que existen y siempre han existido en Chile sistemas de monitoreo de diferentes variables de origen hidrometeorológico y oceánico que definen las características de las amenazas que afectan a diferentes localidades del país. Sin embargo, este proceso de monitoreo puede ser mejorado considerablemente, en particular en los diferentes temas específicos:

- Es necesario mejorar el monitoreo de condiciones climáticas e hidrológicas de cuencas en altura y en zonas más extremas del país. Son escasas las estaciones de monitoreo por sobre los 2.000 m de altura en prácticamente la totalidad de las cuencas del país. La importancia de los procesos hidrológicos a estas

alturas y la sensibilidad que tienen estos tanto a cambios en temperatura como a precipitación asociados, por ejemplo a la ocurrencia de tormentas cálidas, aumentan las necesidades de monitoreo. Al mejorar la capacidad de registro de los parámetros relevantes, se podrá mejorar también la posibilidad de proyectar la ocurrencia de estos eventos y sus consecuencias en el futuro.

- En muchas cuencas del país las estaciones de monitoreo de caudales extremos no están capacitadas para registrar caudales a escalas temporales finas que permitan la estimación y simulación de crecidas instantáneas relevantes para el diseño hidrológico de puentes.
- En Chile existen importantes carencias respecto del conocimiento del clima de oleaje, parámetro fundamental para el diseño de obras marítimas. Las observaciones directas del oleaje son escasas, no existiendo en la actualidad una red de boyas estable de operación continua en el tiempo. Es altamente recomendable que el país avance hacia el establecimiento de un sistema formal de observación de climas de oleaje a lo largo de la costa, el que debiera cubrir necesidades de distintos actores (puertos, caletas, pesca artesanal, turismo, actividades recreativas, etc.) y recoger información valiosa para la planificación de infraestructura futura y/o la definición de acciones de adaptación. Del mismo modo, es posible hoy en día desplegar sistemas de observación de la costa de bajo costo operativo, como lo son los sistemas de video, para llevar adelante un monitero continuo de la evolución de sistemas costeros (playas, desembocaduras, humedales, etc.) y los efectos que intervenciones antrópicas pudieran producir en ellos (seguimiento del impacto de obras o políticas, por ejemplo). El establecer una red de observación al nivel de las que existen en otros países de la OECD (por ejemplo, EE.UU., España, Japón) requiere de un esfuerzo importante de planificación y coordinación, puesto que deberá desarrollarse en horizontes de tiempo largos y contar con presupuestos para su inversión y operación. Además requerirá el trabajo conjunto de al menos el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y la Dirección de Obras Portuarias (DOP), los que debieran establecer un plan de desarrollo estratégico que abarque el problema de la observación de la costa desde un enfoque multiriesgo (amenazas de tsunami, marejadas) y multiusuario (puertos, pesca artesanal, turismo, actividades recreativas).

Por otra parte, es necesario también desarrollar un proceso de monitoreo del estado de las diferentes obras de infraestructura del MOP. De esta manera se podría asimismo avanzar en el entendimiento de la vulnerabilidad (una cualidad dinámica) de estas obras en diferentes escenarios climáticos

actuales y futuros. Este monitoreo se podría desplegar a través de un catastro de obras existentes y futuras que incluya aspectos relevantes como: 1) su diseño y especificaciones técnicas de construcción, operación y mantención; y (2) su historial de operación y conservación, particularmente frente a eventos hidrometeorológicos extremos, los que deben ser debidamente caracterizados. Un catastro de este tipo permite entre otras cosas identificar aquellas obras más vulnerables frente a eventos hidrometeorológicos, y validar el diseño y construcción según la vida útil considerada y el nivel de riesgo adoptado. Esto último entrega una mayor claridad con respecto a la validez de supuestos, enfoques y metodologías considerados en el diseño hidrológico e hidráulico.

Avanzar en el desarrollo de metodologías específicas para poder incorporar el cambio climático en la planificación de infraestructura

Como se describiera anteriormente, no se incluyen en la actualidad metodologías para incorporar el cambio climático en los procesos formales de planificación de obras de infraestructura. Iniciar este desarrollo metodológico requiere trabajar en diferentes niveles jerárquicos del proceso de planificación.

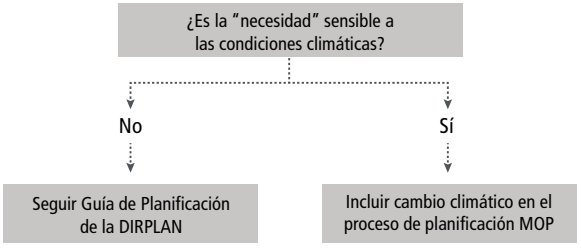
Primero es imprescindible reconocer que no precisamente todas las necesidades de infraestructura son sensibles a las condiciones climáticas. Bajo este contexto se propone como punto de partida responder una primera interrogante: ¿es la "necesidad" sensible a las condiciones climáticas? Si la respuesta es afirmativa, entonces el proceso de planificación debe considerar el cambio climático; en caso contrario, se debe planificar siguiendo la guía actual.

