
RESUMEN EJECUTIVO

Proyecto: "Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI"

El llamado de CONAMA para ejecutar la temática de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI incluye esencialmente dos partes: el análisis del clima observado durante la parte final del siglo XX y su proyección hacia fines del presente siglo.

La importancia de la primera parte, que ha sido objeto de variados análisis durante los últimos años, radica en que define el escenario a partir del cual evolucionará el clima del futuro y establece las variaciones que se encuentran en marcha. Por tanto, en ella el elemento más relevante está representado por las actuales tendencias climáticas, en tanto que su condición media tiene utilidad para validar los resultados de los modelos numéricos que se usarán en la segunda parte del estudio, ya que un primer requisito de tales modelos es la calidad con que son capaces de simular el clima actual. Las dos partes que constituyen el proyecto difieren profundamente en el grado de incertidumbre de sus resultados. La primera, basada en observaciones, da lugar a resultados que pueden adolecer incertezas modestas en razón de observaciones defectuosas o incompletas, pero la segunda, que se aventura en un futuro que sólo puede ser atisbado haciendo suposiciones importantes en cuanto al desarrollo socio-económico global, tiene sólo un carácter tentativo. Aún así, la metodología seguida en este estudio representa el estado del arte para la evaluación de impactos asociados al cambio climático originado en la intensificación del efecto invernadero por causas de origen antrópico.

El sistema climático, con sus componentes atmosférica, oceánica y terrestre, es extremadamente complejo y para el objetivo perseguido se le simplifica incluyendo las componentes que tiene respuesta dentro del plazo de predicción, que en este caso es del orden de una centuria (atmósfera y océanos). Adicionalmente, las variables de mayor interés en el estudio de impactos son aquellas que afectan los primeros metros sobre la superficie, en particular las temperaturas, vientos y precipitación, relegando a un segundo plano los niveles más altos de la atmósfera.

El objetivo principal de los Términos de Referencia del llamado a licitación de CONAMA fue la estimación de escenarios climáticos para diferentes regiones de Chile durante el siglo XXI, concretamente en el periodo 2071-2100, asociados a un cambio climático global resultante de un incremento sostenido de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, junto a este objetivo se solicitaron otros aspectos como una evaluación de datos climáticos observados en décadas recientes, estimaciones de los cambios climáticos en períodos intermedios dentro del siglo XXI y estimaciones para los cambios en el nivel del mar.

Alrededor de una decena de modelos numéricos de circulación general de la atmósfera y de los océanos han sido desarrollados y aplicados con el propósito de evaluar los cambios climáticos a nivel global y su información ha sido puesta a disposición de la comunidad internacional. Todos ellos están basados en una formulación matemática de las leyes físicas y procesos fundamentales que gobiernan el comportamiento del sistema climático terrestre, la que integrada a partir de un estado inicial y forzada por la radiación solar dan lugar a variaciones similares a las observadas en el clima. Sin embargo, la mayor desventaja de los

modelos globales deriva de una baja resolución espacial (centenas de kilómetros) que al momento de ser utilizados para análisis de impacto resulta ser muy pobre, particularmente en el caso de regiones costeras o con importantes variaciones de relieve, como es el caso de Chile donde a la presencia de las Cordilleras de la Costa y de los Andes se une el escaso desarrollo W-E del territorio nacional que resulta similar a la resolución actual de los modelos globales.

Para derivar información con mayor detalle espacial se recurre a Modelos Regionales en los cuales el dominio de cálculo cubre sólo una parte del globo que puede ser descrita con mejor resolución (50, 25 km o menos). La compatibilidad con el modelo global se logra imponiendo la evolución de éste en las paredes laterales de la región. En este trabajo se usó el modelo regional PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies), desarrollado por la Oficina Meteorológica del Reino Unido. La resolución espacial usada fue de 25 km, cubriendo todo el territorio continental de Chile, tal resolución es la máxima obtenible, con este modelo que no acepta más que un anidamiento.

Adicionalmente, se solicitó realizar el estudio para dos escenarios de emisiones incluidos en el último informe del IPCC, uno moderado (SRES B2) y otro severo (SRES A2). Ello significó hacer dos modelamientos regionales para el período de 30 años de la proyección principal solicitada (2071-2100), aparte de un modelamiento regional de 30 años para el clima actual (1961-1990) respecto del cual se evaluaron los cambios en superficie que se asocian a cada escenario.

