



ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA

Estimación de costos asociados a la seguridad hídrica en la agricultura como medida de adaptación al cambio climático en Chile

Un estudio en el contexto del Plan de Adaptación al Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario

Francisco Meza



NACIONES UNIDAS

CEPAL





Estimación de costos asociados a la seguridad hídrica en la agricultura como medida de adaptación al cambio climático en Chile

**Un estudio en el contexto del Plan de Adaptación
al Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario**

Francisco Meza



Este documento fue preparado por Francisco Meza, Consultor de la Unidad de Cambio Climático de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del programa EUROCLIMA (CEC/14/001), con financiamiento de la Unión Europea.

Ni la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en esta publicación. Los puntos de vista expresados en este estudio son del autor y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de la Organización.

Publicación de las Naciones Unidas

LC/TS.2017/47

Distribución: Limitada

Copyright © Naciones Unidas, junio de 2017. Todos los derechos reservados

Impreso en Naciones Unidas, Santiago

S.17-00478

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Publicaciones y Servicios Web, publicaciones@cepal.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Introducción	7
I. Antecedentes	9
A. Impactos del cambio climático en el sector agrícola.....	9
1. Impactos en agricultura	10
2. Impactos en ganadería.....	10
3. Otros impactos	11
4. Impactos agregados en el sector	11
5. El caso de Chile.....	15
B. Adaptación en agricultura	16
1. Definiciones y objetivos de la adaptación	16
2. Síntesis del plan de adaptación del sector agrícola en Chile.....	17
II. Metodología propuesta	23
A. Marco metodológico general.....	23
B. Escenarios de cambio climático.....	24
C. Modelo de evaluación de impactos frente a las restricciones de oferta	26
1. Demanda ecofisiológica de cultivos	26
2. Unidades bajo análisis de superficie con cultivos y eficiencia de riego	27
3. Modelo de predicción de Impactos.....	32
4. Selección de alternativas de adaptación.....	33
5. Estimación del costo de las medidas de adaptación	38
III. Resultados	43
A. Primera sección del Maipo.....	43
1. Costos de no acción	44
2. Costo de las medidas de gestión	45
3. Costo de los cambios en tecnología de riego	46
4. Costo de las medidas de aumento de la oferta.....	47
5. Alternativas óptimas	47
B. Cuenca del Limarí	48
1. Costos de no acción	48
2. Costo de las medidas de gestión	49
3. Costo de los cambios en tecnología de riego	50
4. Costo de las medidas de aumento de la oferta.....	51
5. Alternativas óptimas	51
IV. Conclusiones y recomendaciones	53
Bibliografía.....	55

Cuadros

Cuadro 1	Sectores considerados vulnerables dentro de distintos planes nacionales de acción contra el cambio climático	10
Cuadro 2	Impactos proyectados en el sector agrícola	12
Cuadro 3	Impactos para el sector agrícola	15
Cuadro 4	Síntesis de las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en Chile	18
Cuadro 5	Principales parámetros empleados en el módulo de cálculo de la evapotranspiración de cultivos	27
Cuadro 6	Distribución de rubros agrícolas de la cuenca del Maipo	28
Cuadro 7	Cultivos representativos de la cuenca del Maipo	28
Cuadro 8	Matriz de distribución de la superficie de cultivos más relevantes al interior de las Asociaciones de Canalistas de la primera sección del río Maipo (2007)	29
Cuadro 9	Series de suelo de la zona de Pirque	30
Cuadro 10	Distribución de rubros agrícolas en la cuenca del río Limarí	31
Cuadro 11	Cultivos representativos de la cuenca del río Limarí	31
Cuadro 12	Distribución de tecnologías de riego para la zona de Monte Patria	31
Cuadro 13	Series de suelo de la zona de Monte Patria	32
Cuadro 14	Listado de medidas de adaptación pertinentes para mejorar el manejo de recursos hídricos en el sector agrícola	35
Cuadro 15	Alternativas consideradas en la métrica costo-efectividad	36
Cuadro 16	Coeficientes de la función de producción de cada una de las especies presentes en el área de estudio	39
Cuadro 17	Niveles de eficiencia de aplicación por sistema de riego	41
Cuadro 18	Reducción porcentual de rendimientos para escenarios de cambio climático (aumento de temperatura) y reducción en la disponibilidad de agua que incidan en la oferta para riego	44
Cuadro 19	Costo de no adaptación en la primera sección del Maipo en función de escenarios de cambio climático que impliquen reducciones en la disponibilidad de agua	45
Cuadro 20	Costo de adaptación por reemplazo de sistemas de riego hacia alternativas más eficientes frente a distintos escenarios de cambio climático	46
Cuadro 21	Volumen necesario y costo de adaptación por infraestructura predial de acumulación de agua frente a distintos escenarios de cambio climático	47
Cuadro 22	Estimación de costos adaptación frente a distintos escenarios de cambio climático	47
Cuadro 23	Costos de no adaptación en la cuenca del Limarí en función de los escenarios de cambio climático que implican reducciones en la disponibilidad de agua	48
Cuadro 24	Reducción porcentual de rendimientos para escenarios de cambio climático que incidan en la oferta de agua para riego (aumento de temperatura y reducción en la disponibilidad de agua)	49
Cuadro 25	Costos de adaptación por la vía de reemplazo de sistemas de riego por alternativas más eficientes frente a distintos escenarios de cambio climático en la cuenca del Limarí	50
Cuadro 26	Volumen necesario y costo de adaptación por la infraestructura predial de acumulación de agua frente a distintos escenarios de cambio climático en la cuenca del Limarí	51
Cuadro 27	Estimación de los costos adaptación frente a distintos escenarios de cambio climático para la cuenca del Limarí	51

Gráficos

Gráfico 1	Distribución de los cambios proyectados en precipitación y temperatura para distintos GCM y escenarios en diferentes escenarios a futuro	25
Gráfico 2	Diagrama ombrotérmico de los valores medios mensuales de la estación meteorológica Pirque	30

Gráfico 3	Diagrama ombrotérmico de valores medios mensuales de la estación meteorológica Paloma Embalse	32
Gráfico 4	Rendimiento relativo y productividad media del agua de un cultivo de vid de mesa frente a distintos niveles de satisfacción de la evapotranspiración máxima	33
Gráfico 5	Estimación de costos de no adaptación para dos supuestos en función de escenarios de restricción de agua	45
Gráfico 6	Estimación de costos de adaptación asociado a programas de gestión y pérdida de productividad frente a escenarios de cambio climático	46
Gráfico 7	Estimación de costos de adaptación y su desagregación por componente para programas de gestión frente a escenarios de cambio climático en la cuenca del Limarí	50
 Recuadros		
Recuadro 1	Medida 1: Fortalecer la planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel nacional para optimizar el uso del agua en la agricultura	19
Recuadro 2	Medida 2: Establecer un programa nacional para fomentar la gestión eficiente y sustentable del agua en la agricultura de riego	19
Recuadro 3	Medida 3: Reforzar el programa de riego campesino	20
Recuadro 4	Medida 4: Optimizar el sistema nacional para la Gestión de Riesgos Agroclimáticos (GRA)	20
Recuadro 5	Medida 5: Adecuar el instrumento “seguro agrícola” para enfrentar el cambio climático	21
Recuadro 6	Medida 8: Impulsar el cambio en los calendarios de siembra para minimizar riesgos climáticos	21
Recuadro 7	Medida 10: Apoyo a la investigación y fomento a la innovación para la gestión de los recursos hídricos en el sector silvoagropecuario	21
Recuadro 8	Medida 11: Desarrollar programas de mejoramiento genético para cultivos agrícolas vulnerables al cambio climático, usando herramientas convencionales y moleculares de última generación	21
Recuadro 9	Medida 17: Estudio de requerimientos hídricos de especies forestales nativas y exóticas	22
Recuadro 10	Medida 18: Implementación de sistemas de cosecha de agua lluvia para riego y bebida	22
Recuadro 11	Medida 19: Diseño e implementación de un programa de investigación sobre la huella del agua para incorporar tecnologías que permitan la reducción del uso del recurso hídrico en los puntos críticos de las cadenas productivas de los productos agropecuarios	22
 Diagramas		
Diagrama 1	Esquema de los principales procesos calculados por PGM	33
Diagrama 2	Clasificación de medidas de adaptación en función del nivel transformativo y sus potenciales beneficios	34
Diagrama 3	Representación conceptual de los criterios necesarios para evaluar los sistemas de aumento de oferta de agua para alcanzar la seguridad hídrica	54
 Mapas		
Mapa 1	Cambios de temperatura y precipitación frente a escenarios de cambio climático	25
Mapa 2	Sectores de riego	43
Mapa 3	Región bajo estudio en el valle del Limarí	48

Introducción

El sector silvoagropecuario tiene fuertes vínculos con las condiciones climáticas. En efecto, el cambio climático representa un riesgo para el desempeño de esta actividad. En el caso de Chile, los estudios técnicos señalan que el prolongado período en que los cultivos y plantaciones permanecen expuestos a las fluctuaciones climáticas y las claras influencias que tienen los elementos meteorológicos, tanto sobre la productividad de los cultivos como sobre la calidad de los productos cosechados y en la producción pecuaria, hacen de esta actividad una de las más vulnerables al cambio climático (CEPAL, 2012). Además, los impactos del cambio climático sobre el sector silvoagropecuario sugieren la necesidad de implementar medidas de adaptación que minimicen los efectos negativos sobre la productividad de las distintas especies, la dinámica del sector y la seguridad alimentaria del país. Como respuesta a estas realidades el gobierno cuenta hoy con el Plan de Adaptación al Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario; sin embargo, no existe una evaluación completa del costo económico de las medidas que se propone implementar.

El objetivo principal de este trabajo es agrupar las medidas de adaptación propuestas en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario en Chile, según escenarios considerados, y categorizándolas de manera de definir el camino a seguir para cada medida en términos del proceso de evaluación de costos.

En este trabajo se discuten las principales dificultades para estimar los costos de adaptación del sector silvoagropecuario en lo relativo a recursos hídricos y se presenta una metodología para realizar una estimación en función de información hidrometeorológica y de modelos de simulación de cultivos. Los resultados obtenidos se comparan con el cálculo de pérdida productiva bajo un escenario de no adaptación (costo de no acción).

I. Antecedentes

A. Impactos del cambio climático en el sector agrícola

La agricultura es uno de los sistemas de aprovechamiento de recursos naturales más sensible a variaciones climáticas. En términos fisiológicos, los cultivos establecen relaciones de intercambio de materia y energía con su entorno y se ven expuestos a fluctuaciones meteorológicas por períodos considerables de tiempo. Es por ello que este sector es uno de los más sensibles a los impactos del cambio climático, afectando directamente a la producción pero también a otros niveles de la actividad (Nelson et al., 2009; Rosenthal & Kurukulasuriya, 2003).

Debido a su rol económico y social, la agricultura ha sido uno de los principales objetos de estudio a la hora de cuantificar impactos del cambio climático. La vulnerabilidad inherentemente ha llevado a los gobiernos a desarrollar diversos planes de acción contra el cambio climático, en el que se incluye expresamente el sector agrícola. El cuadro 1 ilustra de manera transversal cómo en distintos países de la Unión Europea, incluso antes de establecer una normativa común, lo contemplan para el desarrollo de sus planes de acción (Biesbroek et al., 2010).

Los países considerados en la revisión son: Alemania (DE), Dinamarca (DK), España (Es), Finlandia (FI), Francia (FR), Holanda (NL) y el Reino Unido (UK). De hecho, en muchos gobiernos se sigue un concepto más amplio para el enfoque de planes de adaptación. Un ejemplo de ellos es presentado por Porter et al. (2014), en el que se realiza una revisión sintética de los impactos provocados por el cambio climático a los que se encontraría sujeto el sector agrícola bajo una perspectiva de seguridad alimentaria¹.

¹ Food security o seguridad alimentaria, es una condición relacionada al abastecimiento de alimento y la capacidad de los individuos de poder acceder a ella.

Cuadro 1
Sectores considerados vulnerables dentro de distintos planes nacionales de acción
contra el cambio climático

Sector vulnerable	DE	DK	ES	FI	FR	NL	UK
Agricultura	X	X	X	X	X	X	X
Biodiversidad/conservación naturaleza	X	X	XX	X	XX	X	X
Energía, suministro electricidad	X	X	X	X	X	-	X
Finanzas y seguros	X	X	X	X	X	X	X
Bosques y silvicultura	X	X	X	X	-	X	X
Salud humana	X	X	X	X	XX	-	X
Manejo recursos hídricos	X	X	XX	X	XX	XX	X
Construcción e edificación	X	X	X	X	X	X	X
Sector pesquero	X	X	X	X	-	-	X
Manejo costero	X	X	XX	-	-	X	X
Turismo y recreación	X	-	X	X	X	X	X
Planeación territorial, uso de suelo	X	X	-	X	-	XX	X
Transporte	X	X	X	X	X	X	X
Comunicación e infraestructura	X	X	-	X	-	X	-
Industrias	X	-	X	X	X	-	X
Emergencia y servicios de rescate	X	X	-	-	-	-	-
Suelos	X	-	X	-	-	-	-
Política exterior	X	-	-	-	-	-	-
Caza	-	-	-	X	-	-	-
Zonas montañosas	X	-	X	-	-	-	-
Crianza de animales (renos)	-	-	-	X	-	-	-

Fuente: Adaptado de Biesbroek et al., (2010).

^a La "X" muestra aquellos que han sido considerados como vulnerables y la "XX" representa los sectores priorizados dentro de cada plan nacional de acción.

1. Impactos en agricultura

Dentro de los efectos más comunes que se anticipa para el sector agrícola se encuentra la disminución de rendimientos y cambios en los patrones fenológicos de los cultivos, como respuesta directa al aumento de las temperaturas (Olesen et al., 2012; Wreford, Moran, & Adger, 2010), esto incluso considerando avances tecnológicos que permitan hacerle frente a los impactos de la temperatura por el estrés térmico que generaría (Abelson, 2011). Otros cambios esperados corresponden a la pérdida de idoneidad de zonas tradicionalmente ligadas a un tipo de cultivo (nichos productivos), ejemplos de estos problemas han sido documentados en la literatura (ver por ejemplo Hannah et al., 2013; Jones & Goodrich, 2008; Jones et al., 2009; Jones, White, Cooper, & Storchmann, 2005).

2. Impactos en ganadería

Los eventuales cambios en los patrones de precipitación además de tener impactos significativos en los cultivos, de los cuales se espera que el aumento de eventos extremos como sequías e inundaciones también tengan efectos negativos en los rendimientos de las especies forrajeras, afectando la riqueza, cantidad, calidad y disponibilidad (Giridhar & Samireddypalle, 2015); a esto se suman los efectos fertilizadores del CO₂, el cual puede hacer que las praderas se vean invadidas por especies menos palatables o dañinas para el ganado, en la competencia por los recursos disponibles. En conclusión, las complejas dinámicas naturales de las pasturas y praderas, son difíciles de comprender bajo la dinámica de cambio climático.

Además, los sistemas de producción animal, sufrirán impactos manera transversal debido al cambio en las condiciones climáticas, por lo que los efectos esperados van desde la disminución en la producción de leche debido al estrés térmico (Dunn, Mead, Willett, & Parker, 2014), limitaciones en el crecimiento, modificaciones en la razón de conversión entre alimento y crecimiento, limitaciones en disponibilidad de agua, pasturas y alimento, y pérdida de fertilidad (Amundson, Mader, Rasby, & Hu, 2006; St-Pierre, Cobanov, & Schnitkey, 2003); o cambios en la transmisión de enfermedades, siendo facilitadas por el cambio climático (Guis et al., 2012).

3. Otros impactos

Las dinámicas intraespecíficas no son las únicas que se verán alteradas por los efectos del cambio climático. Hay estudios que señalan que además de los impactos negativos asociados al aumento de temperaturas y menor disponibilidad de agua, generará condiciones adversas a la producción agrícola debido al aumento en la incidencia del efecto de plagas y enfermedades (Mooney & Hobbs, 2000; Ziska, Blumenthal, Runion, Hunt, & Diaz-Soltero, 2010). Por ejemplo, Cannon (1998) sugiere que debido a los aumentos en temperatura, la colonización de los insectos hacia los cultivos se puede ver beneficiada, lo que generaría mayor riesgo de pérdidas productivas.

Otro efecto importante a nivel mundial, corresponde al aumento en la frecuencia de eventos extremos, elemento que habría sido resaltado en diversos informes del IPCC (2011, 2014b). Salvo en contados casos, como el de la mejora de la fertilidad del suelo por el efecto de las inundaciones en la India (Riebau & Qu, 2005), se espera que los efectos de los eventos extremos climáticos sobre la agricultura sean negativos.

Dentro de la literatura también se menciona el efecto fertilizador que tiene el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico. El cual ha sido comprobado mediante los estudios denominados FACE, que corresponden a ambientes semi-controlados donde se simulan condiciones ambientales en las que la concentración de CO₂ disponible se aumenta por sobre el nivel actual y se mide la respuesta de los cultivos. Dependiendo del tipo de fisiología de cada uno, el efecto fertilizador varía en intensidad, teniendo una alta respuesta en aquellas que son del tipo C3 (trigo, arroz, algodón, soya, remolachas y papas), que en aquellas de tipo C4 (maíz, sorgo y caña de azúcar) (Porter et al., 2014) donde el efecto del CO₂, se ha limitado a la biomasa. Un ejemplo de lo anterior es el estudio realizado por Hasegawa (2005), en el cual se comprueba el efecto fertilizador del CO₂ en el arroz, puesto que al aumentar la concentración del CO₂ atmosférico también aumentaba la actividad fotosintética del cultivo. Este no es el único efecto producido por el CO₂, Yoshimoto et al. (2005) encontró que un efecto indirecto del aumento del CO₂, es la disminución de los requerimientos hídricos del cultivo, ya que los estomas de la planta tienden a encontrarse más cerrados bajo estas condiciones. Pero existe controversia, ya que el aumento de la concentración de CO₂, no es el único impacto al cambio climático, sino también el aumento de temperatura a nivel global, por lo que los cultivos si bien podrían producir más, estos se encontrarán sometidos a otras condiciones de estrés ambiental.

4. Impactos agregados en el sector

Numerosos estudios han permitido documentar los impactos globales y regionales del cambio climático sobre la agricultura. El cuadro 2 muestra una síntesis de estos impactos proyectados a nivel global y regional sobre los principales cultivos.

A nivel sectorial, se espera un aumento en los precios de los bienes generados, provocando limitaciones en la distribución y adquisición; además de la disminución de calorías producidas por habitante.