En el caso de una respuesta afirmativa, se debe identificar en qué etapas del proceso de planificación se debe considerar el cambio climático. En la Figura 5.5 se presenta el proceso de planificación actual del MOP y se identifican aquellas etapas que debieran considerar el cambio climático y las posibilidades de adaptación a este.

En el proceso de planificación se considera prioritario incorporar las proyecciones de cambio climático en la etapa de diagnóstico. Más específicamente, se contempla integrar el cambio climático en la etapa de análisis territorial y de análisis del recurso hídrico. En esta etapa se levanta un

Figura 5.4

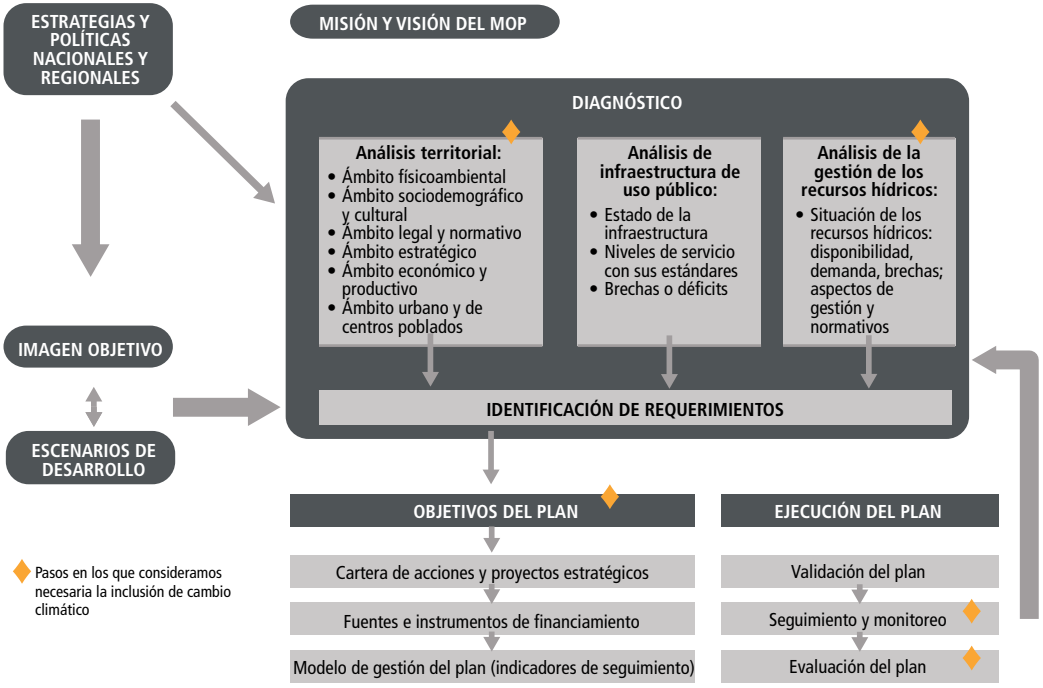
Primera etapa metodológica para decidir la inclusión del cambio climático en el proceso de planificación de obra de infraestructura



Fuente: CCG-UC (2012).

Figura 5.5

Proceso de planificación MOP



Fuente: Elaboración propia.

diagnóstico de los diversos ámbitos del territorio, basado en datos históricos. A este diagnóstico se deben agregar las proyecciones climáticas, de manera de diagnosticar las vulnerabilidades frente a las proyecciones de cambio climático. De manera similar, el diagnóstico de los recursos hídricos debe fundamentarse en los datos de las hidrologías históricas, pero tiene que contemplar las proyecciones hídricas frente a los escenarios de cambio climático. Dichas proyecciones se han realizado para diversas cuencas de Chile. Resulta necesario desarrollar un catastro en conjunto con la DGA y el Ministerio de Medio Ambiente de las cuencas que cuentan ya con esta información, para poder de esta manera priorizar el desarrollo futuro en relación a las necesidades de los procesos de diagnóstico.

A su vez, en la etapa de formulación de los objetivos del plan se debe explicitar la adaptación al cambio climático y la reducción de la vulnerabilidad a eventos extremos frente a los posibles escenarios de cambio climático. El plan actual considera como objetivo cerrar las brechas entre las necesidades levantadas por la región y las disponibilidades de infraestructura. Puede no ser necesario cerrar estas brechas como puede ser posible que aumenten frente al cambio climático. Además, es probable que en la actualidad no se visualicen necesidades de adaptación al cambio climático.