1. Tendencias climáticas observadas.

Las precipitaciones medidas entre los años 1930 y 2000 han sido usadas para evaluar los cambios en la tendencia lineal de la precipitación anual mediante períodos móviles de 30 años entre 1930 y 2000. En la región entre 30°S y 39°S se aprecia el predominio de una tendencia negativa hasta aproximadamente 1970. El aumento de la frecuencia de inviernos relativamente lluviosos en las décadas posteriores contribuyó a revertir la tendencia decreciente en esta región, estableciéndose una tendencia positiva que alcanzó su mayor intensidad en el período 1955 – 1985. La evolución del régimen pluviométrico en la región centro-sur y austral del país ha sido marcadamente diferente a la observada en la región subtropical con una significativa tendencia positiva dominante en esta región hasta mediados de los años 70 para dar paso en las décadas más recientes a una tendencia decreciente que se ha mantenido hasta ahora.

Estudios de los cambios en la temperatura media a nivel de superficie a lo largo de la costa extratropical de Sudamérica realizados durante la década de 1990 (Aceituno et al., 1992; Rosenbluth et al., 1997), mostraron que a partir de la década de 1940 o 1950 estuvo caracterizado por un régimen térmico relativamente estacionario con excepción de la región centro-sur donde se observó un marcado descenso de la temperatura media. Esta situación fue interrumpida por un aumento relativamente abrupto a mediados de la década de 1970. Un análisis de las tendencias en los regímenes de temperaturas extremas diaria (máxima - mínima) en el periodo a partir de 1960 sugieren que el régimen térmico superficial se ha mantenido relativamente estacionario durante las décadas más recientes, con excepción de la región comprendida entre Santiago y Concepción donde se aprecian aumentos de

+0.05°C/década y de +0.18°C/década en los promedios anuales de temperatura máxima y mínima, respectivamente. Sin embargo, al considerar separadamente la evolución de la temperatura mínima durante los periodos 1961-76 y 1977-2004 las tendencias resultantes son mayoritariamente negativas.

2. Validación del modelo forzante global

El modelo de gran escala con que se fuerzan indirectamente las simulaciones regionales es el modelo HadCM3 (Hadley Center Climate Model, version 3) que es un modelo acoplado de atmósfera y océano. La componente atmosférica del HadCM3 tiene 19 niveles en la vertical y una resolución que corresponde a aproximadamente 417 x 278 km en el ecuador y que se reduce a 295 x 278 km a 45 grados de latitud. Las salidas de este modelo son usadas para forzar en superficie un modelo atmosférico de características similares pero de mayor resolución, HadAM3, con el cual se forzaron las simulaciones regionales que se generaron con el modelo PRECIS. La validación de las salidas del modelo de gran escala se realizó comparando la climatología actual producida por el modelo HadCM3 con aquella derivada de los Reanálisis NCEP/NCAR. Los datos de los Reanálisis de NCEP/NCAR corresponden a la mejor estimación del estado atmosférico en la forma de cartas de cobertura global a 17 niveles, cada 6 horas y digitalizadas con una resolución horizontal de 2.5° de latitud por 2.5° de longitud.

La comparación muestra que existe una diferencia en la profundidad de la vaguada circumpolar del modelo, que muestra valores inferiores en unos 7.5 hPa, salvo en el caso de primavera. Aunque la vaguada está fuera del dominio de interés, genera un mayor gradiente isobárico en el dominio de los vientos oeste, particularmente en la estación de invierno. Por otra parte, el anticiclón subtropical del Océano Pacífico oriental está bien simulado en cuanto a posición e intensidad a lo largo del año.

El modelo HadCM3 da cuenta de manera muy ajustada de la distribución geográfica de la precipitación en los Reanálisis, particularmente a lo largo del litoral chileno, salvo durante el verano y otoño en la región árida del norte. El máximo de precipitaciones sobre la zona austral (Aysén) queda muy bien replicado con montos superiores en la estación de invierno. Cuantitativamente el máximo de Aysén corresponde a un total entre 2400 y 3000 mm en un año y sobre el Altiplano a unos 300 mm en los 3 meses estivales; ambas cifras se comparan favorablemente con los registros observados.

En cuanto a variabilidad, las precipitaciones invernales, frente a Los Vilos, en la región semiárida, el modelo ajusta muy bien tanto el valor medio como la variabilidad, sólo en el extremo de inviernos muy lluviosos el modelo presenta valores levemente inferiores a lo observado. Frente al extremo norte de la Isla grande de Chiloé el modelo sobreestima moderadamente el promedio y la variabilidad, sobrevalorando los montos de agua caída en los inviernos más húmedos.