Cuadro 2
Impactos proyectados en el sector agrícola

Región	Sub-región	Impactos en rendimiento (En porcentajes)	Escenario	Referencia
Mundo		<ul style="list-style-type: none"> • (I) Maíz: -4, -7 • (R) Maíz: -2, -12 • (I) Arroz: -9,5, -12 • (R) Arroz: -1, +0,07 • (I) Trigo: -10, -13 • (R) Trigo: -4, -10 	A1B CSIRO, MIROC 2050	(Nelson et al., 2009)
Asia oriental	China	(I) Maíz: <ul style="list-style-type: none"> • -10,9 a -1,4 (-7,8 a -1,6) • -21,7 a -9,8 (-16,4 a -10,2) • -32,1 a -4,3 (-26,6 a -3,9) (R) Maíz: <ul style="list-style-type: none"> • -22,2 a -1,0 (-10,8 a +0,7) • -27,6 a -7,9 (-18,1 a -5,6) • -33,7 a -4,6 (-25,9 a -1,6) (I) Arroz: <ul style="list-style-type: none"> • -18,6 a -6,1 (-10,1 a +3,3) • -31,9 a -13,5 (-16,1 a +2,5) • -40,2 a -23,6 (-19,3 a +0,18) 	+1°C, +2°C, +3°C -CO ₂ (+CO ₂)	Tao et al. (2011)
	China oriental	Arroz: <ul style="list-style-type: none"> • -10 a +3 (+7,5 a +17,5), • -26,7 a +2 (0 a +25), • -39 a -6 (-10 a +25) 	2030, 2050, 2080 -CO ₂ (+CO ₂)	(Tao & Zhang, 2013)
	Huang-Huai-Hai planicies de China Norte de China y planicies	Trigo-maíz: +4,5 ± 14,8, -5,8 ± 25,8 • (I) Trigo: -0,9 (+23) • (R) Trigo: -1,9 (+28)	+2°C, +5°C A1B/2085-2100 -CO ₂ (+CO ₂)/ MIROC	(Liu et al., 2010) (Yang, Liu, & Chen, 2011)
	Río Yangtze, China	<ul style="list-style-type: none"> • (I) Arroz: -14,8 (-3,3) • (R) Arroz: -15,2 (-4,1) 	B2/2021-2050 -CO ₂ (+CO ₂)	(Shen et al., 2011)
Asia del sur	Asia del sur	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz: -16 • Sorgo: -11 	2050	(Knox, Hess, Daccache, & Wheeler, 2012)
	Asia del sur India	Producción neta de cereal -4 a -10 Invierno sorgo: -7, -11, -32 <ul style="list-style-type: none"> • (I) Arroz: -4, -7, -10 • (R) Arroz: -6, -2,5, -2,5 	+3°C A2/2020, 2050, 2080 A1B; A2; B1; B2 2020, 2050, 2080 +CO ₂ /MIROC; PRECIS/HadCM3	(Lal, 2011) (Srivastava, Naresh Kumar, & Aggarwal, 2010) (Kumar et al., 2013)
		<ul style="list-style-type: none"> • Maíz de monzón: -21 a 0, -35 a 0, -35 a 0 • Maíz de invierno: -13 a +5, -50 a +5, -60 a -21 	A2/ 2020, 2050, 2080 HadCM3	(Byjesh, Kumar, & Aggarwal, 2010)

Cuadro 2 (continuación)

Región	Sub-región	Impactos en rendimiento (En porcentajes)	Escenario	Referencia
	Noroeste de India	<ul style="list-style-type: none"> • (I) Arroz: -10 a +5 • (R) Arroz: -35 a +5 • Maíz: hasta -40 • Trigo: hasta -20 	A1B 2030 +CO 2	(Kumar et al., 2011)
	India costera	<ul style="list-style-type: none"> • (I) Arroz: -10 a +5 • (R) Arroz: -20 a +15 • (I) Maíz: -50 a -15 • (R) Maíz: -35 a +10 	PRECIS/HadCM3	
	Ghats Occidental, India	<ul style="list-style-type: none"> • (I) Arroz: -11 a +5 • (R) Arroz: -35 a +35 • Maíz: hasta -50 • Sorgo: hasta -50 		
	Pakistán	Trigo: -7, -24 (Swat); +14, +23 (Chitral)	+1,5°C, +3°C	(IPCC, 2014b)
		<ul style="list-style-type: none"> • Trigo: -6, -8 • Arroz: -16, -19 	B2, A2 2080	(Iqbal, Goheer, & Khan, 2010)
Asia Occidental	Cuenca del Yarmouk, Jordan	<ul style="list-style-type: none"> • Cebada: -8, +5 • Trigo: -20, +18 	-20%, +20% precipitación	(Al-Bakri, Suleiman, Abdulla, & Ayad, 2011)
	Todas las regiones	<ul style="list-style-type: none"> • Trigo: -17 • Maíz: -5 • Sorgo: -15 • Mijo: -10 	2050	(Knox et al., 2012)
	Todas las regiones	Maíz: -24 ± 19	2090/+5°C	(P. K. Thornton, Jones, Ericksen, & Challinor, 2011)
	Este de África	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz: -3,1 a +15,0/-8,6 a +17,8 • Frejoles: -1,5 a +21,8/-18,1 a +23,7 	A1FI; B1/2030, 2050 HadCM3; ECHam4	(Philip K Thornton, Jones, Alagarswamy, Andresen, & Herrero, 2010)
	Sahel	Mijo: -20, -40	+2°C, +3°C	(Ben Mohamed, 2011)
Centro y Sudamérica	Noroeste de Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz: 0 a -10 • Trigo: -1 a -14 • Arroz: -1 a -10 	2030	(Lobell & Burke, 2008)
	Sur de Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz: -15 • Frejol: hasta a +45 	A2/2080/+CO 2/HadCM3	(Costa et al., 2009)
	Paraguay	<ul style="list-style-type: none"> • Trigo: +4, -9, -13 (-1, +1, -5) • Maíz: +3, +3, +8 (+3, +1, +6) • Soja: 0, -10, -15 (0, -15, -2) 	A2 (B2) 2020, 2050, 2080 PRECIS	(CEPAL, 2010)
	América Central	<ul style="list-style-type: none"> • Trigo: -1 a -9 • Arroz: 0 a -10 	2030	(Lobell & Burke, 2008)
		<ul style="list-style-type: none"> • Maíz: 0, 0, -10, -30 • Frejol: -4, -19, -29, -87 • Arroz: +3, -3, -14, -63 	A2 2030, 2050, 2070, 2100	(CEPAL, 2010)
	Panamá	Maíz: -0,5, +2,4, +4,5 (-0,1, -0,8, +1,5)	A2 (B1) 2020, 2050, 2080/+CO ₂	(Ruane et al., 2013)

Cuadro 2 (conclusión)

Región	Sub-región	Impactos en rendimiento (En porcentajes)	Escenario	Referencia
	Región andina	<ul style="list-style-type: none"> • Trigo: -14 a +2 • Cebada: 0 a -13 • Papas: 0 a -5 • Maíz: 0 a -5 	2030	(Lobell & Burke, 2008)
	Chile	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz: -5 a -10 • Trigo: -10 a -20 	A1FI/2050 +CO ₂ /HadCM3	Meza y Silva (2009)
	Argentina	<ul style="list-style-type: none"> • Trigo: -16, -11 (+3, +3) • Maíz: -24, -15 (+1, 0) • Soja: -25, -14 (+14, +19) 	A2, B2/2080 -CO ₂ (+CO ₂) PRECIS	(CEPAL, 2010)
Norte América	Medio-Oeste de Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz: -2,5 (-1,5) • Soja: +1,7 (+9,1) 	+0,8°C -CO ₂ (+CO ₂)	Hatfield et al. (2011)
	Suroeste de Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz: -2,5 (-1,5) • Soja: -2,4 (+5,0) 		
	Estados Unidos grandes planicies	Trigo: -4,4 (+2,4)		
	Noroeste de Estados Unidos	<ul style="list-style-type: none"> • Invierno trigo: +19,5, +29,5 • Primavera trigo: -2,2, -5,6 	A1B/2040, 2080 +CO ₂	(Stöckle et al., 2010)
	Prados canadienses	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeños granos: -48 a +18 • Oleaginosas: -50 a +25 	+1°C, +2°C, +20 precipitación, -20 precipitación	(Kulshreshtha, 2011)
Europea	Boreal	Trigo, maíz, soja: +34 a +54	A2, B2	(Iglesias, Garrote, Quiroga, & Moneo, 2012)
	Alpina	Trigo, maíz, soja: +20 a +23	2080	
	Atlántico norte	Trigo, maíz, soja: -5 a +22	HadCM3/HIRHAM, ECHAM4/RCA3	
	Atlántico central	Trigo, maíz, soja: +5 a +19		
	Atlántico sur	Trigo, maíz, soja: -26 a -7		
	Continental norte	Trigo, maíz, soja: -8 a +4		
	Continental sur	Trigo, maíz, soja: +11 a +33		
	Mediterráneo norte	Trigo, maíz, soja: -22 a 0		
Australia	Sur	Trigo, maíz, soja: -27 a +5	A2; Altas y bajas capacidades de agua disponible para plantas 2080/+CO ₂ /CCAM	(Luo, Bellotti, Williams, & Wang, 2009)
	Suroeste	Trigo: -29 (-25)	B2, A2, A1FI 2080 -CO ₂ (+CO ₂)/CCAM	Anwar et al. (2007)

Fuente: Adaptado de Porter et al., (2014).

5. El caso de Chile

Los efectos del cambio climático, para Chile varían mucho en la medida que se avanza hacia las latitudes altas, por efecto de la geografía y el clima. Por lo que a modo de resumen se presenta los impactos esperados en el cuadro 3.

Cuadro 3
Impactos para el sector agrícola

Cultivo/recurso	Impactos
Trigo	<p><i>Riego</i>: Reducción de rendimientos en zonas precordilleranas y costeras, con un rendimiento similar al del valle central.</p> <p><i>Secano</i>: Reducción de rendimientos en el norte y el centro, debido a la mayor incidencia de sequías. En costa y valle de la zona central, disminuciones del orden de 10 a 20%. A partir de la precordillera de la región del Biobío hacia el sur, en todas las zonas se observa un aumento gradual en los rendimientos del orden del 30%, llegando a un 100% en algunos sectores de la precordillera de las regiones de Los Ríos y Los Lagos.</p>
Maíz	<p><i>Riego</i>: Desde la región de Coquimbo hasta la del Biobío, se espera una disminución en los rendimientos en todo el valle central en un rango de entre el 10 y 20%. En la costa y precordillera se proyecta un aumento en los rendimientos de hasta un 50%. En la zona sur, a partir de la región de la Araucanía, los rendimientos aumentarían hasta situarse en una franja del 60 al 200%.</p> <p><i>Secano</i>: Los rendimientos continuarían siendo marginales, alcanzando potenciales de producción inferiores a 4 ton/ha.</p>
Papa	<p><i>Riego</i>: En general, la zona norte presentaría una reducción de los rendimientos de un 10 al 20%. En la zona centro-norte y hasta la región de O'Higgins, existirían disminuciones de hasta un 30%. Entre Talca y Temuco, se la situación se prolonga pero sólo en el valle central, mientras que en la costa y precordillera se esperan aumentos de hasta un 50%. Desde la región de la Araucanía al sur, los rendimientos aumentarían hasta el 150 y 200% en la región de los Lagos.</p> <p><i>Secano</i>: En general, pero especialmente en la zona central, se mantendrían las bajas productividades. Los aumentos se producirían en la costa de la región del Biobío y desde la región de Los Ríos hasta la de Aysén</p>
Frijol	<p><i>Riego</i>: Los rendimientos se mantienen para toda la zona norte, centro y centro-sur. Desde la región de la Araucanía hacia el sur la productividad aumentaría entre un 10 y 20%, llegando hasta el 100% en la región de Los Lagos. En general, los rendimientos se mantienen homogéneos en la zona sur y central, en torno a las 4,5 ton/ha al año.</p> <p><i>Secano</i>: Se mantienen los bajos rendimientos. No obstante, se esperan aumentos en la costa de la zona centro-sur y desde la región de Los Ríos hasta la de Aysén que girarían en torno a un 100%. En la zona central se mantendrían las fechas de siembra pero en algunas localidades de la costa y precordillera de la zona sur cambiarían de octubre a septiembre.</p>
Remolacha	<p><i>Riego</i>: En el valle central, entre las regiones de Valparaíso y del Maule, se producirían aumentos en los rendimientos de hasta un 50%. En la costa y precordillera se reducirían los rendimientos, asemejándose a la productividad del valle central. Desde la Región de la Araucanía al sur, el aumento de las temperaturas incrementaría el potencial productivo.</p> <p><i>Secano</i>: En el escenario climático actual, encuentra mejores condiciones de producción en las zonas costeras, alcanzando rendimientos de hasta 40 ton/ha. En la costa entre las regiones del Maule y de la Araucanía, se esperan disminuciones en los rendimientos de hasta un 50%. En el valle central y precordillera, se producirían aumentos en casi todas las comunas desde Valparaíso hacia el sur. En las regiones de la Araucanía y de Los Ríos se producirían cambios en las fechas de siembra en otoño, lo que permitiría aumentar los rendimientos en la mayoría de las comunas.</p>
Praderas	<p>Se espera una caída de la productividad anual en las regiones de Coquimbo y de Los Lagos, asociada a una intensificación de los períodos secos. Hacia el sur se observaría un aumento en los rendimientos de hasta un 20%. En la parte oriental de la cordillera de Los Andes, se esperan disminuciones, de hasta un 15%, a consecuencia de la reducción de la radiación solar. En la zona altiplánica, la productividad aumentaría por el eventual aumento en precipitaciones respecto de la situación actual. En el extremo austral, crecería la productividad en el sector occidental de la cordillera de Los Andes, incrementos en las temperaturas, la pluviometría y en los niveles de radiación solar. Se podría extender el área de cultivo hacia las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. Las especies cuya producción es dependiente del clima, podrían verse afectadas en sus propiedades organolépticas y, en su calidad. En general, se espera que el aumento de temperatura prolongue el ciclo de vida de algunas de las plagas, lo que tendría graves consecuencias sobre la sanidad de los frutales. Se podría favorecer la proliferación de enfermedades provocadas por hongos y bacterias. Las especies subtropicales podrían mejorar su potencial en casi todas las regiones. Es probable que las condiciones climáticas mejoren la calidad de los frutos, pues el alza en las temperaturas podría reducir la acidez. En la zona norte, el potencial productivo mejoraría considerablemente, especialmente en los valles de la región de Tarapacá. En la precordillera central, las condiciones climáticas permitirían la incorporación de nuevas tierras de cultivo.</p>
Plantaciones forestales	<p>Se estiman pérdidas de potencial productivo para las especies cultivadas (<i>Pino radiata</i> y <i>Eucaliptus globulus</i>), dentro de la zona centro norte. También se espera una disminución en el efecto de pérdida de potencial productivo a medida que se avanza hacia el sur, pero con un incremento del potencial hacia la región de los Ríos y los Lagos.</p>
Recursos edáficos	<p>Se encontrará sometido a dinámicas de erosión pluvial, que pueden acrecentarse. Actualmente ya existen zonas que sufren problemas ligados a la erosión (y serían las principales afectadas por el cambio climático) que son: la Cordillera de la Costa y la Precordillera de los Andes, la costa de la Región de Valparaíso y la precordillera de la Región Metropolitana, y la Región del Biobío, donde existe una notoria degradación del recurso edáfico debido uso agrícola y forestal.</p>

Fuente: Adaptado de MMA, (2011).

B. Adaptación en agricultura

1. Definiciones y objetivos de la adaptación

De acuerdo al IPCC (2014), se considera adaptación al “ajuste de los sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados, que atenúan los efectos perjudiciales o explotan las oportunidades beneficiosas”. Esta adaptación puede ser de carácter anticipado o reactivo si tiene lugar antes o con posterioridad a que ocurran los efectos del cambio climático. También puede ser planificado cuando responde a decisiones que se toman en el marco de políticas públicas, “basadas en el reconocimiento de las condiciones que han cambiado o están próximas a cambiar y de que es necesario adoptar medidas para retornar a un estado deseado, para mantenerlo o alcanzarlo”.

En cualquiera de estos casos, la adaptación busca reducir la vulnerabilidad o sensibilidad frente al cambio climático al aumentar la capacidad del país o individuo frente a los eventos climáticos en conjunto, un ejemplo básico es la construcción y manejo de embalses para hacer frente a la sequía.

Es necesario señalar que la adaptación ocurre en un contexto específico y está sujeta a los determinantes de los niveles de sensibilidad o vulnerabilidad de los sistemas, y a la naturaleza o magnitud de los cambios climáticos. En este sentido, las medidas de adaptación tienen distintas efectividades y su efectividad y viabilidad de implementación está condicionada por factores ambientales y sociales.

Es por ello que establecer planes de adaptación y determinar su costo—efectividad resulta un ejercicio complejo en el que no es fácil adoptar protocolos de estimación y menos de implementación. En muchos casos se prefiere hablar de un proceso de adaptación más que de una acción específica, ya que la dinámica y complejidad de los sistemas aconseja revisar de forma periódica las medidas implementadas.

Definiciones

Dentro del proceso de adaptación al cambio climático es común utilizar conceptos que deben ser entendidos de forma común y de manera transversal por las disciplinas involucradas. Este es el caso de los siguientes conceptos.

Adaptación: Concepto que tiene sus orígenes en las ciencias naturales. En términos simples, hace referencia al desarrollo de características internas o conductuales que permitan sobreponerse a los cambios medioambientales (Smit & Wandel, 2006). Dentro del cambio climático, se utiliza el término para definir a aquellas acciones de individuos o sistemas para evitar, soportar o aprovechar la variabilidad (cambios e impactos) climáticos actuales o proyectados. La adaptación disminuye la vulnerabilidad de los sistemas y aumenta su resistencia a los impactos.

Incerteza: Se refiere a un estado de conocimiento incompleto que puede ser resultado de la falta de información o desacuerdo sobre lo que se conoce o puede ser conocido. Tiene múltiples fuentes de origen, desde las imprecisiones de la información hasta las ambigüedades conceptuales (IPCC, 2014a).

Mitigación: Acciones o intervenciones humanas que buscan la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y/o del mejoramiento de sumideros de carbono. También, se usa dentro del manejo, tanto del riesgo como de los propios desastres, a través de acciones concretas que buscan reducir el peligro de exposición y vulnerabilidad (IPCC, 2014a).

Costo de la inacción: Se expresa frecuentemente como el costo social del cambio climático o el costo marginal de mantener las emisiones de CO₂. A pesar de la definición, existen diversos métodos para estimar el costo de la inacción, que puede ser expresado en base a las suposiciones de diferentes estudios (Watkins, et al., 2007).

Vulnerabilidad: Predisposición a ser afectado de manera negativa. Dentro de este concepto se agrupan otros conceptos como los elementos de sensibilidad o susceptibilidad al daño o la falta de capacidad de adaptarse (IPCC, 2014a).

Costo de oportunidad: Beneficio no percibido por la elección de otra actividad.