Por último, se sugiere incorporar el cambio climático en los procesos de seguimiento y monitoreo. Establecer indicadores relacionados con el cambio climático y la hidrología permitirá evaluar el plan y así dilucidar las necesidades de adaptación o modificación de los planes frente a la información relevada, que reducirá las incertidumbres identificadas hasta la fecha.

En la medida en que se avance en el proceso de planificación de obras específicas es posible incorporar metodologías puntuales que sirvan para evaluar la necesidad y/o el comportamiento de obras de infraestructura frente a escenarios de cambio climático. En el capítulo 4 de este libro se presentaron propuestas iniciales para el desarrollo de estas metodologías específicas. Es importante que en el contexto de la discusión interministerial presentada anteriormente en el marco de esta estrategia se incluya la discusión de estas metodologías para evaluar la pertinencia de su potencial incorporación dentro del conjunto de metodologías ya existentes en el proceso. En esta discusión es importante reconocer algunas de las limitantes o brechas principales que deben ser abordadas para la correcta implementación de las metodologías propuestas.

En todos los casos expuestos existe una importante limitación, que se asocia a la incertidumbre respecto a los escenarios climáticos futuros. Se presentan en las propuestas metodológicas algunas maneras para poder trabajar con estas incertidumbres. Existen, por otra parte, limitaciones o desafíos específicos para distintas obras.

En el caso de la planificación de embalses de riego, el principal desafío es contar con modelos hidrológicos y de recursos hídricos que permitan simular diferentes condiciones climáticas y su efecto tanto en la oferta como en la demanda de agua. Dependiendo de la complejidad de la cuenca, el desarrollo de estos modelos puede ser un obstáculo importante en el desarrollo de esa metodología específica.

En el caso de los puentes (y en extensión a otros componentes de la infraestructura vial), se hace necesario abordar las siguientes brechas metodológicas:

- Es fundamental adoptar una nueva generación de modelos hidrológicos que permitan abordar tres problemas recurrentes asociados a la simulación de eventos futuros en el mediano y largo plazo, relevantes para el diseño de obras viales: 1) condiciones hidrometeorológicas y de uso de suelo variables e inciertas; 2) carencia de datos; y 3) comportamiento

integrado de la cuenca aportante a la zona de interés para el diseño. Estos modelos se caracterizan por su capacidad para simular registros hidrometeorológicos continuos, así como también condiciones variables de la cuenca, lo que permite evaluar diversos escenarios futuros para distintas variables (por ejemplo, uso de suelo, precipitaciones, temperaturas, etc.) y la interacción entre estas. Son modelos de fuerte base física, de manera que la escasez de datos se compensa con una modelación centrada en los procesos físicos que toman lugar, por sobre relaciones empíricas o caracterizaciones estadísticas de difícil aplicación. Por lo tanto, estos modelos deben representar, simular e integrar los distintos procesos relevantes en la cuenca, facilitando la identificación de potenciales impactos que pueda sufrir la obra, así como la concepción y el diseño de acciones de adaptación y mitigación.

- El transporte de sedimento y los procesos de erosión y sedimentación en los cauces son de extrema relevancia en el diseño y operación de puentes. Por lo tanto, las actividades futuras que puedan afectar estos procesos y la composición del lecho de ríos, deben ser ejecutadas de modo tal de no poner en riesgo la infraestructura vial diseñada bajo ciertas condiciones específicas en lo referido a la granulometría y condiciones de transporte de sedimentos.

Finalmente es ineludible, en horizontes largos de planificación, comprender los efectos indirectos del cambio climático sobre la infraestructura vial. Si bien las principales brechas previamente descritas se refieren al efecto directo de condiciones hidrometeorológicas inciertas relativas a crecidas e inundaciones que pueden afectar la infraestructura vial, puede ser necesario tener en cuenta otro tipo de efectos que afectarían en algún grado el diseño de esta infraestructura. Un ejemplo de esto sería un cambio importante en las cargas de tráfico de diseño que se podrían originar frente a cambios socioeconómicos, producto del cambio climático. El crecimiento poblacional y/o el aumento de sectores económicos no planeados al corto plazo pueden volver obsoleto el diseño de puentes, particularmente los localizados en zonas no densamente pobladas o activas económicamente en la actualidad o en el corto plazo.