3. Estimaciones para períodos intermedios (2011-2030 y 2046-2065)

En cuanto a una caracterización del clima en dos períodos intermedios entre el clima actual (1961-1990) y la proyección hacia fines del presente siglo (2071-2100) se usaron los climas

de dos períodos 2011-2030 y 2046-2065 con los cuales se cubre razonablemente el siglo XXI. Los dos climas intermedios se caracterizaron por medio de salidas del AOGCM usado para forzar las simulaciones regionales (HadCM3) para el escenario A2 que es aquel más extremo en cuanto a las emisiones de gases con efecto invernadero.

Un elemento que merece ser comentado en el segundo período intermedio es el alza de la isoterma 0° C, que varía entre unos 300 a 500 m respecto del clima actual. Además, en un corte meridional sobre el Océano Pacífico a la longitud 100° W existe un desplazamiento significativo hacia el sur (salvo en la estación de verano) de la celda de Hadley, lo cual es coherente con un alza de la presión superficial. Tanto el alza de la isoterma 0° C como la expansión hacia el sur del descenso de la circulación Hadley ocurren principalmente entre los dos períodos intermedios seleccionados, o sea, promediando el siglo XXI.

Según el modelo HadCM3 sobre el Océano Pacífico desde los 15° S y 180° de longitud y en dirección sureste, se desarrolla la Zona de Convergencia del Pacífico Sur caracterizada por una extensión de las precipitaciones tropicales en la climatología actual. Este rasgo, aparece con incrementos de precipitación, particularmente en otoño. Hacia el ecuador de su eje se define una región con disminuciones de precipitación el que es posible interpretar como provocado por la expansión hacia el sur de la subsidencia subtropical comentada en el párrafo anterior. Durante la estación invernal esta región de menor precipitación alcanza la costa central de Chile con indicios de similar naturaleza en otoño. El Centro-Sur del país también aparece con menor pluviometría en primavera y verano. Esta evolución concuerda con la expansión de la rama descendente de la circulación de Hadley y el aumento de las presiones en superficie centrado a 130° W y 42° S. En tanto, el extremo sur sólo muestra aumento de las precipitaciones durante el otoño.

4. Cambios regionales para fines del siglo XXI

4.1 Temperatura en superficie

Como era esperable dominan los cambios positivos (calentamiento) en todas las regiones, siendo mayores para el escenario A2. El cambio de temperatura media del escenario A2 respecto al clima actual sobre Chile continental varía entre 2° y 4°C, siendo más acentuado hacia las regiones andinas y disminuyendo de norte a sur. Sólo en la Región Austral bajo el escenario B2 hay sectores pequeños con calentamiento menor a 1°C. Estacionalmente el calentamiento es mayor en verano excediendo los 5°C en algunos sectores altos de la Cordillera de los Andes particularmente en verano.

Una comparación para el clima actual de los ciclos anuales de la temperatura media estimada por medio de PRECIS con valores observados sirve para estimar el error de la modelación. En la faja entre 17 y 23°S la correspondencia es muy buena, aunque el modelo entrega temperaturas medias inferiores en unos 2°C. En la faja comprendida entre 32 y 35°S, la coincidencia es muy buena en el terreno bajo, pero sobre los Andes PRECIS subestima la temperatura media anual lo que se justifica por la diferencia en altitud entre las posiciones de la estación en el modelo y la realidad, probablemente debido a su ubicación en valles angostos que no quedan bien representados; como consecuencia el ciclo anual de

la faja es bien simulado aunque queda subestimado por el modelo. Este problema vuelve a aparecer en la faja 43-49°S y en menor grado en las restantes, pero de manera general los ciclos anuales quedan bien simulados. Conviene notar que la evaluación de los cambios se hizo por la diferencia entre dos salidas de PRECIS de manera que las discrepancias comentadas con las observaciones resultan menos determinantes. En general, el cambio de las temperaturas extremas diarias exhibe un patrón espacial y variación estacional similares a los comentados en relación a los cambios de temperatura media diaria. En particular, las mayores diferencias (hasta 6°C cuando se considera la diferencia A2-Clima Actual) se concentran sobre la cordillera de la zona norte durante el verano, mientras que las menores diferencias (siempre positivas) se concentran en la zona austral durante invierno.