2. Síntesis del plan de adaptación del sector agrícola en Chile

El plan propone diversas medidas, que abarcan tanto una mejora en las condiciones para enfrentar eventos extremos como la búsqueda de la competitividad del sector.

Medidas propuestas de implementación del plan nacional de adaptación al cambio climático en sector silvoagropecuario

i) Mejorar la competitividad en la agricultura

El desarrollo competitivo del sector silvoagropecuario resulta fundamental para cumplir con la meta de convertir a Chile en una potencia agroalimentaria y forestal. Para alcanzarla, se contemplan acciones que influyen en el desarrollo del sector, entre las que destacan: fomento al riego y drenaje; desarrollo de iniciativas de transferencia tecnológica para pequeños y medianos agricultores; mejoramiento de la conectividad rural; mantención y perfección del patrimonio sanitario; mitigación del riesgo agroclimático a través del seguro agrícola y otros mecanismos; aumento de los sistemas de información a los agricultores para una mejor toma de decisiones.

ii) Fomento a la investigación e innovación

Este eje considera hacer frente a los principales desafíos del sector silvoagropecuario a través de la introducción de innovaciones tecnológicas y del fortalecimiento de la investigación y desarrollo, elementos determinantes para aumentar la productividad y el crecimiento además de satisfacer las exigencias de los mercados. En este sentido, se espera que la política sectorial tenga una vinculación más estrecha con el mecanismo de transferencia tecnológica.

iii) Promover la sustentabilidad económica, social y ambiental

El diseño y aplicación de políticas integrales deben apuntar a fortalecer el avance del sector en cada una de estas áreas. El crecimiento y competitividad de la economía rural debe potenciarse mediante la aplicación de políticas e instrumentos que promuevan el desarrollo social, considerando especialmente las particularidades de los grupos más vulnerables en el agro y la gestión sostenible de los recursos naturales, sujetos cada vez más al aumento de la demanda y la competencia entre actividades así como los severos impactos derivados del cambio climático y el calentamiento global.

iv) Transparencia y acceso a mercados

Junto con implementar una activa función de apoyo al acceso a los mercados, es necesario establecer las herramientas que aseguren una competencia leal y justa entre los distintos actores del sector. En el ámbito interno, se debe apuntar a evitar las asimetrías entre la oferta y la demanda y mejorar la competencia y el acceso al financiamiento, para asegurar precios y condiciones justas a lo largo de las cadenas. En el ámbito externo, las acciones deben seguir orientando la apertura y mantención de nuevos mercados, la exportación de nuevos productos y la ampliación del número de empresas exportadoras, especialmente fortaleciendo la participación de la agricultura de pequeña y mediana escala de producción y superando condiciones de acceso de índole ambiental y relacionada con el cambio climático.

v) Modernizar el Ministerio de Agricultura y sus servicios

Las instituciones del ministerio están en un proceso de ajuste frente a los parámetros imperantes en cualquier organización moderna a la que se le exige eficiencia, eficacia, transparencia, uso de tecnología, control de costos, entre otros. Se consideran, acciones que apunten al fortalecimiento institucional, la modernización y la construcción de capacidades en cada una de las entidades de la Red MINAGRI, a partir de los nuevos desafíos de la agricultura, como lo es el cambio climático y sus efectos, más aún cuando se trabaja para la conformación de un nuevo ministerio.

Cuadro 4
Síntesis de las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en Chile

Metas	Medida	Objetivos
Mejorar competitividad agricultura	Fortalecer la planificación y gestión de recursos hídricos a nivel nacional para optimizar el uso del agua en la agricultura.	Contribuir a la planificación de los recursos hídricos a nivel nacional a través del desarrollo de políticas, estudios, programas y/ acciones que mejoren su uso, asegurar el incremento de la superficie regada así como la competitividad de los agricultores/as y las organizaciones de regantes.
	Establecer un programa nacional para fomentar el uso eficiente y sustentable agua de riego.	Optimizar el uso del agua de riego a nivel predial a través del mejoramiento tecnológico y de los procedimientos de gestión del recurso.
	Reforzar el programa riego campesino.	Incrementar la productividad y competitividad de la agricultura familiar campesina a través de la incorporación de nuevas áreas al riego y el desarrollo de capacidades de gestión y utilización del agua de riego.
	Optimizar el sistema nacional para la gestión de riesgos agroclimáticos (GRA).	Diseñar y desarrollar un sistema nacional de gestión de riesgos frente a eventos climáticos y emergencias agrícolas.
	Adecuación del instrumento "seguro agrícola" para enfrentar el cambio climático.	Reducir los riesgos frente a eventos climáticos extremos con el fin de asegurar una agricultura viable (especialmente para los pequeños y medianos productores).
Fomento investigación e innovación	Adoptar sistemas de alerta y control integrados para el control de plagas y enfermedades	Reducir la susceptibilidad de los sistemas agrícolas ante el incremento de los problemas fitosanitarios, mediante sistemas de prevención y del manejo integrado de plagas y enfermedades agrícolas y forestales.
	Apoyar la inversión productiva a través de la ampliación y mejora del sistema crediticio al sector, a fin de incentivar la adaptación.	Aumentar los montos otorgados y el número de usuarios, a manera de soporte productivo y apoyo a la incorporación de nuevas inversiones prediales para la adaptación a los efectos del cambio climático.
	Impulsar el cambio en los calendarios de siembra para minimizar riesgos climáticos	Establecer nuevos calendarios acorde con las nuevas condiciones climáticas imperantes y promover la adopción para los agricultores.
	Fomentar el uso de sistemas de cultivo para la reducción del estrés térmico	Facilitar el uso de técnicas eficaces en situaciones donde las altas temperaturas amenazan los rendimientos o la calidad de la producción.
	Apoyo a la investigación e innovación en gestión de recursos hídricos para el sector	Mejorar la gestión y eficiencia mediante investigación aplicada, con uso de herramientas analíticas y de información para la toma de decisiones.
Promover la sustentabilidad económica social y ambiental	Mejoramiento genético para cultivos vulnerables, usando herramientas convencionales y de última generación.	Mantener la sustentabilidad de los sistemas productivos de los pequeños y medianos agricultores, ofreciendo nuevas variedades y/o especies que usen en forma eficiente el agua y se adapten a las nuevas condiciones ambientales.
	Desarrollar un programa de conservación genética de recursos forestales para adaptación.	Proponer metodologías de evaluación y selección de genotipos forestales que aseguren la conservación y mejoramiento de las especies.
	Potenciar los mecanismos del Programa de Sistemas de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental de los Suelos Agropecuarios.	Fomentar el uso de prácticas agronómicas sustentables para la recuperación y mantención del potencial productivo de los suelos agropecuarios.
	Disponer de un diagnóstico actualizado de los cambios en los potenciales de producción.	Desarrollar estudios en distintas zonas del país como respuesta a los cambios climáticos.
	Desarrollar un sistema de indicadores de sustentabilidad ambiental para la agricultura.	Reducir los riesgos de la agricultura mediante un sistema de indicadores que permitan evaluar las condiciones de producción agrícola y detectar de manera oportuna las condiciones que puedan amenazar la sustentabilidad.
Transparencia y acceso a mercados	Desarrollar nuevos métodos silviculturales.	Generar conocimiento básico por medio de prácticas silvícolas que permitan la adaptación gradual de los ecosistemas forestales nativos.
	Estudio de requerimientos hídricos de especies	Conocer los requerimientos de especies forestales nativas y exóticas.
	Implementación de sistemas de cosecha de agua lluvia para riego y bebida.	Para la producción de huertas familiares y pequeños invernaderos, así como la obtención de agua para beber, en condiciones de extrema aridez.
Modernizar el Ministerio de Agricultura	Diseño e implementación de un programa de investigación sobre la huella de agua, incorporar tecnologías que permitan la reducción del uso del recurso hídrico en los puntos críticos de las cadenas productivas	Optimizar el uso de los recursos hídricos en la agricultura, especialmente para los productos exportables.
	Desarrollo de un sistema de información para la adaptación al cambio climático.	Sistema de información que integre los medios de información existentes y dé acceso a la adaptación al cambio climático en los distintos niveles de decisión.
	Desarrollo de directrices a incorporar en las instancias de capacitación en cambio climático.	Fomentar el aumento guiado de las capacidades de los distintos actores del sector, desde el ámbito público hasta los usuarios finales, para enfrentar eficientemente un proceso de adaptación a los nuevos contextos climáticos.

Fuente: Adaptado de MINAGRI, (2013).

Un número importante de las estrategias apunta en la dirección a reducir la vulnerabilidad de la agricultura frente al cambio climático, enfrentando los impactos que generaría una reducción en la disponibilidad de los recursos hídricos. Sin embargo, por la forma en que se han formulado y, en muchos casos, por la falta de evaluaciones *ex-ante* en la efectividad de las medidas propuestas en las métricas que permitan su evaluación socioeconómica, no es posible llegar a estimaciones razonables sobre los costos.

A continuación se discuten las medidas que están directamente relacionadas a los recursos hídricos, desde la perspectiva de la factibilidad, para realizar una estimación de los costos de adaptación.

Recuadro 1

Medida 1: Fortalecer la planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel nacional para optimizar el uso del agua en la agricultura

Acción 1.1: Desarrollar estudios destinados a definir la viabilidad de proyectos de infraestructura de riego, incluyendo obras de acumulación, conducción y trasvases, entre otros, a modo de mejorar la seguridad del riego y/o de incorporar nuevas áreas al regadío.

Comentario: El desarrollo de estudios constituye una pieza fundamental de la adaptación ya que permite contar con mejor información para la toma de decisiones, aunque su realización no genera un impacto en la reducción de la vulnerabilidad ni permite determinar resultados en cuanto a los cambios de productividad para realizar un análisis de los costos y beneficios y estimar así, el costo del plan de adaptación. Sin embargo, el costo de los estudios en relación a un plan de adaptación general es relativamente bajo, y sus órdenes de magnitud son derivados en forma simple con información de la Comisión Nacional de Riego o la Dirección General de Aguas. Lo importante, es realizar un catastro de proyectos en planificación y verificar cómo es que contribuyen al plan.

Acción 1.2: Desarrollar programas tendientes al fortalecimiento técnico y legal de las Organizaciones de Usuarios de Aguas (OUA), para asegurar su constitución formal y la regularización de los derechos de aprovechamiento de agua.

Comentario: La mejora de la gestión de recursos hídricos y el fortalecimiento operacional de las OUAs es condición necesaria para lograr una adaptación efectiva y reducir el riesgo por restricciones hídricas. Sin embargo, no es fácil realizar una estimación cuantitativa de los beneficios económicos que genera ya que se requiere de un nivel de detalle importante que está fuertemente condicionado a las relaciones socio-ambientales locales.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 2

Medida 2: Establecer un programa nacional para fomentar la gestión eficiente y sustentable del agua en la agricultura de riego

Acción 2.1: Gestionar, administrar y focalizar recursos orientados a la inversión en obras de riego y drenaje.

Comentario: La gestión, administración y focalización de recursos es indispensable en la ejecución de un plan sin embargo, es difícil establecer una relación costo/beneficio adecuada. Sólo se puede decir que sin una adecuada gestión de los recursos ningún plan de adaptación puede alcanzar los efectos deseados.

Acción 2.2: Fomento de la inversión privada en obras de riego y drenaje a través de la bonificación de una parte de la inversión de los proyectos de tecnificación del riego intra—predial y/o mejoras en los sistemas de conducción de aguas.

Comentario: Dentro del plan estratégico, se sitúa para lograr un adecuado financiamiento de las medidas e involucrar al sector privado en su ejecución. Se espera que una bonificación de este tipo contribuya a acelerar la implementación de las obras sin alterar la relación costo/beneficio.

Acción 2.3: Mejorar la infraestructura de distribución del agua de riego. Implica mejorar los canales primarios, secundarios y terciarios (revestimientos, acueductos, entubados, sistemas de compuertas, etc.).

Comentario: Esta acción impacta directamente la disponibilidad de los recursos hídricos y puede caer en la categoría de acciones a ser evaluadas desde la perspectiva de relaciones costo/beneficio. No obstante para hacerlo se requiere de un estudio hidrológico detallado que permita determinar el cambio en la disponibilidad de agua, los efectos adversos en la recarga, la afectación a los usuarios de aguas subterráneas, además de tener un dimensionamiento del nivel de intervención territorial requerido.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 3

Medida 3: Reforzar el programa de riego campesino

Acción 3.1: Estimular la participación campesina en los concursos de la Ley N°18.450 de Fomento al Riego y Drenaje, que la Comisión Nacional de Riego convoque, a través de proyectos individuales y asociativos.

Comentario: Es una acción que impacta directamente la reducción de la vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático pero sólo será adecuada en la medida en que no se genere una mayor presión sobre los recursos hídricos a nivel local. Frente a condiciones de oferta de agua variable y decreciente, un aumento en la superficie e incorporación de nuevas zonas de demanda puede ser contraproducente, afectando la confiabilidad de los derechos de aprovechamiento de agua existentes. Como se verá más adelante, si la acción redonda en cambios de tecnología para hacer más eficiente el riego sin incorporar nueva superficie, se tiene la seguridad de no provocar efectos adversos sobre la productividad de otros usuarios.

Acción 3.2: Incrementar la seguridad de riego, a través de obras de reparación, mejoramiento o ampliación de los sistemas extra—prediales.

Comentario: Este tipo de acción tiene beneficios directos, en el estudio se propone una metodología de evaluación.

Acción 3.3: Aumentar la eficiencia de riego a través de inversiones en sistemas tecnificados.

Comentario: Este tipo de acción tiene beneficios directos, en el estudio se propone una metodología de evaluación.

Acción 3.3: Incorporar nuevas áreas de riego, mediante la construcción de obras como embalses, pozos profundos, etc.

Comentario: Es una acción que, como ya se mencionó, impacta directamente en la reducción de la vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático pero que no será adecuada si se genera mayor presión sobre los recursos hídricos a nivel local. Frente a condiciones de oferta de agua variable y decreciente un aumento en la superficie e incorporación de nuevas zonas de demanda puede ser contraproducente afectando la confiabilidad de los derechos de aprovechamiento existentes. Como se verá más adelante, si la acción redonda en cambios de tecnología para hacer más eficiente el riego sin incorporar nueva superficie, se tiene la seguridad de que no tendrá efectos adversos en la productividad de los otros usuarios.

Acción 3.3: Dar seguridad jurídica a las aguas utilizadas en el riego campesino y fortalecer las organizaciones.

Comentario: La mejora de la gestión de recursos hídricos y el fortalecimiento operacional de las OUA es condición necesaria para lograr una efectiva adaptación y reducción del riesgo de restricciones hídricas. Sin embargo no es fácil realizar una estimación cuantitativa de los beneficios económicos que genera ya que se requiere de un nivel de detalle importante condicionado por las restricciones socio-ambientales locales.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 4

Medida 4: Optimizar el sistema nacional para la Gestión de Riesgos Agroclimáticos (GRA)

Acción 4.1: Diseño de una estrategia nacional y puesta en marcha de las instancias de coordinación a nivel nacional y regional para la gestión del riesgo agroclimático como el Decreto 81/08, Res. 95/08, Ord.85/09, apoyo a la agricultura de secano, agricultura moderna con incorporación de otros enfoques/sistemas: manejo holístico, sistema Keyline, etc. Desarrollo de un sistema de información para la gestión de riesgos agroclimáticos (Red Agroclimática Nacional, envíos masivos de información, integración a redes sociales, entrevistas radiales, distribución de material impreso o charlas divulgativas. Establecimiento de redes regionales público privadas (ampliación de bases de datos con información agroclimática, talleres de capacitación, identificación de amenazas y vulnerabilidades, planes de trabajo, etc.). Desarrollo del modelo de gestión de riesgos (planes de trabajo, planes para enfrentar riesgos estacionales frente a eventos climáticos y planes de contingencia frente a emergencias agrícolas). Fortalecimiento de capacidades (actividades de capacitación y difusión, seminarios nacionales e internacionales, unidades demostrativas, entre otros).

Comentario: Esta es una acción que tiene un valor importante en la adaptación bajo la premisa que la gestión integrada de riesgos (información, pronósticos, preparación anticipada, planificación para escenarios desarrollo de alternativas de acción, etc.) es un buen camino para favorecer la adaptación. No obstante, su valoración en términos de costo/beneficio requiere de información detallada y un conocimiento de cómo un GRA es usado por los agricultores para estimar su efecto. La literatura de uso de información climática para gestión de riesgos y su valoración es amplia y puede servir de apoyo para estimar costos (véase Meza et al., 2008).

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 5

Medida 5: Adecuar el instrumento “seguro agrícola” para enfrentar el cambio climático

Acción 5.1: Implementar la contratación del seguro en un mayor número de productores. Actualmente sólo el 10% de la población tiene potencial de cobertura, por lo que es importante diversificar los rubros y aumentar los montos.

Comentario: El instrumento de seguro agrícola opera bajo la premisa de un clima variable pero estacionario (sus propiedades estadísticas no cambian y los riesgos pueden estimarse para determinar las primas y capacidades de pago) y que los riesgos no están correlacionados entre los actores (al menos no en su mayoría). Aunque persiste la interrogante de si este tipo de instrumentos será eficaz para enfrentar el cambio climático en circunstancias en las que la frecuencia de eventos extremos cambie y en las que los eventos estarán más correlacionados en el espacio. Por tanto, se requiere de mayor información y estudios específicos para hacer un análisis costo beneficio más detallado.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 6

Medida 8: Impulsar el cambio en los calendarios de siembra para minimizar riesgos climáticos

Acción 8.1: Modificar los calendarios de siembra según las nuevas condiciones climáticas. Los cambios esperados en las variables climáticas tendrán impacto sobre los procesos fenológicos de los cultivos, lo que hace necesario adaptar las fechas de siembra y cosecha a modo de maximizar el rendimiento sin afectar la calidad de los productos.

Comentario: Este tipo de ajustes corresponden a medidas incrementales para reducir la magnitud del cambio climático. Por su nivel de dependencia con las condiciones de sitio específicas es difícil llegar a una estimación agregada de su efectividad y del impacto desde una perspectiva del costo beneficio (véase Meza y Silva, 2009 para más detalles).

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 7

Medida 10: Apoyo a la investigación y fomento a la innovación para la gestión de los recursos hídricos en el sector silvoagropecuario

Acción 10.1: Fomentar la investigación aplicada en torno a los recursos hídricos, orientados al uso eficiente y gestión sustentable de éstos a nivel predial, extra-predial y/o cuenca hidrográfica con el fin de mantener y/o mejorar la competitividad de los productores agropecuarios del país.

Comentario: La acción tiene beneficios directos. En el estudio se propone una metodología para evaluar su impacto.