En el caso de los puertos y la gestión del borde costero en general, es importante mencionar los siguientes elementos en la discusión de brechas:

- Avanzar en la incorporación de la incertidumbre asociada a las forzantes climáticas en el proceso de planificación y diseño. Esto implica desarrollar y acordar metodologías de análisis de base no estacionarias que deben estar condicionadas por la escasez de información histórica disponible. En el caso

de los puertos, los horizontes de evaluación habitualmente considerados justifican ampliamente la aplicación de este tipo de metodologías, pero se hace necesario definir un marco mínimo de trabajo para regular su aplicación (base de datos de reanálisis de climas de oleaje y sus proyecciones futuras, niveles de resolución mínima para datos topobatimétricos, herramientas de modelación multiescala y downscaling, entre otros).

La adaptación al cambio climático requiere de cambios importantes en los procesos de monitoreo, evaluación de impactos y gestión del riesgo, aspectos necesarios para la correcta planificación de la infraestructura pública. Uno de los principales retos a la hora de integrar estos cambios se encuentra en la integración de los diferentes tipos de información, conocimientos y experiencias, y en el desarrollo de proyectos de colaboración con la participación de científicos, profesionales, autoridades y comunidades. A través de lo expuesto en este libro, investigadores de diferentes instituciones, liderados por el Centro de Cambio Global y el Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales de la Pontificia Universidad Católica de Chile, han entregado una propuesta que debería ayudar a iniciar este recorrido.

Referencias bibliográficas

Acuña, H., Monárdez, P. (2007). Evaluación del potencial de la energía del oleaje en Chile. XVII Congreso Chileno de Hidráulica. Disponible en http://www.sochid.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=136:congreso200729&catid=39&Itemid=57 pp16 [noviembre, 2011].

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., Palutikof, J. P., eds. (2008). IPCC 2008. *El cambio climático y el agua*. El cambio climático y los recursos hídricos, por sistemas y sectores. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra: Secretaría del IPCC.

BID y CEPAL (2011). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: dinámicas, tendencias y variabilidad climática.

Bindoff, N. L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y., Shum, C. K., Talley, L. D., Unnikrishnan, A. (2007). Observations: Oceanic climate change and sea level. En Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L., eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom; New York, NY: Cambridge University Press.

Bonelli, S., Vicuña., S., Meza, F. J., Gironás, J., Barton, J. (2013). Climate change and water conflicts in snow dominated basins: The case of central Chile. Part 2: Incorporating climate change adaptation strategies in urban water supply planning. *Journal of Water and Climate Change*. En revisión.

Boorman, P., Jenkins, G., Murphy, J. (2010). Future changes in fog frequency form the UKCP09 ensemble of regional climate model projections. UK Climate projections.

Borgerson, S. G. (2008). Arctic meltdown: The economic and security implications of global warming. *Foreign Affairs* 87, 63-77.

Brunet, S., De la Llera, J. C., Jacobsen, A., Miranda, E., Meza, C. (2012). Performance of port facilities in Southern Chile during the 27 February 2010 Maule earthquake. *Earthquake Spectra* 28, 5553-5579.

Brooks, R. H., Corey, A. T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Fort Collins, CO: Colorado State University.

Camus, P., Méndez, F. J., Medina, R., Cofiño, A. S. (2011a). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering* 58(6), 453-462.

Camus, P., Méndez, F. J., Medina, R. (2011b). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering* 58(9), 851-862.

Camus, P., Méndez, F. J., Medina, R., Tomás, A., Izaguirre, C. (2013). High resolution Downscaled Ocean Waves (DOW) reanalisis in coastal areas. *Coastal Engineering* 72, 56-68. Doi:10.1016/j.coastaleng.2012.09.002.

CCG-UC (2012). *Enfoque metodológico para evaluar la adaptación al cambio climático en la infraestructura pública del MOP*. Estudio desarrollado para la Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio (SEMAT) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Santiago: SEMAT.

Church, J. A., White, N. J., Hunter, J. R. (2006). Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands. *Global and Planetary Change* 53, 155-168. Doi:10.1016/j.gloplacha.2006.04.001.

Church, J. A., White, N. J. (2011). Sea-Level rise from the late 19th to the early 21st Century. *Surv Geophys* 32(4-5), 585-602. Doi:10.1007/s10712-011-9119-1.

CEPAL (2009). *La economía del cambio climático en Chile*. Informe de síntesis. Santiago: CEPAL.

_____ (2011). Dinámicas, tendencias y variabilidad climática. Documento 1 de la serie Efectos del Cambio Climático en la Costa de América Latina y el Caribe. Santiago: CEPAL-ONU.

_____ (2012). *La economía del cambio climático en Chile*. Santiago: CEPAL.

Contreras, M., Winckler, P., Molina, M. (2012). Implicancias de la variación del nivel medio del mar por cambio climático en obras de ingeniería costera de Chile. *Anales del Instituto de Ingenieros*, 124(2), 54-66.