4.2 Precipitación

En términos generales las cumbres andinas marcan un contraste entre ambas laderas con un aumento en la ladera oriental (Argentina) y una disminución en la ladera occidental (Chile continental y el Pacífico adyacente), particularmente en latitudes medias y en las estaciones de verano y otoño. Este contraste se manifiesta más acentuado en el escenario A2 durante el verano, en que la precipitación sobre ciertos sectores de Chile centro-sur se reducen a la mitad e incluso un cuarto del valor actual, al mismo tiempo que la precipitación futura se duplica (respecto a la actual) inmediatamente al este de la cordillera de los Andes. El detalle regional permite establecer que:

- Sobre el sector altiplánico chileno aparece un aumento de precipitaciones en primavera y verano, siendo más significativo el de primavera en el sector de la I Región bajo el escenario A2 y más extendido hacia la II Región bajo el escenario B2.
- En el Norte Chico el incremento de las precipitaciones extiende su dominio bajo el escenario B2 abarcando toda la faja del territorio chileno entre los 20 y 33°S en otoño, pero en invierno afecta solo a la región andina con mayor incremento en la mitad norte.
- En la región de Chile Central hay una pérdida generalizada de precipitación bajo el escenario A2, condición que se mantiene en el escenario B2 con la excepción de la estación de otoño para latitudes inferiores a 33°S. La pérdida es del orden de 40% en las tierras bajas ganando en magnitud hacia la ladera andina durante el verano, pero reduciéndose durante el otoño y el invierno bajo el escenario B2.
- La Región Sur exhibe una transición hacia los montos del Clima Actual durante otoño e invierno, la cual es más rápida en el caso B2. Durante el verano las pérdidas de pluviosidad son del orden de 40% reduciéndose en primavera a un 25%.
- La Región Austral presenta pérdidas estivales de un 25%, pero se normaliza hacia el invierno, y existe un leve aumento en el extremo sur que prevalece todo el año.

Al igual que en el caso de las temperaturas medias se intentó una validación de las salidas del modelo PRECIS para el Clima Actual comparando con observaciones. En general la salida de PRECIS sobreestima la precipitación en el terreno elevado lo que puede tener su origen en el efecto de valles angostos representados pobremente en el modelo y en los problemas de medición de la precipitación nival. Sin embargo, los ciclos anuales son bien replicados por el modelo.

4.3 Impacto hidrológico

El clima de Chile continental hacia finales del siglo XXI obtenido a través del modelo regional PRECIS presenta cambios significativos en temperatura y precipitación, sobre todo bajo el escenario más severo (SRES A2). Parece apropiado intentar un resumen somero de ellos en aquellos aspectos que tienen mayor impacto sobre los recursos hídricos.

Hay dos aspectos que destacan, uno derivado del cambio en temperaturas y otro de los cambios en precipitación. El primero dice relación con la reducción del área andina capaz de almacenar nieve entre las estaciones del año. Considerando que la isoterma de 0°C sufre un alza de altura por el proceso de calentamiento, las crecidas invernales de los ríos con cabecera andina se verán incrementadas por el consiguiente aumento de las cuencas aportantes y la reserva nival de agua se verá disminuída. En la región cordillerana comprendida entre las latitudes 30 y 40°S, que corresponde a las regiones mayor productividad desde el punto de vista silvo-agro-pecuario y en el que se ubica la generación hidroeléctrica del sistema interconectado, hay reducciones del área comprendida dentro de la isoterma cero en todas las estaciones del año, pérdida que es muy significativa durante los cuatro primeros meses del año calendario.

Por otra parte, en cuanto a la pluviometría, con excepción de la región altiplánica en verano y el extremo austral en invierno, dominan las disminuciones. Cabe notar que en la estación invernal todo el territorio nacional comprendido entre 30 y 40°S ve disminuídas sus precipitaciones. La pérdida también se extiende al período estival por todo el territorio comprendido entre 38 y 50°S y aún más al norte por el sector andino.

Tales disminuciones pluviométricas se suman a la elevación de la isoterma cero para ofrecer un cuadro particularmente preocupante en las regiones Centro y Centro Sur.

5. Variaciones del nivel del mar

Con relación al cambio climático, la causa más importante, que da cuenta de alrededor de un 80% de la variación observada en el último siglo, es la expansión o dilatación térmica del agua que implica un cambio en su densidad. En el Tercer Informe del IPCC se estimó entre 110 a 430 mm para el año 2100 el alza media global originada en la expansión térmica del agua. Entre los modelos usados se incluyó el HadCM3 con forzamiento por diferentes gases invernadero, aerosoles (efectos directo e indirecto) y cambios de ozono troposférico, pero en general el valor promedio presenta variaciones regionales por las causas ya comentadas y distintos modelos AOGCM no muestran similitud en sus detalles.

Frente a la costa de Chile existe una disminución general desde el sector norte, con algo más de 20 cm, hasta el mar circumpolar donde las alzas bordean los 10 cm. Este último rasgo es reproducido por la mayoría de los AOGCM. Combinando la información disponible se obtienen para el litoral chileno hacia fines del presente siglo alzas entre 28 y 16 cm, bajo el escenario A2 y entre 24 y 14 cm para el escenario B2.