Acción 10.2: Desarrollar un sistema preciso de estimación de demandas hídricas de cultivos, frutales y especies forestales, considerando la modelación y/o evaluación del desempeño fisiológico, productivo y de calidad bajo una amplia gama de escenarios climáticos. Desarrollar y mejorar los sistemas de información que permitan una toma de decisión informada y oportuna, con soporte técnico para reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático en agricultura de riego

Comentario: La mejora de la gestión de recursos hídricos y el fortalecimiento operacional de las OUA es condición necesaria para lograr una efectiva adaptación y reducción de riesgo de restricciones hídricas. Sin embargo no es fácil realizar una estimación cuantitativa de los beneficios económicos que genera ya que se requiere de un nivel de detalle importante, condicionado a las relaciones socio-ambientales locales.

Acción 10.3: Uso de herramientas para la gestión hídrica con el fin de mejorar la competitividad de los productores.

Comentario: La acción tiene directos beneficios. En el estudio se propone una metodología para evaluar su impacto.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 8

Medida 11: Desarrollar programas de mejoramiento genético para cultivos agrícolas vulnerables al cambio climático, usando herramientas convencionales y moleculares de última generación

Acción 11.1: Establecimiento de un programa de investigación y desarrollo que permita la adaptación de cultivos vulnerables al cambio climático, generando nuevas variedades o identificando nuevas especies; tolerantes a la sequía, temperaturas extremas, y resistentes a nuevas plagas y enfermedades

Comentario: Esta acción tiene beneficios directos. Sin embargo, si no se dispone de una cuantificación de los efectos que tiene sobre la productividad frente a la sequía, no será posible evaluar la relación costo beneficio. Es necesario resaltar que la agricultura debe tener un programa de investigación en sustentabilidad y mejoramiento genético en los que los centros de investigación nacionales (considérese los programas de investigación de los centros de excelencia del país que sólo tienen presupuestos anuales de entre 1 a 2 millones de dólares) aporten con lo mejor de sus capacidades, alentado y financiado con recursos públicos y privados. En términos comparativos, resulta ser (en varios órdenes de magnitud) inferior a los impactos de no adaptación y a los costos de adaptación aquí evaluadas.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 9**Medida 17: Estudio de requerimientos hídricos de especies forestales nativas y exóticas**

Acción 17.1 El estudio busca determinar y conocer los requerimientos hídricos de especies nativas y exóticas, expresados en evapotranspiración, establecidas en algún gradiente latitudinal y altitudinal.

Comentario: El desarrollo de estudios constituye una pieza fundamental de la adaptación ya que permite contar con mejor información para la toma de decisiones, aunque su realización no genera la reducción de la vulnerabilidad ni permite determinar el nivel de productividad que permita realizar un análisis de costos y beneficios (indispensables para estimar el costo del plan de adaptación). Sin embargo, el costo de los estudios en relación a un plan de adaptación general es relativamente bajo, y sus órdenes de magnitud son obtenidas fácilmente con información de la CNR o la DGA. En este sentido, lo importante es realizar un catastro de proyectos en planificación y verificar cómo contribuyen al plan.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 10**Medida 18: Implementación de sistemas de cosecha de agua lluvia para riego y bebida**

Acción 18.1 Diseñar distintos proyectos para acumular agua de lluvia, que se separarán según las necesidades relativas del predio en cuanto al volumen de agua requerido para: micro, pequeñas y medianas obras de captación.

Comentario: A pesar que hay estimaciones de costos de obras de este tipo, su nivel de impacto agregado en la productividad es difícil de cuantificar porque depende de características específicas de clima, sistema productivo, nivel de demanda y efectividad en la captura de agua.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

Recuadro 11**Medida 19: Diseño e implementación de un programa de investigación sobre la huella del agua para incorporar tecnologías que permitan la reducción del uso del recurso hídrico en los puntos críticos de las cadenas productivas de los productos agropecuarios**

Acción 19.1 Evaluación de la huella del agua en los procesos productivos. Desarrollar una propuesta de incorporación de tecnología en los puntos críticos para disminuir el uso de agua, priorizando a las cadenas más vulnerables.

Comentario: El desarrollo de estudios constituye una pieza fundamental de la adaptación puesto que permite contar con mejor información para la toma de decisiones, aunque su sola realización no genera un impacto en la reducción de la vulnerabilidad ni permite determinar resultados en cambios de productividad que permitan estimar el costo del plan de adaptación. Sin embargo, el costo de los estudios en relación a un plan de adaptación general es relativamente bajo, y sus órdenes de magnitud son derivados fácilmente con información de la CNR o la DGA. En este sentido lo importante es realizar un catastro de proyectos en planificación y verificar cómo contribuyen al plan.

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ministerio del Medio Ambiente, (2013).

De esto se desprende que la estimación de costos de las medidas de adaptación del plan relativas a disminuir la vulnerabilidad frente a cambios climáticos que afecten la disponibilidad y demanda de recursos hídricos es compleja y requiere de la introducción de una serie de supuestos. La siguiente sección entrega una propuesta metodológica para la evaluación de un conjunto de medidas agrupadas de forma genérica y que permiten tener una primera idea de los costos y de la relación de costo beneficio de un plan de adaptación del sector frente al cambio climático comparándolo con los costos de inacción.

II. Metodología propuesta

A. Marco metodológico general

En este estudio se ha desarrollado una metodología simplificada de estimación de impactos y de evaluación económica de medidas de adaptación (incluyendo el costo de no tomar medidas). Para conseguirlo, se utiliza información generada a partir de modelos calibrados (WEAP and Plant Growth Model), adaptados para facilitar la desagregación espacial y evaluar, en forma expedita, el resultado de intervenciones antrópicas (consideradas pertinentes) sin tener que correr nuevas simulaciones.

Si bien se trabaja en función de escenarios asociados a cambios climáticos, su estructura es lo suficientemente simple como para extrapolarlo a cualquier situación que lleve a una disminución de la oferta de recursos hídricos (expresada como porcentaje de las condiciones actuales) y por lo tanto aplicarlo a otros agentes de cambio global tales como el crecimiento poblacional y la mayor competencia en el uso de recursos, cambios de uso del suelo que disminuyan la disponibilidad de agua, etc.

Un aspecto relevante asociado a la gestión de los recursos hídricos en Chile corresponde a la esfera institucional, la cual ha sido relevante para la asignación de recursos a los distintos usuarios en este modelo. La base del sistema la constituye la asignación de derechos de aprovechamiento de agua (DAA) que se constituye de manera independiente al uso de la tierra y que puede ser trasladada al mercado para reasignar el uso de agua a diferentes actividades. Estos DAA quedan expresados en un volumen por unidad de tiempo. Sin embargo, se deja en claro que el ejercicio del DAA está restringido en circunstancias en las que la fuente de abastecimiento no contenga la cantidad suficiente para satisfacerlos en su integridad, en cuyo caso el caudal se distribuirá en partes alícuotas.

Con el paso del tiempo, las cuencas han evolucionado de tal forma que se han entregado derechos de carácter permanente o eventual los cuales, dependen de la variabilidad interanual de la hidrología y de las características propias de la cuenca en términos de eficiencia de uso del agua. Por lo tanto, existe una estrecha dependencia entre las condiciones agua arriba y debajo de una cuenca. Como queda mostrado en el trabajo de Vicuña y Meza (2012), existe un mayor riesgo en las partes más bajas y en especial en los caudales ecológicos si frente a cambios en la hidrología los sectores de agua arriba no modifican su comportamiento frente al cambio climático y continúan utilizando recursos a las mismas tasa que solían hacerlo. Dada la naturaleza no lineal de los impactos y de los costos asociados para adaptarse, el sector ubicado agua abajo podría experimentar costos significativamente mayores. De forma análoga no es posible solicitar al sector ubicado agua arriba un mayor esfuerzo de adaptación tal que, frente a una reducción de oferta, su uso no afecte a los usuarios agua abajo en términos de disponibilidad.

Por lo tanto, el principal supuesto introducido es que todos los usuarios (en este caso los cultivos) deberán ajustar su uso o consumo de agua en forma proporcional a la reducción de la oferta.

El segundo gran supuesto es que en el presente, el sistema opera en forma “óptima”, esto quiere decir que no existen mejoras en la gestión de recursos hídricos y que las relaciones entre usuarios agua arriba y abajo son preservadas en la medida que se respetan las extracciones de agua como la simple ponderación de la demanda ecofisiológica del cultivo y la eficiencia del sistema de riego. Este supuesto, lejos de ser realista, permite simplificar el cálculo de la magnitud del problema y sus consecuencias.

De este modo, se estima que frente a cada escenario de cambio climático la brecha de disponibilidad de recursos hídricos que debe llenarse vía medidas de adaptación corresponde a:

$$\text{Brecha} = \text{demanda futura} - \text{demanda actual} * \% \text{ de reducción asociado al cambio climático}$$

El tercer supuesto fundamental asume que las medidas de adaptación son seleccionadas única y exclusivamente en función de su costo relativo, buscando minimizar el costo de adaptación para preservar la producción actual. En otras palabras, no se incorporan adaptaciones o cambios en la matriz de cultivos que deriven de nuevas condiciones emergentes asociadas a los cambios climáticos (por ejemplo fruticultura subtropical en las regiones mediterráneas), ni tampoco la posibilidad de adoptar variedades con mejores potenciales productivos ni transformaciones derivadas de mejoras en la rentabilidad relativa de alguna especie o variedad.

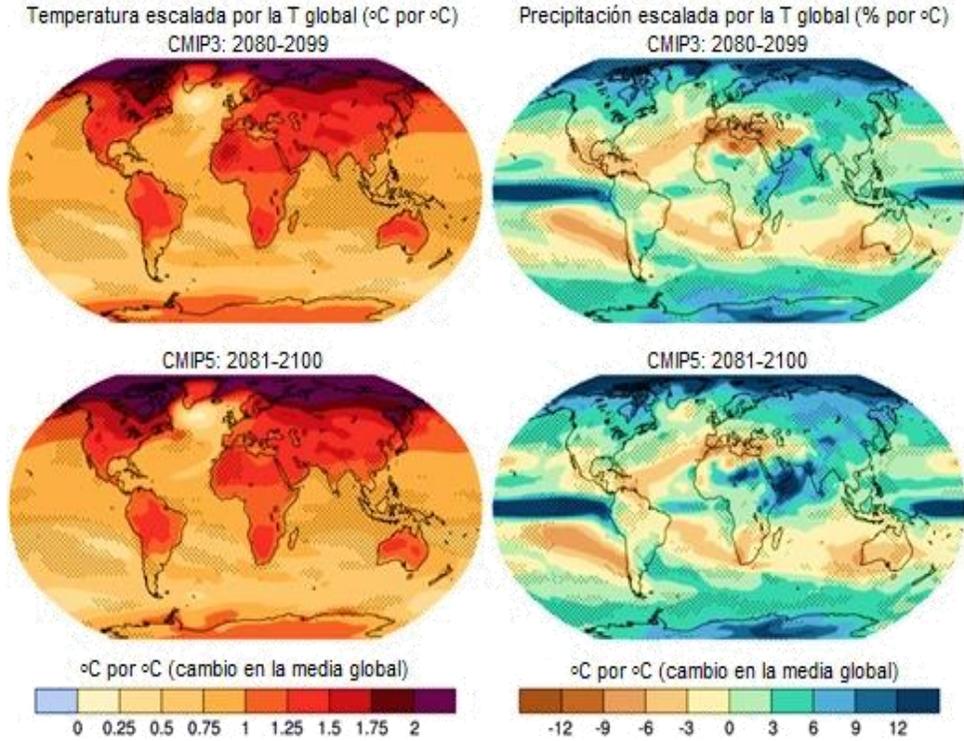
En el caso de nuevas variedades, se espera que la inversión en ciencia y tecnología para planes de adaptación y mejoras genéticas de cultivos se haga tanto por instituciones públicas como privadas, pero aún es temprano para estimar su costo como también para calcular las posibilidades que tienen para cerrar la brecha de disponibilidad de recursos hídricos hacia el futuro. Además, persiste cierta incertidumbre sobre los modelos de transferencia y si pueden ser consideradas como medidas adaptativas por el agricultor. En el caso de cultivos anuales, año a año los agricultores seleccionan y compran la variedad que les permite el mejor desempeño según sus restricciones. En este sentido, una variedad tolerante a la sequía puede estar perfectamente internalizada en su función de costos de producción siendo difícil establecer la adicionalidad que implica sobre el modelo de estimación de costos de adaptación.

B. Escenarios de cambio climático

Los modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCMs, por sus siglas en inglés) proporcionan estimaciones cuantitativas sobre los cambios climáticos futuros, en particular a escala continental y más allá de ésta. La verosimilitud en los modelos se determina por el hecho de que los modelos se basan en principios físicos aceptados y por su capacidad de reproducir las características observadas del clima actual y de cambios climáticos del pasado. La confianza que se tiene en las estimaciones de los modelos es mayor para algunas variables climáticas como la temperatura, que para otras como la precipitación.

A pesar de las incertidumbres existentes, los modelos son unánimes en cuanto a la predicción que hacen del calentamiento global por el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), dicha magnitud está en correspondencia a las estimaciones independientes, procedentes de otras fuentes, tales como las que son el resultado de cambios observados y reconstrucciones de climas pasados. Sin embargo, la consistencia en las proyecciones futuras de cambios en precipitación es considerablemente menor. El mapa 1, tomado del Informe del IPCC (IPCC, 2013), presenta los promedios de cambios proyectados en temperatura y precipitación a nivel mundial en el proceso de comparación de modelos CMIP3 y CMIP5. Se pueden apreciar las zonas donde la gran mayoría de los modelos proyectan aumentos de precipitación (color verde) y aquellas donde la mayoría de los modelos estiman disminuciones de precipitación (color café). En términos generales, los aumentos de precipitación se dan de manera robusta en la región alrededor de Ecuador, del río de la Plata y del extremo austral del continente. Por otra parte, se evidencian reducciones de precipitación de manera robusta en gran parte del territorio chileno y del occidente argentino, del extremo norte del continente y del Amazonas para algunos meses del año.

Mapa 1
Cambios de temperatura y precipitación frente a escenarios de cambio climático

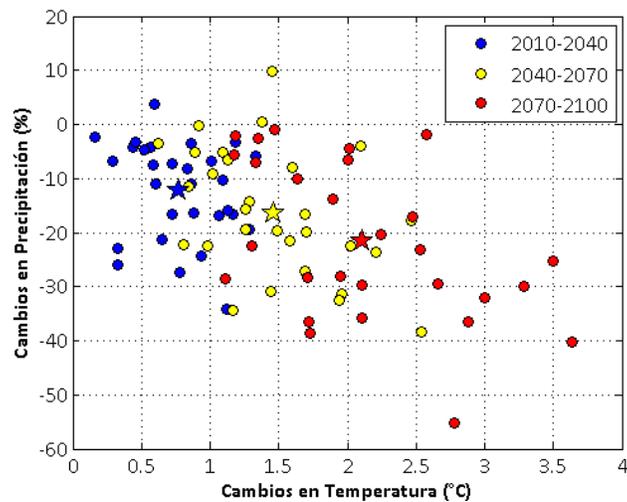


Fuente: IPCC, (2013).

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

^a Panel superior: resultados del proceso de comparación de modelos CMIP3. Panel inferior: resultados del proceso de comparación de modelos CMIP5.

Gráfico 1
Distribución de los cambios proyectados en precipitación y temperatura para distintos GCM y escenarios en diferentes escenarios a futuro



Fuente: Con base en Vicuña et al. (2011).

En Chile se han desarrollado trabajos de estimación de impactos del cambio climático en función de escenarios de la familia A y B (SRES, 2001) y en función de las estimaciones de algunos modelos de circulación general (HadCM3) transformándose en un referente de estandarización a la hora de proyectar los posibles efectos. Sin embargo, el número de modelos es amplio y los escenarios han sufrido modificaciones importantes adoptándose un grupo conocido como Representative Concentration Pathways (RCP). A esto se le suma el hecho de que los horizontes de tiempo implican una nueva dimensión de variabilidad generando una multiplicidad de proyecciones.

Como no es posible abordar todos ellos en este estudio y para generar un resultado sintético, se ha optado por adoptar una notación semejante a la de un análisis de sensibilidad (Vicuña *et al.*, 2011). En este, **el cambio climático se ve representado por incrementos de temperatura (+1, +2, +3, +4) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%)** que son capaces de contener la amplia gama de modelos de circulación global (véase el gráfico 1 como ejemplo).

C. Modelo de evaluación de impactos frente a las restricciones de oferta

1. Demanda ecofisiológica de cultivos

Los cálculos correspondientes a la evapotranspiración de cultivos son adoptados de los algoritmos publicados por el ASCE (2005) y Neitsch *et al.* (2005). Para la evapotranspiración de referencia (ET_o), el cultivo utilizado es la alfalfa, con una altura de 40 cm y con una resistencia foliar de 100 s m⁻¹. Luego, la evapotranspiración de referencia está dada por la siguiente ecuación:

$$ET_{o_{day}} = (DLT * RN + rho * cp * 86400 * \frac{VPD}{AR}) / (HV * (DLT + GMA * [1 + \frac{CR}{AR}]))$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de referencia [mm d⁻¹]

DLT : Pendiente de la curva de presión de vapor [KPa °C⁻¹]

RN : Radiación neta [MJ m⁻² d⁻¹]

Rho : Densidad del aire [Kg m⁻³]

Cp : Calor específico del aire MJ Kg⁻¹ °C⁻¹

VPD : Déficit de presión de vapor [KPa]

AR : Resistencia aerodinámica para transferencia de vapor y calor [s m⁻¹]

HV : Calor latente de vaporización [MJ Kg⁻¹]

GMA : Constante psicrométrica [KPa °C⁻¹]

CR : Resistencia de la canopia a la transferencia de vapor [s m⁻¹]

Para calcular las condiciones de clima actual se obtuvo una serie de tiempo diaria de variables meteorológicas y se calculó la media de la evapotranspiración de referencia. Luego se modificó la temperatura según los escenarios de cambio climático descritos anteriormente para proceder a calcular la demanda del cultivo de referencia en el futuro.

Posteriormente, la ET_o es transformada en demanda potencial del cultivo al multiplicarla por el coeficiente de cultivo (Kc). El procedimiento se aplica tanto para las condiciones de clima actual como para los escenarios de aumento de temperatura y reducción de precipitaciones definidos con anterioridad.

Para ello se siguió la metodología propuesta por FAO (Allen, 1998) que permite desagregar el coeficiente de cultivo en el tiempo mediante interpolaciones lineales de sus valores críticos. Los parámetros empleados en este estudio se detallan en el cuadro 5.