CNR (Comisión Nacional de Riego) (2011). Manual para el Desarollo de Grandes Obras de Riego. Disponible en http://www.cnr.cl/DivisionDeEstudios/Documents/Manual%20para%20el%20desarrollo%20de%20grandes%20obras%20de%20riego%20version%2014%20Abril%202011.pdf

Demaria, E. M. C., Nijssen, B., Wagener, T. (2007). Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the Variable Infiltration Capacity model. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 112(D11). Doi:10.1029/2006JD007534.

Demaria, E. M. C., Maurer, E. P., Sheffield, J., Bustos, E., Poblete, D., Vicuña, S., Meza, F. (2013). Using a gridded global data set to characterize regional hydroclimate in central Chile. *Journal of Hydrometeorology* 14(1), 251-265. Doi:10.1175/JHM-D-12-047.1.

DGA (Dirección General de Aguas) (2001). Perfiles ecológicos de las cuencas de los ríos Lluta, San José, Huasco, Elqui, Limarí, Petorca, La Ligua, Mataquito, Itata, Imperial y del Lago Budi. Santiago: MOP.

_____ (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.

Cuenca Río Mataquito. Preparado por CADE-IDEPE consultores en Ingeniería. Santiago: MOP.

_____ (2008). Informe técnico: Análisis crecida río Mataquito y tributarios 22 y 23 de mayo de 2008. Santiago: DGA, MOP.

_____ (2010). Determinación de los umbrales de alerta de caudales, lluvias y temperaturas del sistema de transmisión de datos de la DGA. Santiago: DGA, MOP.

DIRPLAN (Dirección de Planeamiento del Ministerio de Obras Públicas), MOP (Ministerio de Obras Públicas) (2011). Guía para la elaboración de planes. Santiago: MOP. Disponible en http://www.dirplan.cl/centrodedocumentacion/Documents/Metodologia/Guia_Elaboracion_Planes_marzo_2011.pdf

Emigh, J. (2005). Hurricane Katrina: lessons learned. CIO Insight. 13 September 2005. Disponible en www.cioinsight.com/c/a/Trends/Hurricane-Katrina-Lessons-Learned/ [octubre, 2010].

Falvey, M., Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *J. Geophys. Res*. 114. Doi:10.1029/2008JD010519.

Fankhauser, S., Smith, J. B., Tol, R. S. J. (1999). Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions. *Ecological Economics* 30, 67-78.

Fattorelli, S., Fernández, P. (2007). *Diseño hidrológico*. Mendoza: Zeta Editores.

Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., Dokken, D. J., Ebi, K. L., Midgley, P. M. (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, y Nueva York, NY: Cambridge University Press.

Gaythwaite, J. G. (2004). *Design of marine facilities for the berthing, mooring, and repair of vessels*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers. ASCE Press.

Grenzeback, L. R., Lukmann, A. T. (2007). Case study of the transportation sector's response to and recovery from hurricanes Katrina and Rita. En TBR Special Report 290: "The Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation". Committee on Climate Change and U.S. Transportation. Washington, DC: Transportation Research Board.

Grinsted, A., Moore, J. C., Jevrejeva, S. (2009). Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD. *Clim. Dyn*. Doi:10.1007/s00382-008-0507-2.

Guanche, R., Losada, I. J., Lara, J. L. (2009). Numerical modelling of coastal structures stability. *Coastal Engineering* 56(5-6), 543-558. Doi:10.1016/j.coastaleng.2008.11.003.

Gulev, S. K., Grigorieva, V. (2004). Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data. *Geophys Res. Lett.* 31, L24302.

Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change* 19, 240-247. Doi:10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003.

Haugen, J. E., Iversen, T. (2008). Response in extremes of daily precipitation and wind from a downscaled multi-model ensemble of anthropogenic global climate change scenarios. *Tellus* 60, 411-426.

Hemer, M. A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., Wang, X. L. (2013). Projected changes in wave climate from

a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*. Doi:10.1038/nclimate1791.

Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. New York: Cambridge University Press.

Hurkmans, R., Terink, W., Uijlenhoet, R., Tores, P., Jacob, D., Troch, P.A. (2010). Changes in streamflow dynamics in the Rhine basin under three high-resolution regional climate scenarios. *Journal of Climate* 23(3), 679-699.

IFC (International Finance Corporation) (2011). Climate Risk and Business. Ports. Terminal Marítimo Muelles El Bosque. Cartagena, Colombia. Washington DC: World Bank Group.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas) (2007). VII Censo Agropecuario y Forestal. Santiago: INE.

_____ (2012). Resultados Preliminares Censo de Población y Vivienda 2012. Santiago: INE.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Pachauri, R. K. y Reisinger, A. (eds.). Ginebra: IPCC.

Izaguirre, C., Méndez, F. J., Menendez, M., Losada, I. J. (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data. *Geophysical Research Letters* 38(L10607). Doi:10.1029/2011GL047302.

Izaguirre, C., Méndez, J. F., Espejo, A., Losada, I. J., Reguero, B. G. (2013). Extreme wave climate changes in Central-South America. *Climatic Change*. Doi:10.1007/s10584-013-0712-9.

Jaramillo, E., Manzano, M., Morales, G., Velázquez, C. (2012). Interacción entre defensas costeras artificiales en playas arenosas y perturbaciones naturales de gran escala: El terremoto del 27F de 2010 en la costa centro-sur de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 53, 75-84.

Lara, J. L., Losada, I. J., Guanche, R. (2008). Wave interaction with low mound breakwaters using a RANS model. *Ocean Engineering* 35(13), 1388-1400. Doi:10.1016/j.oceaneng.2008.05.006.

Lemmen, D. S., Warren, F. J., Lacroix, J., and Bush, E., eds. (2008). *From impacts to adaptation: Canada in a changing climate 2007*. Ottawa: Government of Canada.

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general-circulation models. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 99(D7), 14415-14428.

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F. (1996). One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 101(D16), 21403-21422.

Lohmann, D., Raschke, E., Nijssen, B., Lettenmaier, D. P. (1998). Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques* 43(1), 131-141.

Losada, I. J., Liu, P. L. F. (2000). Modelos matemáticos y numéricos para el estudio de la agitación portuaria. *Estudios e Investigaciones Marinas* 1, 47-67.

Losada, I. J., Lara, J. L., Guanche, R., Gonzalez-Ondina, J. M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering* 55(1), 47-62. Doi:10.1016/j.coastaleng.2007.06.003.

Losada, I. J., Reguero, B. G., Méndez, F. J., Castanedo, S., Abascal, A. J., Mínguez, R. (2013). Long-term changes in sea-level components in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change*. Doi:10.1016/j.gloplacha.2013.02.006.

Lozano, G., García, P., Monsalve, E. (2010). Criterios y consideraciones en estudios de viabilidad de embalses. *Rev. Invest. Univ. Quindío* 21, 9-20.

Maletta, Héctor (2011). El pan del futuro: cambio climático, agricultura y alimentación en América Latina. *Debates en Sociología* 34, 117-176.

Maurer, E. P., Adam, J. C., Wood, A. W. (2009). Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13(2), 183-194.

McCuen, R. H., Beighley, R. E. (2003). Seasonal flow frequency analysis. *Journal of Hydrology* 279(1-4), 43-56.

Meehl, G. A., Stocker, T. F., Collins, W. D., Friedlingstein, P., Gaye, A. T., Gregory, J. M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J. M., Noda, A., Raper, S. C. B., Watterson, I. G., Weaver, A. J., Zhao, Z. C. (2007). Global climate projections. En *Climate Change 2007: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom; New York, NY: Cambridge University Press.

Meehl, G. A., Hu, A., Tebaldi, C., Arblaster, J. M. Washington, W. M. Teng, H., Sanderson, B., Ault, T., Strand, W.G., White, J. B. III (2012). Relative outcomes of climate change mitigation related to global temperature versus sea level rise. *Nature Climate Change* 2, 576-580. Doi:10.1038/nclimate1529.

Menéndez, M., Méndez, F. J., Izaguirre, C., Luceño, A., Losada, I. J. (2009). The influence of seasonality on estimating return values of significant wave height. *Coastal Engineering* 56, 211-219.

Menéndez, M., Woodworth, P. L. (2010). Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set. *Journal of Geophysical Research* 115(C10), C10011.

Meza, F. J., Wilks, D. S., Gurovich, L., Bambach, N. (2012). Impacts of climate change on irrigated agriculture in the Maipo basin, Chile: Reliability of water rights and changes in the demand for irrigation. *Journal of Water Resources Planning and Management* 138(5), 421-430.

Meza, F. J. (2013). Recent trends and ENSO influences on droughts in Northern Chile: An application of the Standard Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climate Extremes*.

Meza, F. J., Vicuña, S., Jelinek, M., Bustos, E., Bonelli, S. (2013). Climate change and water conflicts in snow dominated basins: The case of central Chile. Part 1: Assessing sensitivity of water demands and coverage in the urban and rural sectors. *Journal of Water and Climate Change*. En revisión.

Milly, P. C., Betancourt, D. J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., Stouffer, R. J. (2008). Stationarity is dead: Whither water management. *Science* 319, 573-574.

Ministry for the Environment (2008). *Climate change effects and impacts assessment: A guidance manual for local government in New Zealand*. New Zealand: Ministry for the Environment.

_____ (2010). *Tools for estimating the effects of climate change on flood flow: A guidance manual for local government in New Zealand*. New Zealand: Ministry for the Environment.