Cuadro 5
Principales parámetros empleados en el módulo de cálculo de la evapotranspiración de cultivos^a

Cultivo	Fecha de siembra (día juliano)	Init. (L _{ini})	Dev. (L _{dev})	Mid (L _{mid})	Late (L _{late})	K _{c ini}	K _{c mid}	K _{c end}
Maíz	280	25	40	55	40	0,70	1,15	1,0500
Trigo	160	20	50	60	30	0,70	1,15	0,3000
Alfalfa	130	30	30	180	100	0,40	0,95	0,9000
Almendra	230	30	50	130	30	0,40	0,90	0,6518
Ciruelo europeo	250	30	50	100	30	0,80	1,15	0,8518
Ciruelo japonés	250	30	50	100	30	0,80	1,15	0,8518
Duraznero	260	30	50	130	30	0,80	1,15	0,8518
Limonero	125	35	100	200	30	0,80	0,80	0,8000
Naranja	125	35	100	200	30	0,80	0,80	0,8000
Nectarino	260	30	50	130	30	0,80	1,15	0,8518
Nogal	285	20	30	100	30	0,50	1,10	0,6518
Olivo	260	30	90	60	90	0,65	0,70	0,7000
Palto	125	60	90	120	95	0,60	0,85	0,7500
Vid de mesa	280	20	50	75	60	0,30	0,85	0,4500
Vid de vino	270	20	50	75	60	0,30	0,70	0,4500
Alcachofa	410	40	40	250	30	0,50	1,00	0,9500
Acelga	225	20	30	40	10	0,70	1,05	0,9500
Betarraga	300	15	25	20	10	0,40	1,05	0,9500
Cebolla	275	20	35	110	45	0,70	1,05	0,9500
Choclo	280	25	40	30	20	0,70	1,15	1,0512
Espinaca	225	20	30	40	10	0,70	1,05	0,9500
Lechuga	300	20	30	15	10	0,70	1,05	0,9000
Melón	280	15	40	65	15	0,70	1,05	0,7500
Papa	280	25	30	45	30	0,60	1,15	0,7540
Pimentón	290	35	45	70	30	0,60	1,15	0,9000
Tomate	290	35	45	70	30	0,60	1,15	0,9000
Zanahoria	225	20	30	40	10	0,70	1,05	0,9500
Zapallo	280	15	40	65	15	0,70	1,10	0,7500

Fuente: Allen et al., (1998)

^a Init: Índice de área foliar al inicio. Dev: Índice de área foliar en desarrollo, Mid: Índice de área foliar en madurez. Late: Índice de área foliar en senescencia. Kc: Coeficientes de cultivo en cada una de las etapas.

2. Unidades bajo análisis de superficie con cultivos y eficiencia de riego

La simulación de la distribución histórica del agua en las zonas analizadas (primera sección del Maipo y valle del Limarí) ha sido estimada utilizando un modelo de gestión hídrica (WEAP). Se ha dado especial interés al uso de los derechos de aprovechamiento para verificar si se utiliza el agua de acuerdo a sus derechos durante todo el tiempo o si existe alguna variación en la aplicación de los mismos.

a) Cuenca del Maipo

La cuenca del río Maipo se encuentra en la zona central de Chile continental, extendiéndose entre los paralelos 32°55' y 34°15' latitud sur, drenando una superficie de 15 294 Km². La cuenca cubre la totalidad del territorio de la región metropolitana y una pequeña parte de las regiones de Valparaíso y del libertador Bernardo O'Higgins. Los climas que se distinguen corresponden a dos tipos (DGA y CADE-IDEPE, 2004a): clima templado mediterráneo con estación seca prolongada el cual se desarrolla prácticamente en toda la cuenca y que presenta una estación seca y un invierno bien marcados con temperaturas extremas que llegan a los cero grados. El segundo, es el frío de altura, localizado en la cordillera de los Andes por sobre los 3 000 metros de altura sobre el nivel mar, el cual presenta bajas temperaturas y precipitaciones sólidas que permiten la acumulación de nieve.

Esta cuenca presenta una superficie de 134 000 hectáreas de uso agrícola, de acuerdo al Censo Silvoagropecuario, de las cuales aproximadamente 128 000 se encuentran bajo régimen de riego. A su vez, el sistema de riego con mayor superficie es el método por surco con un 42%, luego el método de riego por goteo con un 27% y muy cerca el método de riego por inundación, conocido como riego por tendido con un 24% concluyendo que la mayor parte de la cuenca se riega de manera tradicional (INE, 2007).

i) Principales cultivos y tecnologías de riego

La cuenca del Maipo presenta una matriz de cultivos en el que predominan mayormente especies frutales y hortalizas, abarcando más del 50% de la superficie agrícola censada. Luego le siguen las forrajeras, cereales y viñas con casi un 40% de la superficie restante (INE, 2007). La distribución completa se observa en el cuadro 6.

Cuadro 6
Distribución de rubros agrícolas de la cuenca del Maipo
(En porcentajes)

Tipo de cultivo	Informantes	Superficie
Frutales	31,2	39,6
Hortalizas	29,2	18,9
Forrajeras	15,3	15,8
Cereales	9,1	11,9
Viñas y parronales viníferos	2,5	9,0
Leguminosas y tubérculos	10,6	4,2
Cultivos Industriales	0,3	0,3
Flores	1,8	0,1
Total	100,0	100,0

Fuente: INE, (2007).

Del total de cultivos censados se seleccionaron los 24 más representativos de la zona, considerando que éstos abarcan más del 85% del total del área cultivada, y/o que también tienen relevancia económica para las principales asociaciones de canalistas presentes en la cuenca (véase el cuadro 7).

Para el caso del Maipo se cuenta con información desagregada sobre el nivel de asociación de los canalistas. El cuadro 8 presenta la superficie bajo riego de cada uno de acuerdo al tipo de cultivo.

Cuadro 7
Cultivos representativos de la cuenca del Maipo

Rubro	Cultivo	Rubro	Cultivo
Cereal	Maíz	Forrajera	Alfalfa
Cereal	Trigo	Hortaliza	Acelga
Frutal	Almendo	Hortaliza	Betarraga
Frutal	Ciruelo E	Hortaliza	Cebolla
Frutal	Ciruelo J	Hortaliza	Choclo
Frutal	Cítrico	Hortaliza	Espinaca
Frutal	Duraznero	Hortaliza	Lechuga
Frutal	Nectarino	Hortaliza	Melón
Frutal	Nogal	Hortaliza	Tomate
Frutal	Palto	Hortaliza	Zanahoria
Frutal	Vid de mesa	Hortaliza	Zapallo
Frutal	Vid de vino	Tubérculo	Papa

Fuente: Elaboración del autor con base en información del INE, (2007).

Cuadro 8
Matriz de distribución de la superficie de cultivos más relevantes al interior de las
Asociaciones de Canalistas de la primera sección del río Maipo (2007)
(En porcentajes)

Cultivo/ Asociación	Asociación de Canalistas del Canal del Pirque	Asociación de Canalistas Sociedad Canal de Maipo (SCM)	Asociación Canal Huidobro	Asociación Canales Unidos de Buin (ACUB)	Asociación Canales de Maipo (ACM)	Asociación de Canalistas de Lo Herrera	Asociación de Canalistas Lonquen-La Isla
<i>Cereales</i>							
Maíz grano	12,87	0,28	3,31	3,33	3,31	2,78	9,91
Trigo	2,39	1,28	0,35	4,50	1,36	0,98	2,47
<i>Forrajeras</i>							
Alfalfa	21,08	29,24	0,95	3,43	15,26	8,99	6,80
<i>Frutales</i>							
Almendra	3,66	1,87	5,53	2,29	4,75	5,82	1,41
Ciruelo europeo	12,39	0,46	10,60	8,94	3,51	10,37	2,80
Ciruelo japonés	0,12	0,88	5,02	4,21	5,09	2,11	0,01
Duraznero	2,77	0,71	6,90	7,03	7,65	3,80	1,50
Limonero	0,03	0,05	1,03	0,23	0,59	0,49	1,75
Naranja	0,04	0,38	1,07	0,19	0,45	1,05	1,01
Nectarino	0,31	0,85	4,08	4,53	2,81	4,46	0,51
Nogal	17,75	2,68	8,70	8,99	12,90	24,58	4,98
Olivo	0,82	0,14	0,03	0,00	0,01	0,00	1,38
Palto	0,30	0,15	3,96	1,74	2,00	0,29	3,40
Vid de mesa	1,65	9,82	20,28	21,69	11,67	14,69	9,74
Vid de vino	19,51	10,31	22,73	16,95	6,60	10,09	48,50
<i>Hortalizas</i>							
Acelga	0,08	1,54	0,05	0,15	1,39	0,27	0,03
Betarraga	0,06	2,71	0,00	0,03	1,24	0,4	0,00
Cebolla	0,19	6,10	0,15	0,39	3,21	0,02	0,10
Choclo	1,49	0,73	0,53	2,99	0,67	2,51	0,31
Espinaca	0,02	5,10	0,00	0,02	0,61	0,00	0,00
Lechuga	0,02	12,29	0,12	0,46	3,46	0,01	0,01
Melón	0,01	2,24	0,04	0,12	0,26	0,14	0,22
Papa	1,56	3,55	2,91	4,34	6,82	4,41	0,95
Tomate	0,79	1,36	0,99	1,20	1,01	0,47	0,64
Zanahoria	0,08	3,68	0,01	0,01	0,09	0,00	0,00
Zapallo	0,00	1,59	0,66	2,26	3,27	1,29	1,58

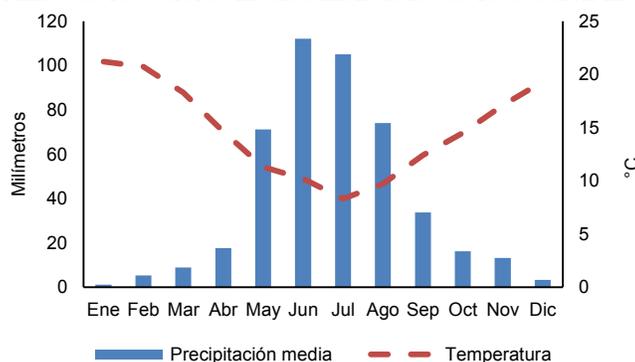
Fuente: Elaboración del autor con base en información de la Asociación de Canalistas y del INE, (2007).

ii) Estación meteorológica

Para la caracterización climática se utilizó la estación Pirque, perteneciente a la red de estaciones de la Dirección General de Aguas, ubicada en las coordenadas 33° 40' de latitud sur y 70° 35' de longitud oeste, que tiene un registro de datos a partir de 1967.

La temperatura media anual registrada en Pirque es de 14,4 °C, con una mínima de -1,7°C y una máxima de 30,6 °C. La precipitación de 445,5 mm al año. En el gráfico 2 se muestra el diagrama ombrotérmico, que presenta gráficamente las características climáticas de la zona de estudio.

Gráfico 2
Diagrama ombrotérmico de los valores medios mensuales de la estación meteorológica Pirque



Fuente: Elaboración del autor con base en información de la estación meteorológica Pirque.

iii) Serie de suelo representativa

Para la determinación de la serie de suelo más representativa se desarrolló un trabajo en SIG en el cual se realizó una intersección entre la capa correspondiente a la comuna de Pirque y otra correspondiente a los suelos expuestos en el estudio agrológico de CIREN (2005). Las series de suelo presentes en esta zona son las de Santiago, Huingan, Santa Sara, Clarillo, Estero Seco, Maipo, Asociación Challay y Los Morros, cuyas propiedades (principales) se muestran en el cuadro 9.

Cuadro 9
Series de suelo de la zona de Pirque

Serie suelo	Superficie (En hectáreas)	Superficie relativa (En porcentajes)	Textura	Profundidad (En centímetros)
Santiago	2 125,6	26,4	Franco arenosa	120
Huingan	1 932,2	24,0	Franca	120
Santa Sara	1 562,7	19,4	Franco arcillo-limosa	110
Clarillo	1 147,9	14,3	Franca	145
Estero Seco	630,7	7,8	Franca	125
Maipo	395,9	4,9	Franca	170
Asoc. Challay	189,2	2,4	Franco arcillo-limosa	100
Los Morros	63,2	0,8	Franca	110

Fuente: CIREN, (2005).

b) Cuenca del Limarí

Está ubicada en la zona semiárida del Chile continental, entre los valles de los ríos Choapa por el sur y Elqui por el norte, extendiéndose aproximadamente entre los 30°15' y 31° 10' latitud sur, con una superficie de 11 800 km². De acuerdo al estudio DGA y CADE-IDEPE (2004b), esta cuenca presenta tres tipos climáticos: el semiárido con nublados abundantes que se presenta a lo largo de la costa, con una influencia al interior de 40 km, por medio de los valles transversales y quebradas; clima semiárido templado con lluvias invernales, situado en el valle del río Limarí, el cual se caracteriza por ser un clima seco donde no hay excedentes hídricos; y por último un clima semiárido frío con lluvias invernales, localizado en la cordillera de los Andes por encima de los 3 000 metros sobre el nivel del mar. Este estudio se centró en la zona del valle de la cuenca, que es donde se encuentra la mayor parte de la superficie agrícola.

De acuerdo al censo silvoagropecuario (INE, 2007), la superficie agrícola es de 61 000 hectáreas aproximadamente, de las cuales cerca de 44 000 se encuentran bajo riego. El mismo estudio muestra que el 53% de la superficie cultivada se encuentra bajo riego por goteo o cinta, mientras que un 44% de la superficie está bajo de riego tradicional.

i) *Principales cultivos y tecnologías de riego*

De acuerdo al INE (2007), los principales rubros de esta cuenca son las forrajeras y frutales, abarcando cerca de un 75% de la superficie cultivada de la cuenca, mientras que los viñedos, uva para pisco y hortalizas corresponden a cerca del 21% de la superficie restante (véase el cuadro 10).

Cuadro 10
Distribución de rubros agrícolas en la cuenca del río Limarí
(En porcentajes)

Tipo de Cultivos	Informantes	Superficie
Forrajeras	16,9	41,3
Frutales	47,5	32,7
Viñas y parronales viníferos	14,2	13,5
Hortalizas	13,9	7,7
Cereales	3,0	3,4
Leguminosas y Tubérculos	3,6	0,7
Flores	0,9	0,6
Cultivos Industriales	0,1	0,0
Total	100,0	100,0

Fuente: INE, (2007).

Cuadro 11
Cultivos representativos de la cuenca del río Limarí

Rubro	Cultivo	Rubro	Cultivo
Cereal	Maíz	Hortaliza	Choclo
Cereal	Trigo	Hortaliza	Haba
Forrajera	Alfalfa	Hortaliza	Lechuga
Frutal	Almendro	Hortaliza	Melón
Frutal	Cítrico	Hortaliza	Pepino dulce
Frutal	Nogal	Hortaliza	Pepino ensalada
Frutal	Olivo	Hortaliza	Pimentón
Frutal	Palto	Hortaliza	Poroto granado
Frutal	Vid de mesa	Hortaliza	Poroto verde
Frutal	Vid de pisco	Hortaliza	Tomate
Frutal	Vid de vino	Hortaliza	Zapallo
Hortaliza	Alcachofa	Tubérculo	Papa

Fuente: Elaboración del autor con base en información del INE, (2007).

Cuadro 12
Distribución de tecnologías de riego para la zona de Monte Patria

Tecnologías de riego	Superficie (En hectáreas)	Porcentaje
Goteo y cinta	23 272	53
Tendido	11 630	26
Surco	7 778	18
Microaspersión y microjet	486	1
Carrete o pivote	400	1
Otro tradicional	389	1
Aspersión tradicional	93	0
Total	44 047	100

Fuente: INE, (2007).

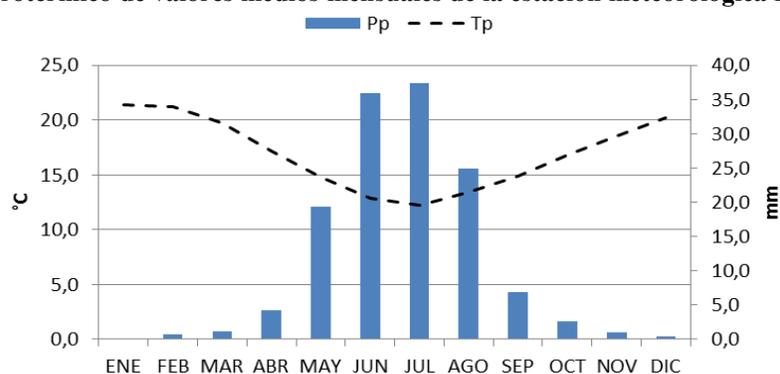
Del total de cultivos censados se seleccionaron los más representativos de la zona (24), considerando que abarcaran más del 85% del total del área cultivada, y/o que tuvieran relevancia económica para las principales asociaciones de canalistas presentes en la cuenca (véase el cuadro 11).

De esta misma forma, se determinó la superficie regada, de acuerdo a las diferentes tecnologías de riego presentes en la zona del Monte Patria (véase el cuadro 12).

ii) Estación meteorológica

Para la caracterización climática se utilizó la estación Embalse La Paloma perteneciente a la red de estaciones de la Dirección General de Aguas, ubicada en la coordenada 30° 41' latitud sur y 71° 2' longitud oeste, cuyo registro de información climática está desde el año de su inauguración en 1943. La estación registra una temperatura media anual de 17,0°C, con una mínima de 6,4°C y una máxima de 29,3°C. La precipitación media anual alcanza los 135,1 mm. El gráfico 3 muestra su diagrama ombrotérmico, en el que se presentan los montos de precipitación y temperatura media mensual.

Gráfico 3
Diagrama ombrotérmico de valores medios mensuales de la estación meteorológica Paloma Embalse



Fuente: Elaboración del autor con base en información de la estación meteorológica embalse La Paloma.

iii) Series de suelo

Para la elección de las series de suelo se desarrolló la misma metodología descrita con anterioridad. Las series de suelo presentes en esta zona son la de Tuqui, Serón y Huamalata, cuyas propiedades principales se muestran en el cuadro 13.

Cuadro 13
Series de suelo en la zona de Monte Patria

Serie suelo	Superficie (En hectáreas)	Superficie relativa (En porcentajes)	Textura	Profundidad (En centímetros)
Tuqui	14 359,9	89,7	Franco arcillosa	85
Huamalata	1 611,4	10,1	Franco ar limosa	120
Serón	32,6	0,2	Franco arcillosa	85

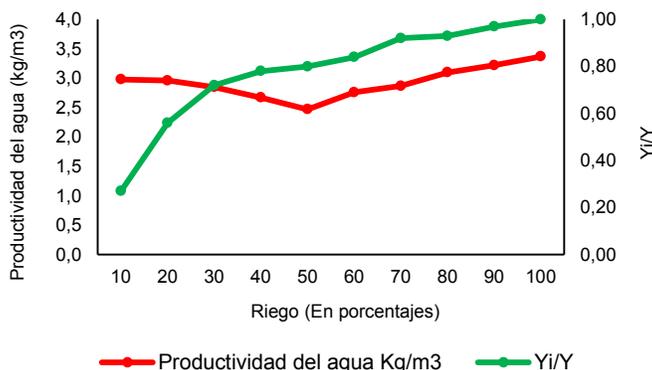
Fuente: CIREN, (2005).