Mitchell, T. D., Jones, P. D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate

observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25(4), 693-712.

Molina, M., Contreras, M., Winckler, P., Salinas, S., Reyes, M. (2011). Consideraciones sobre las variaciones de mediano y largo plazo del oleaje en el diseño de obras marítimas en Chile Central. *Anales del Instituto de Ingenieros* 123(3), 77-88.

MOP (Ministerio de Obras Públicas) (2010). Plan Director de Infraestructura 2010-2025. Santiago: MOP.

_____ (2012). Manual de Carreteras. Santiago: Dirección de Vialidad, MOP.

_____ (2013). Programa de Modernización y Proceso de Planificación Integrada Ministerial, Jornadas Descentralización y Gasto Público. Santiago: MOP. Disponible en http://www.pmgdescentralizacion.gov.cl/presentaciones/2012/18062012/J2_MOP%20Panel%20Infraestructura.pdf

Mortimer, M., Walker, J. (2007). *Climate change and infrastructure engineering: Moving towards a new curriculum*. Canadian Standards Association.

Nicholls R. J. (2011). Planning for the impacts of sea level rise. *Oceanography* 24(2), 144-157.

Nijssen, B., Lettenmaier, D. P., Liang, X., Wetzel, S. W., Wood, E. F. (1997). Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resources Research* 33(4), 711-724.

Nijssen, B., O'Donnell, G. M., Hamlet, A. F., Lettenmaier, D. P. (2001a). Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Climatic Change* 50(1-2), 143-175.

Nijssen, B., O'Donnell, G. M., Lettenmaier, D. P., Lohmann, D., Wood, E. F. (2001b). Predicting the discharge of global rivers. *Journal of Climate* 14(15), 3307-3323.

Nijssen, B., Schnur, R., Lettenmaier, D. P. (2001c). Global retrospective estimation of soil moisture using the variable infiltration capacity land surface model, 1980-93. *Journal of Climate* 14(8), 1790-1808.

O'Brien, K., Eriksen, S., Nygaard, L. P., Schjolden, A. (2007). Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Climate Policy* 7(1), 73-88.

Pachauri, R. K., Reisinger, A., eds. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra: IPCC.

Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., Hanson, C. E. (2007). *IPCC, 2007: 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: Cambridge University Press.

PIANC (The World Association for Waterborne Transport Infrastructure) (2010). Waterborne transport, ports and waterways: A review of climate change drivers, impacts, responses and mitigation. EnviCom - A Report for Task Group 3: Climate Change and Navigation. Bruselas: PIANC General Secretariat.

Pinnegar, J. K., Engelhard, G. H. (2008). The shifting baseline phenomenon: a global perspective. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 18(1), 1-16.

Port World (2007). Australian Port Congestion Burns Coal Companies. 11 July 2007. Disponible en www.portworld.com/news/i68425/Australian_port_congestion_burns_coal_companies [mayo 2010].

Racherla, P. N., Shindell, D. T., Faluvegi, G. S. (2012). The added value to global model projections of climate change by dynamical downscaling: A case study over the continental US using the GISS-ModelE2 and WRF models. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 117. Doi: 10.1029/2012jd018091.

Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315(5810), 368-370. Doi:10.1126/science.1135456.

Reguero, B. G., Méndez, F. J., Losada, I. J. (2013). Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. *Global and Planetary Change* 100, 70-84. Doi:10.1016/j.gloplacha.2012.09.005.

Reséndiz, D. (2008). *El rompecabezas de la ingeniería. Por qué y cómo se transforma el mundo*. México DF: Fondo de Cultura Económica.

Reuters (2007). Europe's '2020 vision' to lead climate change battle. *New Scientist Environment*. Disponible en http://environment.newscientist.com/channel/earth/climate-change/dn11343-europes-2020-vision-to-lead-climate-change-battle.html [marzo, 2007].

Rogelj, J., Meinshausen, M., Knutti, R. (2012). Global warming under old an new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change* 2(4), 248-253.

Rogers, P. (1997). Engineering design and uncertainties related to climate change. *Climatic Change* 37, 229-242.

ROM 2.0 (2011). Recomendaciones para el proyecto y ejecución en obras de atraque y amarre. Tomo I, Tomo II. Recomendaciones Obras Marítimas. Puertos del Estado, Ministerio de Fomento, Gobierno de España. Disponible en http://www.puertos.es/es/programa_rom

RSSB (Rail Safety and Standards Board) (2003). Safety implications of weather, climate and climate change. Londres: AEA Technology, RSSB Research Programme: Engineering.

Sheffield, J., Goteti, G., Wood, E. F. (2006). Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate* 19(13), 3088-3111.

Simonetti, J. A., Montenegro, G. (1996). Conservación y uso de la biodiversidad de la zona árida y semiárida de Chile. Santiago: FAO.

Stedinger, J. R., Griffis, V. W. (2011). Getting from here to where? Flood frequency analysis and climate. *Journal of the American Water Resources Association* 47, 506-513.

Su, F., Hong, Y., Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology* 9(4), 622-640.

Subsecretaría de Transportes (2012). Desarrollo de un modelo de demanda-capacidad portuaria de la V Región. Estudio solicitado por la Subsecretaría de Transportes. Santiago: GreenLabUC, Gestión y Política Ambiental, DICTUC S.A.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 93(4), 485-498.

Thomalla, F., Downing, T., Spanger-Siegfried, E., Han, G., Rockström, J. (2006). Reducing hazard vulnerability: towards a common approach

between disaster risk reduction and climate adaptation. *Disasters* 30(1), 39-48.

Tolman, H. L., Balasubramaniyan, B., Burroughs, L. D., Chalikov, D. V., Chao, Y. Y., Chen, H. S., Gerald, V. M. (2002). Development and implementation of wind generated ocean surface wave models at NCEP. *Weather and Forecasting* 17, 311-333.

Trenberth, K. E., Caron, J. M. (2000). The Southern Oscillation Revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation. *Journal of Climate* 13, 4358-4365.

Trenberth, K. E., Jones, P. D. (2007). Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. En Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L., eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom; New York, NY: Cambridge University Press.

U.S. Congress, Office of Technology Assessment (1993). *Preparing for an uncertain climate*, Vol. 1, OTA-O-567. Washington DC: Government Printing Office.

USCCSP (US Climate Change Science Program) (2008). Impacts of climate change and variability on transportation systems and infrastructure: Gulf coast study I, Phase 1. *Synthesis and Assessment Product 4.7*. Washington DC: Department of Transportation.

_____ (2009). Coastal sensitivity to sea level rise: A focus on the Mid-Atlantic Region. *Synthesis and Assessment Product* 4.1. Washington DC: Department of Transportation.

USEPA (US Environmental Protection Agency) (2008). Planning for climate change impacts at U.S. ports. White Paper. Fairfax.

USGCRP (United States Global Change Research Program) (2009). *Transportation Chapter in Global Climate Change Impacts in the United States*. Karl, T. R., Melillo, J., M., Peterson, T. C. eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 61-70.

USTRB (US Transportation Research Board) (2008). Potential impacts of climate change on U.S. transportation. Committee on Climate Change and U.S. Transportation. *Transportation Research Board Special Report* 290.

Vargas, G., Farías, M., Carretier, S., Tassara, A., Baize, S., Melnick, D. (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw 8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology* 38, 219-238.

Vermeer, M., Rahmstorf, S. (2009). Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(51), 21527-21532.

Vicuña, S., Garreaud, R., McPhee, J. (2011). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*. Doi:10.1007/s10584-010-9888-4.

Vicuña, S., Meza, F. J. (2013). Los nuevos desafíos para la gestión de los recursos hídricos en Chile en el marco del cambio global. *Temas de la Agenda 55*. Centro de Políticas Públicas. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.

Vicuña, S., Gironás, J., Meza, F. J., Cruzat, M. L., Jelinek, M., Bustos, E., Poblete, D., Bambach, N. (2013). Exploring possible connections between hydrologic extreme events and climate change in central south Chile. *Hydrolog. Sci. J*. En prensa.

Villagrán, M., Cienfuegos, R., Catalán, P. A., Almar R. (2013). Morphological response of Central Chile sandy bea-ches to the 8.8Mw 2010 earthquake and tsunami. *Proceedings of Coastal Dynamics*. En prensa.

Vogel, R. M., Yaindl, C., Walter, M. (2011). Nonstationarity: Flood magnification and recurrence reduction factors in the United States. *Journal of the American Water Resources Association* 47(3), 464-474.

Wang, X. L., Swail, V. R. (2001). Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *J Clim* 14, 2204-2221.

Willows, R. I., Connell, R. K., eds. (2003). *Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making*. UK Climate Impact Programme Technical Report. Oxford: UKCIP.

Wood, A. W., Maurer, E. P., Kumar, A., Lettenmaier, D. P. (2002). Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 107(D20). Doi:10.1029/2001jd000659.

Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V., Lettenmaier, D. P. (2004). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change* 62(1-3), 189-216.

Wright, P. (2007). Marine Climate Change Impact Partnership Annual Report Card 2007-2008 Review: Shipping. London. Disponible en www.mccip.org.uk/arc/2007/PDF/Shipping.pdf [mayo, 2010].

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A. (2005). WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model. Part 1, Model characteristics. *Water International* 30(4), 501-512.

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K. Peterson, T. C., Trewin, B., Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change* 2(6), 801-827.