3. Modelo de predicción de Impactos

Como eje de la simulación de los efectos que tiene el menor uso de agua sobre la productividad primaria (biomasa) y rendimientos de los cultivos se utilizó como base el modelo Plant Growth Model, el cual se calibró buscando representar de manera correcta la fenología en cada una de las zonas de estudio y a su vez, reproducir los rendimientos reportados en las estadísticas gubernamentales y en la literatura.

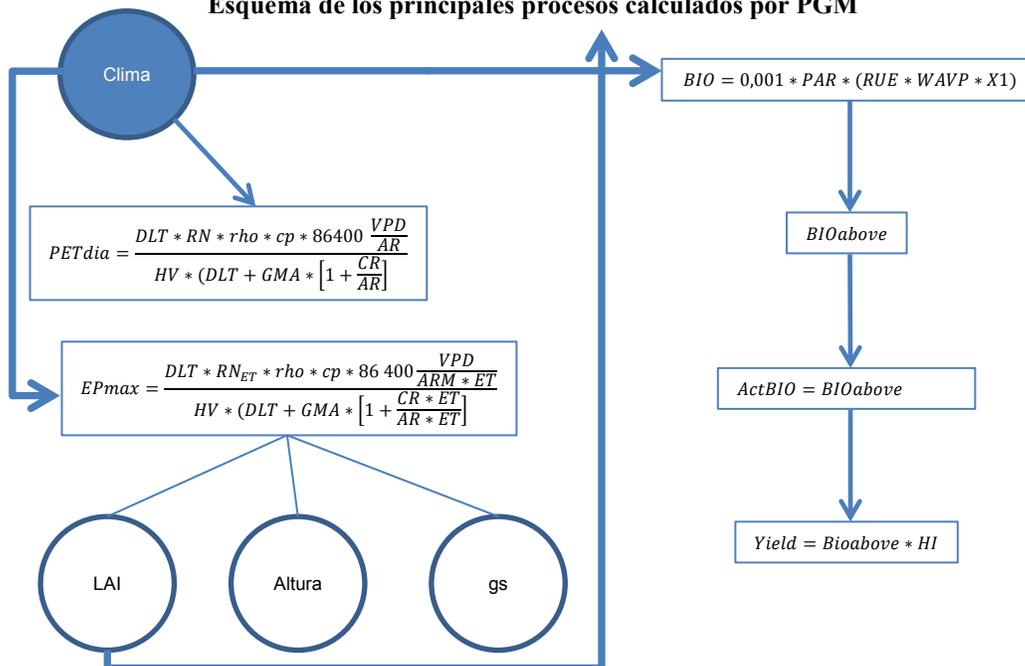
El esquema general de funcionamiento del modelo se presenta en el diagrama 1.

Gráfico 4
Rendimiento relativo y productividad media del agua de un cultivo de vid de mesa frente a distintos niveles de satisfacción de la evapotranspiración máxima^a



Fuente: Elaboración del autor con base en las estimaciones correspondientes.
^a En este caso los coeficientes que mejor describen el fenómeno son k = 4,72 y b = 0,29.

Diagrama 1
Esquema de los principales procesos calculados por PGM



Fuente: Adaptado de Sieber y Purkey (2015). PET_{dia}: Evapotranspiración potencial diaria, DLT: Pendiente de la relación presión de vapor temperatura, RN: Radiación neta, rho: Densidad del aire, cp: Calor específico a presión constante, VPD: Déficit de presión de vapor, AR: Resistencia aerodinámica, HV: Calor latente, GMA: Constante psicrométrica, CR: Resistencia de la cubierta vegetal. EP_{max}: Evaporación máxima. LAI: Índice de área foliar, gs: Conductancia de los estomas, BIO: Biomasa acumulada, PAR: Radiación fotosintéticamente activa, RUE: Eficiencia de uso de la radiación. WAVP*X1: Fracción de la radiación interceptada, Bioabove: Biomasa sobre la superficie del suelo, ActBio: Biomasa en activo crecimiento, REG: Factores de restricción por agua y temperatura. Yield: Rendimiento, HI: Índice de cosecha.

4. Selección de alternativas de adaptación

Se sabe que el cambio climático podría exacerbar los riesgos existentes de la producción agrícola. Frente a ello es necesario identificar un número de prácticas e intervenciones que permitan disminuir los efectos negativos de los impactos del cambio climático o bien maximizar los efectos positivos que se identifican en estas nuevas condiciones.

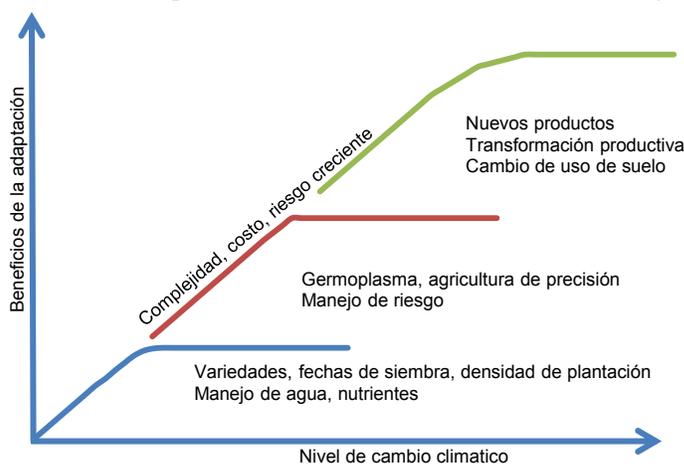
La adaptación es un proceso de toma de decisiones que está condicionado por las capacidades de la población, su interpretación de los riesgos, acceso a financiamiento y nivel de familiaridad con la efectividad de las medidas, entre otros.

Algunas de las medidas son de carácter autónomo puesto que corresponden a decisiones que son tomadas directamente por los agentes productivos en función de sus características y posibilidades. Entre ellas se encuentran los ajustes de fechas de siembra o plantación, uso de insumos, selección de variedades y especies, distribución de recursos productivos, etc. También se considera de nivel autónomo a aquellas que corresponden a inversiones para mejoras o saltos tecnológicos como podría ser el caso de cambios en sistemas de riego.

Existe un número de alternativas de adaptación que, por su tamaño y naturaleza, impactan en sectores completos y que no corresponden a los agentes individuales. Un ejemplo clásico de las medidas exógenas son las políticas públicas, subsidios, seguros y la inversión en infraestructura mayor.

Un segundo nivel de clasificación de la adaptación se refiere a los beneficios posibles que pueden traer consigo y que son el resultado de cambios pequeños que producen beneficios incrementales que derivan en decisiones de mayor envergadura que generan cambios transformacionales (véase el diagrama 2).

Diagrama 2
Clasificación de medidas de adaptación en función del nivel transformativo y sus potenciales beneficios



Fuente: Adaptado de Howden, (2010)

El plan de adaptación silvoagropecuaria para Chile, plantea diversas medidas, que abarcan tanto una mejora en las condiciones para enfrentar eventos extremos como la búsqueda de mejorar la competitividad del sector agrícola.

Con respecto a la relación agricultura y recursos hídricos, Iglesias y Garrote (2015) realizan una exhaustiva revisión de literatura, que ha permitido segmentar las medidas más promisorias e identificar aquellas que sí podrían ser evaluadas cuantitativamente en forma preliminar (véase el cuadro 14).

Algunas de las medidas preseleccionadas no pueden ser evaluadas con propiedad en ausencia de herramientas apropiadas para dimensionar su magnitud y evaluar su factibilidad. Tal es el caso de las obras de infraestructura mayor que, aun cuando se dispone de valores medios de costo por unidad de agua almacenada, no se pueden evaluar las externalidades ni los costos adicionales en ausencia de un mayor nivel de especificación.

El caso de embalses mayores requiere de un estudio hidrológico que evalúe la factibilidad de generar un volumen a embalsar requerido para enfrentar el cambio climático en función de los caudales actuales y futuros. El lugar de emplazamiento es otra de las variables que inciden directamente en el costo.

Cuadro 14
Listado de medidas de adaptación pertinentes para mejorar el manejo
de recursos hídricos en el sector agrícola

Necesidades de adaptación	Medida	Mecanismo para abordar impacto de cambio climático	
I. Mejora en la capacidad adaptativa y resiliencia	1) Implementar planes regionales de adaptación	Aumenta la efectividad de medidas de adaptación	
	2) Mejoras en sistemas de monitoreo y alerta temprana	Mitiga consecuencias de eventos adversos	
	3) Mejora en coordinación	Aumenta la efectividad de medidas de adaptación	
	4) Innovación y tecnología	Aumenta la efectividad de medidas de adaptación y reduce costos	
II. Respuesta a cambios en la disponibilidad de agua	5) Innovación en el uso eficiente del agua	Aumenta la disponibilidad de agua	
	6) Mejoras en la retención de agua en suelos	Aumenta la eficiencia en el uso de agua	
	7) Tanques de acumulación de pequeña escala	Aumenta la flexibilidad en el manejo de agua a escala local	
	8) Mejorar la capacidad de los reservorios	Aumenta la flexibilidad en el manejo de agua y disponibilidad de agua a escala regional	
	9) Reutilización de agua	Aumenta la disponibilidad	
	10) Mejoras en los sistemas de tarificación de aguas y mercado	Disminuye ineficiencias de uso	
	11) Renegociación de acuerdos de asignación de agua	Aumenta eficiencia de uso de agua	
	12) Establecer prioridades de uso claras	Aumenta eficiencia en el uso de agua	
	13) Integrar demandas en sistemas de uso conjunto	Aumenta la flexibilidad y disponibilidad del manejo de agua	
	III. Respuestas a inundaciones y sequías	14) Crear o restaurar humedales	Reduce crecidas
		15) Mejorar planes de inundaciones	Reduce vulnerabilidad a crecidas
16) Mejorar sistemas de drenaje		Reduce duración y extensión de crecidas	
17) Establecer agricultores como custodios de planicies inundables		Disminuye el riesgo de daños por inundación	
18) Defensas fluviales		Disminuye el riesgo de daños causados por inundación	
19) Aumentar la capacidad de intercepción de lluvias		Reduce crecidas a nivel local	
20) Introducir cultivos resistentes		Aumenta la eficiencia en el uso de agua	
21) Seguros frente a inundaciones o sequías		Disminuye pérdidas al agricultor	
22) Cambios en patrones de cultivos y en variedades		Disminuye el riesgo económico para los agricultores	
IV. Respuesta a incremento en los requerimientos de agua	23) Implementar prácticas que ayuden a retener el agua en los suelos	Disminuye necesidad de agua para los cultivos	
	24) Desarrollar cultivos resistentes a cambio climático	Mitiga impactos del cambio climático	
V. Respuestas a cambios de uso de suelo agrícola	25) Reubicación de la industria procesadora	Mantiene la actividad industrial	
	26) Adición de materia orgánica a suelos	Recupera la funcionalidad de los suelos	
	27) Introducción de nuevas áreas bajo riego	Desarrolla nuevas áreas productivas	
VI. Respuestas a deterioro en la calidad de suelos	28) Mejorar eficiencia en la fertilización nitrogenada	Reduce contaminación difusa	
	29) Manejo de suelos y cero labranza	Reduce la erosión y mejora la de retención de agua	
	30) Proteger contra la erosión de suelos	Reduce la degradación de tierras	
VII. Respuesta a pérdidas de biodiversidad	31) Aumento de asignación de agua a ecosistemas	Mejora los servicios ecosistémicos	
	32) Mantener corredores biológicos	Mejora la biodiversidad	
	33) Mejorar la diversificación de cultivos	Mejora la biodiversidad	

Fuente: Iglesias y Garrote, (2015).

En este trabajo se han seleccionado un conjunto de alternativas que pueden ser consideradas atractivas para la adaptación del sector frente al cambio climático en lo que respecta a disminuir la demanda por recursos hídricos.

El cuadro 15 contiene la información de síntesis de las medidas seleccionadas en forma preliminar al estudio.

El caso de plantas desalinizadoras puede resultar de alto interés, incluso en situaciones de incertidumbre sobre los precios de la energía, toda vez que muchas de ellas han evolucionado para incorporar energía solar en el proceso. Sin embargo la ubicación de la planta y la distancia al punto de demanda son variables de gran incidencia en el costo total, de modo que no es posible evaluarlas sin incurrir en supuestos que pueden sesgar el análisis.

Finalmente el revestimiento de canales puede ser considerado como una intervención que busca reducir pérdidas y mejorar la resiliencia de los sistemas al cambio climático sin embargo, la impermeabilización de grandes trayectos podría afectar los patrones de recarga generando más inconvenientes en los usuarios de aguas subterráneas y en los ecosistemas que dependen de esta dinámica que los eventuales beneficios generados.

Es por ello que se ha preferido agrupar las medidas de adaptación en tres grandes grupos que deben ser evaluados cada uno con una metodología específica. Éstos son:

- i) Medidas tendientes a mejorar la gestión de los recursos hídricos.
- ii) Medidas relativas a mejoras en los sistemas de riego avanzando (de mayor tecnología).
- iii) Medidas tendientes a ampliar la oferta por la vía de una mejor gestión de la variabilidad temporal de los caudales utilizando tranques de acumulación nocturna o estacional.

Cuadro 15
Alternativas consideradas en la métrica costo-efectividad

Set de medidas para métrica de costo efectividad			
Medida	Nombre	Variable	Descripción
De infraestructura mayor	Embalse	Características	Proyecto de acumulación de agua con capacidad de almacenamiento de al menos 2 MM de m ³ , revestido y destinado principalmente a riego.
		Costo ^a (CLP)	956 desviación ± 596
		Unidad	m ³ N° datos 11
		Comentarios	Se evaluaron distintas obras de embalsamiento de aguas representativas de Chile como el embalse La Paloma, Puclaro, Recoleta, entre otros ajustando los valores otorgados por IPC a abril de 2016. Se consideraron obras que van desde los 2 hasta más de 140 MM de m ³ .
	Literatura considerada	-Grandes obras y proyectos de infraestructura de riego, MOP, 2013. -Embalse Chonchi, DOH, 1975 -Construcción de un embalse en río Chillan, MOP, 2012	
	Revestimiento de canales	Características	Obras (generalmente co-financiadas por el programa de fomento al riego de la CNR) que buscan revestir canales agrícolas por medio del encausamiento efectivo para que se reduzcan las pérdidas de agua por infiltración y/o desborde.
		Costo (CLP)	1 770 desviación ± 643
		Unidad	m ³ N° datos 7
		Comentarios	Los valores obtenidos corresponden a las obras ganadoras del proyecto de fomento al riego en las regiones de Atacama, Coquimbo, Metropolitana y O'Higgins.
	Literatura considerada	-Resultados de los concursos de ley 18.450 al fomento a obras de riego y drenaje (del CNR) -Tranques intraprediales dan nueva vida a obras de secano. Reportaje. Indap, 2012.	
	Desalinización de aguas	Características	Método para extraer la sal del agua generalmente utilizando osmosis inversa (los costos entregados aquí corresponden a la aplicación de este método)
		Costo (CLP)	320 desviación ± 118
Unidad		m ³ N° datos 5	
Comentarios		Dado que es un método relativamente reciente se espera que con los años el costo de producir un metro cúbico disminuya aún más, bordeando los USD \$0.2. Solo existe un proyecto en operación de envergadura en Chile, correspondiente a Aguas Antofagasta.	
Literatura considerada	-Aguas Antofagasta, reporte anual, 2014. -Evaluación técnico-económica de obtención de agua para riego a partir de aguas salobres utilizando energía solar. Universidad de Chile (2010). -Procesos, costos y proyectos: Desalinización en la industria minera. Reportaje revista electricidad (2014).		
Reutilización de agua	Características	Corresponde a la toma de aguas grises (las que resultan del uso doméstico domiciliario, como lavado de utensilios, ropa o la proveniente del baño) y su posterior filtrado y desinfección por medio de varios métodos a fin de ser reutilizadas para diversos fines. El objetivo es la obtención de agua para riego.	
	Costo (CLP)	242 desviación ± 48	
	Unidad	m ³ N° datos 4	
Comentarios	Desde 2003, el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) ha evaluado diversos métodos de limpieza de aguas grises para reuso a nivel domiciliario. Los precedentes actuales en agricultura de riego hacen relación al tratamiento de aguas servidas.		

Cuadro 15 (continuación)

		Set de medidas para métrica de costo efectividad		
Medida	Nombre	Variable	Descripción	
	Literatura considerada		-Evaluación de alternativas de sistemas paralelos de reuso de agua grises en un edificio público. Eyllin Morales (2003). Universidad de Concepción. -Tratamiento y reutilización de agua grises con aplicación en Chile. María Franco (2007). Universidad de Chile.	
	Tranques	Características	Técnica de acumulación de agua a nivel predial, comúnmente denominado embalse de regulación corta. Funciona por intervalos de tiempo, generalmente acumulando agua por las noches o el fin de semana considerando que en periodos de sequía o bajo caudal el agua se entrega por turnos. Su volumen oscila entre los 3 500 a 50 000 m ³ .	
		Costo (CLP)	1 767	desviación ± 643
		Unidad	m ³	Nº datos 7
		Comentarios	Considera información tanto de literatura como de propuestas a la construcción de tranques intraprediales (o embalses de regulación corta) en el marco de la ley 18.450 de fomento a las obras de riego y drenaje.	
	Literatura considerada		-www.redagricola.cl -www.indap.gob.cl -Resultados concursos ley 18.450 de fomento a obras de riego y drenaje, publicados por el CNR.	
Sistemas de riego				
De infraestructura predial	Goteo	Características	Sistema de riego localizado planta a planta, que entrega el agua de forma parcializada mediante un goteo de frecuencia constante. De esta forma, se riega efectiva y localizadamente la zona de influencia de raíces.	
		Costo (CLP)	2 562 224	desviación ± 558 412
		Unidad	ha	Nº datos 23
		Comentarios	La eficiencia del sistema puede alcanzar incluso el 95% de agua aprovechada. El valor entregado corresponde a costos de inversión para la instalación del sistema.	
	Aspersión	Características	Método de aplicación de agua mediante "Huvia" localizada, lo que implica que en casi todos los casos el follaje de las plantas se moje. La distancia entre aspersores debe estar bien determinada para evitar solapamientos excesivos y/o zonas en donde no caiga agua.	
		Costo (CLP)	2 264 073	desviación ± 419 362
		Unidad	ha	Nº datos 14
		Comentarios	El sistema puede alcanzar eficiencia aproximadas de 80%. El costo expuesto corresponde al de inversión y considera tanto aspersores fijos como sistema de aspersión por carrete.	
	Pivote central	Características	Sistema de aspersión utilizado para regar grandes superficies de forma circular. Una característica es que se adapta a las ondulaciones del terreno, de modo que aunque no sean planos también pueden ser regados. No es compatible con zonas de pendiente moderada a alta.	
		Costo (CLP)	2 826 394	desviación ± 298 797
		Unidad	ha	Nº datos 12
		Comentarios	Su eficiencia puede llegar hasta el 90%. Requiere grandes superficies para justificar la inversión y disminuir los costos de producción en el mediano plazo por ahorro en el consumo de agua. El costo presentado corresponde a costos de inversión actualizados.	
	Cinta de riego	Características	Sistema que aplica pequeños caudales localizados en un número variable de puntos de emisión. Pueden utilizarse las cintas enterradas en el suelo para proporcionar un bulbo de mojado directo.	
		Costo (CLP)	3 166 579	desviación ± 745 000
		Unidad	ha	Nº datos 4
		Comentarios	Los datos corresponden a los costos de inversión para proyectos desarrollados en las regiones de Arica y Parinacota, Coquimbo y Maule. El sistema puede llegar a eficiencias de hasta el 95%.	
	Superficial	Características	Considera la aplicación de agua a un terreno cultivado aprovechando la fuerza de la gravedad para mover el agua ya sea por surcos entre hileras o por la superficie completa de cultivo. Se requieren altas cantidades de agua para cubrir completamente el terreno.	
		Costo (CLP)	737 194	desviación ± 463 384
	Unidad	ha	Nº datos 6	
	Comentarios	El valor entregado corresponde a una cifra promedio de costos de inversión entre sistemas por surco, tendido y californiano (el más caro). Es el sistema con la más baja eficiencia de riego (30-40%) de modo que pese a su bajo costo de implementación puede a la larga representar un costo mayor.		
	Literatura considerada		-Manual de riego para el sur de Chile. INIA Carillanca, 1994. -Mejoramiento del sistema de riego en el río Carmen, Región de Atacama. CIREN, 2001. -Manual de diseño de sistemas de riego tecnificado. U de Talca, 2001. -Resultados concursos ley 18.450 de fomento a obras de riego y drenaje, publicados por el CNR.	

Cuadro 15 (conclusión)

Set de medidas para métrica de costo efectividad					
Medida	Nombre	Variable	Descripción		
De gestión de recurso	Cosecha/captación de aguas				
	Zanja de infiltración	Características	Construidas para captar y almacenar la escorrentía procedente de cotas superiores, construidas transversalmente a la dirección de la pendiente y sin desnivel.		
		Costo (CLP)	6 108	desviación	± 2 508
		Unidad	m ³	Nº datos	17
		Comentarios	El valor considerado es por metro cubico aprovechado en la zanja. Es un sistema de captación de corta duración ya que el agua termina infiltrando con el paso de los días.		
	Canales de desviación	Características	Tienen como objeto interceptar, desviar y conducir el agua de escorrentía proveniente de laderas altas hacia drenajes o estructuras de almacenamiento.		
		Costo (CLP)	5 928	desviación	± 2 124
		Unidad	m ³	Nº datos	9
		Comentarios	Muy efectivo si se utiliza como complemento a la fuente de agua de tranques intraprediales, siempre y cuando la topografía del terreno lo permita. Se considera fuente adicional de agua.		
	Diques de gaviones	Características	Infraestructura realizada con piedra y malla de alambre galvanizada y diseñada para disminuir o controlar los procesos de transporte sólido y de erosión de lecho.		
		Costo (CLP)	62 464	desviación	± 25 095
		Unidad	m ³	Nº datos	4
		Comentarios	Aunque puede ser utilizada como una estructura de almacenamiento o retención de agua, su diseño está más orientado reducción la erosión.		
	Diques de polines	Características	A diferencia del caso anterior, para detener el curso de agua se utilizan polines, postes transversales impregnados.		
		Costo (CLP)	39 617	desviación	± 12 356
		Unidad	m ³	Nº datos	6
		Comentarios	Dado que el material es menos resistente, se utiliza más bien en cauces de poca envergadura, como pequeñas cárcavas y canales de regadío.		
	Empalizadas	Características	Las empalizadas transversales tienen como función la protección de quebradas y cursos de agua. Esta estructura no presenta vertedero.		
		Costo (CLP)	40 516	desviación	± 14 423
		Unidad	m ³	Nº datos	7
	Comentarios	La estructura puede llegar a ser débil ante grandes caudales.			
Limanes	Características	Terraza consistente en un semicírculo con un murete de piedras. Utilizado en lugares de poca pendiente para captación externa (aguas lluvias).			
	Costo (CLP)	76 097	desviación	± 40 945	
	Unidad	m ³	Nº datos	4	
	Comentarios	La alta variabilidad en el costo es debida a una alta variación espacial. Si bien son sistemas de captación, son utilizados de forma local para regar ciertos cultivos forestales.			
	Literatura considerada	-Revisión y análisis de prácticas tradicionales de conservación de aguas y suelos en zonas áridas y semiáridas de Chile central. Universidad de Talca, 2003.			

Fuente: Elaboración del autor con base en la revisión de literatura.

^a Los valores presentados como costos, dado que provienen de distintas fuentes, regiones y años fueron ajustados por IPC al mes de abril de 2016.

5. Estimación del costo de las medidas de adaptación

a) Costo de no adaptación

En este trabajo se ha fijado una línea base que corresponde a mantener la estructura productiva y evaluar la pérdida económica que genera el exponer la matriz de cultivos en cada localidad a distintos niveles de restricción de agua, consistentes a escenarios de cambio climático.

Para estimar el costo de no acción (o no adaptación) se utiliza el siguiente algoritmo:

- i) Determinar la evapotranspiración potencial de agua de la matriz de cultivos en el escenario actual (Histórico = Hist).
- ii) Estimar la productividad de los cultivos empleando la función:

$$Y_{j,Hist} = \frac{Ymax_j}{1 + e^{\left[-k \frac{ETr_j}{ETmax_{j,Hist}} + b\right]}}$$

iii) Determinar la evapotranspiración potencial en los períodos futuros que implican incrementos de 1, 2, 3 y 4 °C (Cambio Climático = CC).

iv) Estimar la nueva productividad frente a reducciones de oferta determinada por el factor f.

$$Y_{j,CC} = \frac{Ymax_j}{1 + e^{\left[-k \frac{ETr_j * f}{ETmax_{j,CC}} + b\right]}}$$

v) El costo de no adaptación por estrés hídrico frente a cambio climático se estima como:

$$\text{Costo de no adaptación} = \sum_j P_j (Y_{j,Hist} - Y_{j,CC}) * \text{Área}_j$$

En esta secuencia se tiene que: Y es el rendimiento del cultivo j en el escenario histórico (Hist) o de cambio climático (CC); ETr y ETmax corresponden a las evapotranspiraciones reales y máximas de cada escenario y f corresponde al factor de restricción de la demanda tal que se ajuste a la oferta; k y b son parámetros que describen la forma funcional de la relación rendimiento versus evapotranspiración; Pj corresponde al precio del producto cosechable asociado al cultivo j y el área corresponde a la superficie sembrada (plantada) del cultivo j.

El cuadro 16 resume la matriz de coeficientes empleados para la evaluación económica de las pérdidas productivas de los distintos cultivos que se encuentran en la zona de estudio.

Cuadro 16

Coefficientes de la función de producción de cada una de las especies presentes en el área de estudio

Tipo	Cultivo	Precio por kilo o unidad (En CLP)	Rendimiento (unitario o kg/ha)	Costo (En miles de CLP/ha)	Fuente (Ficha técnica)
Vegetales	Brócoli	103	32 000	3 294	ODEPA 2015, RM
	Repollo	150	35 000	2 964	ODEPA 2015, O'Higgins
	Zanahoria	12	250 000	1 975	ODEPA 2012, O'Higgins
	Coliflor	110	28 000	2 581	ODEPA 2012, RM
	Apio	150	34 000	3 494	ODEPA 2014, RM
	Ajo	700	15 000	6 116	ODEPA 2015, O'Higgins
	Lechuga	160	42 000	3 783.	ODEPA 2014, RM
	Cebolla	120	60 000	4 167	ODEPA 2015, O'Higgins
Solanáceas	Espinaca	3 000	1 400	3 073	ODEPA 2013, RM
	Pimentón	4 400	1 800	5 617	ODEPA 2013, RM
	Tomate	3 000	3 000	2 438	ODEPA 2014, RM
Cucurbitáceas	Pepino	3 500	1 700	4 247	ODEPA 2014, RM
	Zapallo	100	28 000	1 915	ODEPA 2012, RM
	Zapallo italiano	3 000	1 600	3 053	ODEPA 2014, RM
	Melón	260	30 000	4 131	ODEPA 2013, O'Higgins
	Sandia	950	9 200	4 774	ODEPA 2013, O'Higgins
Tubérculos	Betarraga	200	40 000	5 703	ODEPA 2013, RM
	Papa	190	26 000	3 619	ODEPA 2015, RM
Legumbres	Poroto verde	9.000	290	2 020	ODEPA 2012, O'Higgins
	porotos	85 000	22	1 336	ODEPA 2012, O'Higgins
	Haba	5 000	500	1 581	ODEPA 2014, RM
	Lenteja	75 000	11	730	ODEPA 2012, O'Higgins
	Arvejas	7 500	320	1 966	ODEPA 2012, O'Higgins
Vegetales perennes	Alcachofa	90	70 000	4 218	ODEPA 2013, RM
	Espárrago	900	5 000	3 417	ODEPA 2014, RM
Cereales	Trigo	16 280	50	510	ODEPA 2013, Biobío
	Maíz	12 687	150	1 811	ODEPA 2015, RM
	Arroz	18 784	70	1 283	ODEPA 2014, Maule

Cuadro 16 (conclusión)

Tipo	Cultivo	Precio por kilo o unidad (En CLP)	Rendimiento (unitario o kg/ha)	Costo (En miles de CLP/ha)	Fuente (Ficha técnica)
Frutales	Uva de mesa	300	30 000	4 153	ODEPA 2012, O'Higgins
	Limón	160	45 000	6 550	ODEPA 2015, RM
	Palto	550	9 000	3 110	ODEPA 2010, V y RM
	Olivo	700	3 000	978	ODEPA 2013, O'Higgins
	Almendro	650	5 000	2 491	ODEPA 2013, RM
	Durazno	220	30 000	2 870	ODEPA 2015, RM
	Ciruela	900	8 000	4 301	ODEPA 2015, O'Higgins
	Cerezo	1 200	9 000	6 090	ODEPA 2013, O'Higgins
	Manzana	128	50 000	4 498	ODEPA 2013, Maule
	Pera	200	30 000	3 547	ODEPA 2013, Biobío
	Kivi	152	30 000	3 359	ODEPA 2013, Maule
	Nogal	1 800	5 000	4 598	ODEPA 2013, RM
Berries	Arándano	1 600	19 000	11 281	ODEPA 2015, O'Higgins
	Frutilla	500	65 000	21 551	ODEPA 2015, RM
	Frambuesa	917	8 000	4 970	ODEPA 2013, Biobío

Fuente: Elaboración propia con base en información de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) del Ministerio de Agricultura.

b) Costo de medidas de gestión

Este conjunto contiene medidas tendientes a maximizar la eficiencia de los sistemas de riego existentes y a corregir prácticas que permiten un manejo sub-óptimo del riego. El acceso a información meteorológica, charlas y capacitación, instalación de sitio demostrativos, días de campo y la asesoría individual de los productores son algunos de los ejemplos que permitirían una mejora en la práctica del riego llevando a cada sistema a su máxima eficiencia teórica.

No hay muchos casos de evaluaciones económicas de tales programas en la literatura. Crean *et al.* (2003) realizaron una evaluación sistemática de los impactos económicos, ambientales y sociales de la agricultura de New South Wales (Australia) respecto a la eficiencia en el uso de agua. El principal vehículo de intervención fue un curso para 4 400 agricultores de riego aproximadamente, en el que se concluyó la existencia de un avance gradual en la adopción de mejores prácticas de riego y el logro de 90 millones de dólares como beneficio respecto a una inversión de 20 millones².

Para evaluar los costos y la efectividad de un programa análogo se simuló el impacto que tendría uno de asesoría a los productores que incluyera la asistencia de un profesional y gastos de operación para realizar talleres y pequeñas intervenciones. En dicho sistema, el experto debe realizar dos visitas técnicas a cada uno de los productores. La métrica de eficacia corresponde a la modificación de la eficiencia de riego desde el valor inferior (supuesto de situación actual) al superior en un plazo de 10 años. El impacto en los productores se simula mediante una curva de adopción de prácticas sigmoidea en el tiempo. Para el caso de una localidad de 5 500 ha y con 439 propietarios (datos correspondientes al censo agrícola de 2007) el programa tendría un costo anual aproximado de 70 000 dólares, el cual se encuentra en la escala de magnitudes según lo reportado por Crean *et al.* (2003).

El número de programas se determina en función del número de explotaciones agrícolas a visitar, independientemente de su tamaño (se asume que un profesional dispone de 300 días para realizar vistas y que debe tener al menos dos visitas por productor al año), y su impacto se asigna de manera proporcional (a cada cultivo) de acuerdo a la superficie que ocupa en la localidad.

Puesto que el impacto en eficiencia tiene un límite en cada sistema de riego y que el objetivo no es un cambio en el método de riego per se (cosa que será abordada en el segundo grupo de medidas) existe un límite teórico de este tipo de intervención frente a cambios en la disponibilidad de agua. Si este límite es excedido por la brecha que genera el cambio climático, al costo del programa se le suma la pérdida de productividad igual que en la sección anterior.

² Corresponde a dólares australianos del año 2002.

Cuadro 17
Niveles de eficiencia de aplicación por sistema de riego
(En porcentajes)

Sistema de Riego	Eficiencia inferior	Eficiencia superior
Tendido	20	30
Surco	40	50
Aspersión	70	85
Pivote	70	85
Goteo y cinta	85	95
Micro-aspersión	90	95
Platabanda	50	60

Fuente: Elaboración del autor con base en simulaciones realizadas utilizando información del censo agrícola de 2007.

El cuadro 17 reporta la eficiencia inferior y superior de cada tipo de sistema de riego, los coeficientes para determinar el costo y el efecto que tendría implementar un sistema orientado a la gestión. Si la brecha es corta, el efecto se alcanza incluso en fracciones de programa lo que puede ser representado, en términos de costos, como un programa que se declara “exitoso” en menos de 10 años.

c) Costo de las medidas de transformación del sistema de riego

La inversión en tecnología ha sido una de las vías de transformación productiva más eficaces a la hora de explicar el desarrollo productivo de algunas localidades. En materia de riego, la adopción de sistemas presurizados ha permitido reducir el consumo de agua por unidad de superficie. No obstante a la fecha, esta intervención ha estado asociada a la incorporación de nuevas superficies lo que en el contexto de cambio climático implica que cada metro cúbico de consumo de agua por un sector agrícola es utilizado inmediatamente por una nueva explotación agrícola y por lo tanto, no se materializa la adaptación sino más bien se crea una situación de mayor exposición al riesgo (véase el trabajo de Vicuña et al. 2014 donde se describe el caso del Limarí que ilustra esta situación de manera muy clara).

En este trabajo se supone que los ahorros en el uso de agua serán destinados únicamente a fortalecer las condiciones de la matriz de cultivo actual para enfrentar el cambio climático y que no hay superficies adicionadas. De manera análoga, tampoco se considera el abandono de tierras productivas como una opción de adaptación, aun cuando experiencias de sequías recientes indican que podría ser el mecanismo preferido por algún tipo de productores frente a reducciones en la disponibilidad de agua.

Para evaluar el impacto económico de este tipo de medidas de inversión en tecnología e infraestructura de riego se diseñó un modelo de optimización con las siguientes características:

- i) La brecha entre demanda y oferta futura (representada como restricciones de la demanda actual entre 10 y 40%) puede ser cubierta única y exclusivamente por una matriz de superficie de cultivos que generen una nueva eficiencia.

En términos matemáticos (Vicuña, et al 2014):

E_k es la eficiencia de riego del sistema (k) del cultivo

S_k corresponde a la superficie del cultivo que utiliza esa tecnología (ha)

S_T es igual a la superficie total (ha)

Luego

$$Ef = \sum_k \frac{E_k * S_k}{S_T}$$

- ii) El problema de optimización (programación lineal) queda planteado como:

$$\min[FO] = \min \left[\sum_k S_k * C_k \right]$$

C_k es el costo de implementar el sistema de riego k (unidad monetaria/ha/año)

Las siguientes restricciones aplican en este modelo:

- No negatividad de las superficies de riego.
- La eficiencia alcanzada debe ser igual o superior a la eficiencia objetivo de la adaptación.
- Irreversibilidad de decisiones que impliquen la adopción de tecnologías de sistemas de riego presurizados.
- Las únicas superficies sujetas a cambio corresponden a las destinadas a riego superficial.
- Restricciones agronómicas específicas de los sistemas de riego que no pueden implementadas de manera homogénea en todos los cultivos (por ejemplo: no es posible un cultivo de trigo con sistema de riego por goteo).

Se asume que cada cultivo en la matriz es una unidad que debe realizar su proceso de optimización para mejorar la eficiencia. En este sentido, el resultado del modelo podría mejorar si se permite que los incrementos de eficiencia fuesen absorbidos libremente por la matriz de cultivos a fin de que los cultivos se integren a la matriz.

d) Costo de las medidas por el incremento de la oferta

En este caso se ha simulado el efecto que tendría la incorporación de sistemas de acumulación nocturna o estacional (tranques) y no de embalses de regulación estacional o interanual.

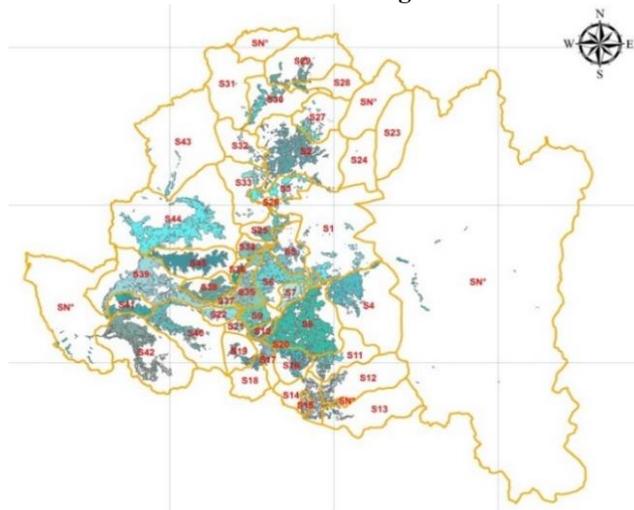
El costo económico es simplemente una función lineal de la brecha en volumen que hay que cerrar comparando la demanda futura de la matriz de cultivos y la oferta que corresponde a la demanda histórica restringida entre el 90 y 60 %.

III. Resultados

A. Primera sección del Maipo

Para este estudio se seleccionaron las unidades de análisis que corresponden a las asociaciones de canalistas incluidas en la primera sección del río Maipo. Una selección y delimitación en sectores de riego fue elaborada para el Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos, cuenca del río Maipo (DGA, 2008). La delimitación del plan director dividió todas las secciones de la cuenca en 46 sectores de riego basándose en criterios agroclimáticos y de tipo de suelo (véase mapa 2).

Mapa 2
Sectores de riego



Fuente: Plan director para la gestión de los recursos hídricos, cuenca del río Maipo (DGA, 2008).

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Estudios recientes (CCG, 2015) muestran que el comportamiento de la distribución del agua en las asociaciones de canalistas sigue un patrón similar al reportado en el río Maipo, de esta forma se valida el supuesto de que los impactos estimados del cambio climático en cada asociación y, por ende, en cada sector de riego son proporcionales a los impactos del cambio climático en la cuenca.

1. Costos de no acción

El cuadro 18 muestra los resultados de las reducciones de rendimiento en términos porcentuales de la matriz de cultivos que se encuentra en la primera sección del Maipo para distintos escenarios de aumento de temperatura y de reducciones de oferta de agua asociados a escenarios de cambio climático.

Cuadro 18
Reducción porcentual de rendimientos para escenarios de cambio climático (aumento de temperatura) y reducción en la disponibilidad de agua que incidan en la oferta para riego

Cultivo	Superficie (En hectáreas)	Escenario 1 (+ 1; -10%)	Escenario 2 (+ 2; -20%)	Escenario 3 (+ 3; -30%)	Escenario 4 (+ 4; -40%)
Maíz	2 257,4	5,9	11,0	19,5	31,9
Trigo	1 138,5	9,6	12,6	16,4	21,0
Alfalfa	7 712,5	12,9	16,9	21,8	27,6
Almendro	1 915,9	8,9	12,6	17,5	23,9
Ciruelo europeo	3 450,9	5,4	8,4	12,7	18,7
Ciruelo japonés	1 680,6	4,2	6,9	11,1	17,4
Duraznero	2 687,8	5,8	9,2	14,0	20,8
Limonero	270,2	6,4	9,0	12,4	16,9
Naranjo	279,5	6,4	9,0	12,4	16,9
Nectarino	1 451,3	5,8	9,2	14,0	20,8
Nogal	5 327,7	5,4	8,4	12,7	18,7
Olivo	122,0	10,4	14,3	19,3	25,5
Palto	952,4	6,6	9,5	13,3	18,4
Vid de mesa	7 728,2	5,4	8,6	13,3	19,9
Vid de vino	9 279,9	11,3	16,4	23,1	31,5
Acelga	394,9	9,9	13,8	18,9	25,2
Betarraga	514,3	20,0	27,9	37,5	48,1
Cebolla	1 245,3	7,6	11,5	17,0	24,4
Choclo	720,0	9,8	15,3	22,9	32,8
Espinaca	746,6	9,9	13,8	18,9	25,2
Lechuga	2 083,5	7,8	12,9	20,5	31,0
Melón	355,0	10,3	16,8	26,2	38,3
Papa	2 226,7	8,0	12,5	19,0	27,8
Tomate	601,5	12,4	18,4	26,4	36,2
Zanahoria	502,8	11,4	18,0	27,2	38,8
Zapallo	998,0	9,5	15,9	25,4	37,9
Promedio	-	8,7	13,0	19,0	26,8
Min	-	4,2	6,9	11,1	16,9
Max	-	20,0	27,9	37,5	48,1

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

Como es de esperar, los escenarios de cambio climático que implican una reducción en la disponibilidad de agua impactan negativamente a los cultivos. Con algunas excepciones, la mayoría de los cultivos se muestra menos sensible a reducciones de 10% pero crece conforme el déficit se pronuncia.

El costo de “no acción” o “no adaptación” se estima como la pérdida de rendimiento de los cultivos multiplicado por la superficie y por el precio del producto. Al agregar este valor se llega a una primera estimación de costo, expresado en dólares por año. El cuadro 19 muestra la síntesis de los resultados para una situación hipotética en la que los agricultores continuaran cultivando, aun cuando fueran evidentes las reducciones en la disponibilidad de agua. La pérdida neta económica fluctúa entre los 28 y 100 millones de dólares por año (la superficie total de la sección alcanza las 56 000 ha).

Cuadro 19
Costo de no adaptación en la primera sección del Maipo en función de escenarios de cambio climático que impliquen reducciones en la disponibilidad de agua

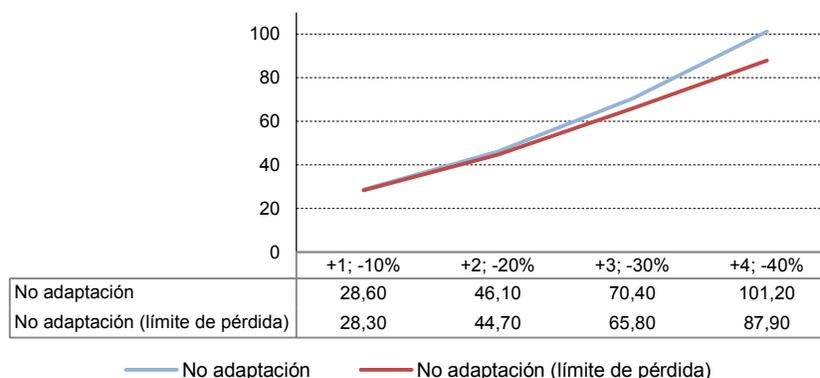
Escenario	1 (+ 1; -10 %)	2 (+ 2; -20 %)	3 (+ 3; -30 %)	4 (+ 4; -40 %)
Costo de no adaptación (En millones de dólares/año)	28,6	46,1	70,4	101,2
Costo de no adaptación con límite de pérdida (En millones de dólares/año)	28,3	44,7	65,8	87,9

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

Un aspecto debatible en relación a la metodología es que los agricultores continúen cultivando de esta forma y que no realicen reducciones de uso, cambio en fechas de siembra o manejos agronómicos. En este sentido, la estimación del costo de no adaptación corresponde más bien a un límite superior de pérdida económica. Una manera de refinarlas y generar valores un poco más cercanos a la realidad es introducir un supuesto plausible mediante el cual se estime que los agricultores dejarán de producir una vez que sus rendimientos no sean capaces de cubrir los costos medios de producción. De esta forma, el máximo costo de no adaptación en un cultivo corresponde al margen bruto de operación (ingresos menos costos directos). El gráfico 5 presenta el resultado de la estimación en ambos casos, se observa que la brecha entre una y otra se hace más evidente a partir de escenarios de cambio climático que introducen restricciones severas en la disponibilidad de agua (30% y superior).

Gráfico 5
Estimación de costos de no adaptación para dos supuestos en función de escenarios de restricción de agua
 (En miles de millones de dólares por año)



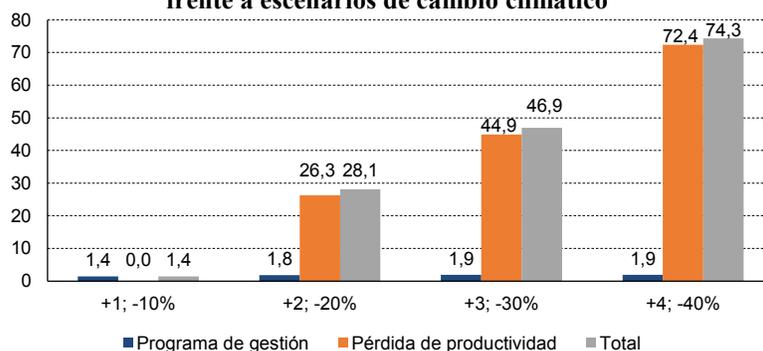
Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

2. Costo de las medidas de gestión

La adopción de sistemas de gestión de recursos hídricos que permitan mejorar los estándares de eficiencia de los sistemas de riego siempre ha sido considerada como una de las estrategias más efectivas para lidiar con las restricciones temporales de agua (sequías hidrológicas).

Para su aplicación como un programa de adaptación a los efectos del cambio climático el costo estimado tiene dos componentes, el primero corresponde a los recursos monetarios necesarios para implementar el plan pero que tienen un límite de efectividad debido al límite superior de la eficiencia en cada sistema de riego. El segundo componente corresponde a la pérdida productiva (semejante al anterior) puesto que en ciertas circunstancias las restricciones de agua son tan severas que no es posible que los planes de gestión (como las adaptaciones incrementales descritas por Howden) den una respuesta apropiada a los desafíos enfrentados.

Gráfico 6
Estimación de costos de adaptación asociado a programas de gestión y pérdida de productividad frente a escenarios de cambio climático



Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

El gráfico 6 muestra la estimación de costos para el caso de un programa de adaptación al cambio climático basado en mejoras en la gestión de recursos hídricos y prácticas de riego.

Se aprecia que los planes de adaptación son muy apropiados cuando el sistema se enfrenta a restricciones menores de recursos hídricos. En este caso, la razón beneficio costo es de 20:1 para caer rápidamente hasta valores cercanos a la unidad conforme la severidad de la restricción hídrica aumenta. Los programas de gestión tienen mayor impacto en riegos superficiales de baja eficiencia ya que su efecto incremental tiene el potencial de ahorrar volúmenes importantes de agua.

3. Costo de los cambios en tecnología de riego

La distribución del agua se ha mantenido según el esquema histórico, es decir utilizando los derechos adquiridos por las asociaciones sin contemplar mayores dotaciones por concepto de compra de nuevos derechos. Se ha hecho así para medir el impacto que sólo tendría la mejora en las técnicas de riego.

El modelo de optimización desarrollado para estimar los costos de adaptación vía cambios en la superficie de riego tiene la ventaja de indicarnos claramente cuál debiese ser el cambio en la tecnología e informar a los agentes formuladores de política pública para que faciliten su implementación.

El cuadro 20 presenta la estimación de costos de adaptación basado en un sistema de modificación progresiva de la tecnología de riego sustituyendo el riego superficial (tendido y surco) por alternativas más eficientes. Se han incorporado dos tecnologías que, sin pertenecer a la familia del riego presurizado, corresponden a mejoras tecnológicas intermedias que facilitan la adopción para los agricultores. La primera es el riego por "bordes o platabandas" que permite mejoras en aquellos cultivos que se riegan por tendido (trigo y praderas) y la segunda es el riego "adiformiano" que ha tenido una amplia aceptación entre los productores, generando resultados prometedores como alternativa al riego por surcos. Como se ha mencionado, se asume que las inversiones en tecnología de riego tienen una vida útil de 10 años por lo que se ha estimado su costo de implementación y llevado a un equivalente anual considerando este período.

Cuadro 20
Costo de adaptación por reemplazo de sistemas de riego hacia alternativas más eficientes frente a distintos escenarios de cambio climático^a

Escenario	1 (+ 1; -10 %)	2 (+ 2; -20 %)	3 (+ 3; -30 %)	4 (+ 4; -40 %)
Costo de adaptación (En millones de dólares/año)	3,1	8,2	15,1	23,7
Costo por unidad de superficie (En dólares/ha/año)	54,6	145,0	266,8	419,2

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

Los resultados de las simulaciones muestran que adoptar mejoras en las sistemas de riego (sustitución de tecnología) es una medida eficaz para abordar los problemas de disponibilidad de agua en relación al cambio climático y que en casi todos los cultivos y escenarios se puede llegar a satisfacer los requerimientos de los cultivos (esto implica que no hay costos asociados a pérdidas de productividad por este concepto). Puesto que a medida que aumenta la severidad del escenario de cambio climático, el costo de no adaptación aumenta (pérdidas de productividad cada vez mayores), por lo que la adaptación mediante la vía de inversión en sistemas de riego más eficientes se hace más atractiva (el daño evitado es cada vez más alto ante mayores cambios en la disponibilidad de agua).

4. Costo de las medidas de aumento de la oferta

La inversión en infraestructura de acumulación de agua a nivel predial es una alternativa de adaptación que recibe bastante atención por parte de los encargados de la gestión de recursos hídricos. Cobra relevancia en situaciones en las que la oferta permite acumular agua cuando no se está utilizando para riego (acumulación nocturna a nivel diario o invernal en casos en las que se trabaja a nivel estacional).

El cuadro 21 muestra los resultados de la estimación del volumen a embalsar y el costo de aplicar la medida a diversos escenarios de cambio climático que induzcan la reducción en la oferta de agua.

Cuadro 21
Volumen necesario y costo de adaptación por infraestructura predial de acumulación de agua frente a distintos escenarios de cambio climático^a

Escenario	1 (+ 1; -10 %)	2 (+ 2; -20 %)	3 (+ 3; -30 %)	4 (+ 4; -40 %)
Volumen a embalsar para suplir déficit (En m ³)	124,0	243,4	363,1	453,5
Costo de adaptación (En millones de dólares/año)	22,9	44,9	67,0	83,7
Costo por unidad de superficie (En dólares/ha/año)	404,0	793,3	1 183,3	1 478,0

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

5. Alternativas óptimas

Bajo un supuesto de tomadores de decisiones racionales que buscan minimizar los costos para implementar las alternativas que les permitirían enfrentar los efectos adversos del cambio climático.

El cuadro 22 muestra los resultados para la alternativa seleccionada y la óptima bajo el criterio de minimización de costos, junto con el daño evitado (costo de no adaptación y el de mejor alternativa).

Cuadro 22
Estimación de costos adaptación frente a distintos escenarios de cambio climático^a
(En millones de dólares/ha)

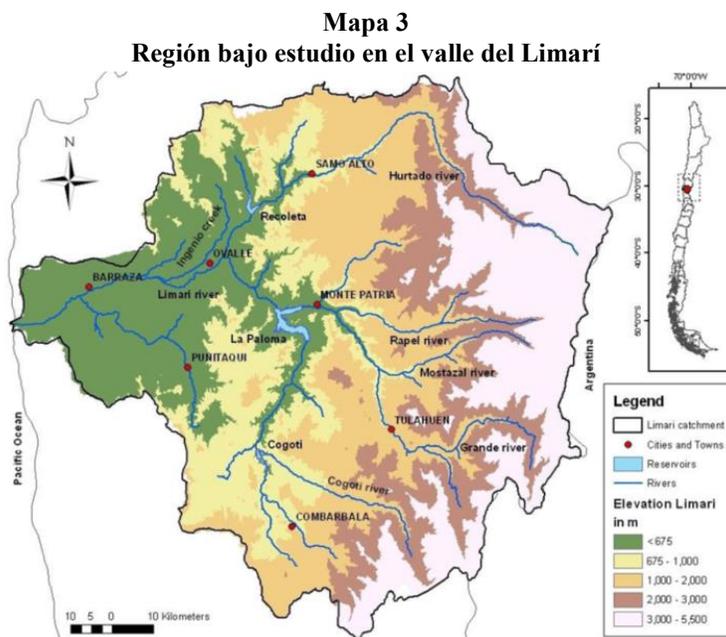
Escenario	1 (+ 1; -10 %)	2 (+ 2; -20 %)	3 (+ 3; -30 %)	4 (+ 4; -40 %)
No adaptación	28,3	44,7	65,8	87,9
Alternativas basadas en gestión	1,4	28,1	46,9	74,3
Alternativas basadas en modificación de sistemas de riego	3,1	8,2	15,1	23,7
Alternativas basadas en tranques	22,9	44,9	67,0	83,7
Mejor opción	1,4	8,2	15,1	23,7
Daño evitado	27,0	36,5	50,7	64,1

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

B. Cuenca del Limarí

Para este estudio se seleccionaron las unidades que corresponden a los cultivos bajo riego de la provincia del Limarí. El mapa 3 muestra la región del estudio.



Fuente: Elaboración del autor.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

A diferencia del caso anterior, esta zona destaca por tener un gran desarrollo frutícola y vitícola con una gran presencia de riego tecnificado de alta eficiencia. No obstante, persiste una fracción importante de praderas de alfalfa y de cultivos anuales que pueden servir de base para la adaptación basada en el cambio de sistema de riego.

1. Costos de no acción

De manera análoga al río Maipo, el cuadro 24 muestra la síntesis de los resultados de estimación de costos de no adaptación en la cuenca del Limarí, para una situación hipotética en la que los agricultores continuaran cultivando y para el caso de una máxima reducción del rendimiento.

Cuadro 23
Costos de no adaptación en la cuenca del Limarí en función de los escenarios de cambio climático que implican reducciones en la disponibilidad de agua^a
(En millones de dólares/año)

Escenario	1 (+ 1; -10 %)	2 (+ 2; -20 %)	3 (+ 3; -30 %)	4 (+ 4; -40 %)
Costo de no adaptación	19,7	31,0	46,4	65,6
Costo de no adaptación con límite máximo de reducción de rendimiento	19,7	30,9	45,7	61,3

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

Cuadro 24
Reducción porcentual de rendimientos para escenarios de cambio climático que incidan en la oferta de agua para riego (aumento de temperatura y reducción en la disponibilidad de agua)^a

Cultivo	Superficie (En hectáreas)	Escenario 1 (+ 1; -10 %)	Escenario 2 (+ 2; -20 %)	Escenario 3 (+ 3; -30 %)	Escenario 4 (+ 4; -40 %)
Maíz	585,0	6,7	13,4	24,2	38,9
Trigo	893,0	10,3	14,1	18,8	24,2
Alfalfa	10 800,0	13,7	18,6	24,4	30,9
Almendro	764,4	9,5	14,1	20,1	27,3
Limonero	630,0	7,0	10,3	14,6	20,0
Naranja	700,0	7,0	10,3	14,6	20,0
Nogal	794,9	5,9	9,7	15,1	22,2
Olivo	1 534,1	11,1	15,9	21,9	28,9
Palto	4 758,6	7,1	10,7	15,5	21,6
Vid de mesa	8 067,2	5,9	10,0	15,8	23,7
Vid de pisco	6 704,3	12,1	18,5	26,5	36,0
Vid de vino	2 010,8	12,1	18,5	26,5	36,0
Alcachofa	1 291,0	11,5	20,0	31,6	45,4
Choclo	315,0	10,8	17,6	26,9	38,2
Haba	199,0	11,3	19,0	29,4	41,4
Lechuga	142,0	8,6	15,1	24,6	36,8
Melón	60,0	11,4	19,8	31,3	44,9
Papa	377,0	8,7	14,5	22,6	32,8
Pepino dulce	547,0	10,5	18,7	30,3	44,3
Pepino ensalada	76,0	10,5	18,7	30,3	44,3
Pimentón	406,0	13,4	20,8	30,3	41,2
Poroto granado	97,0	10,6	15,5	21,6	28,9
Poroto verde	341,0	21,5	31,1	42,2	53,4
Tomate	230,0	13,4	20,8	30,3	41,2
Zapallo	178,0	10,5	18,8	30,5	44,5
Promedio	-	10,4	16,6	24,8	34,7
Min	-	5,9	9,7	14,6	20,0
Max	-	21,5	31,1	42,2	53,4

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

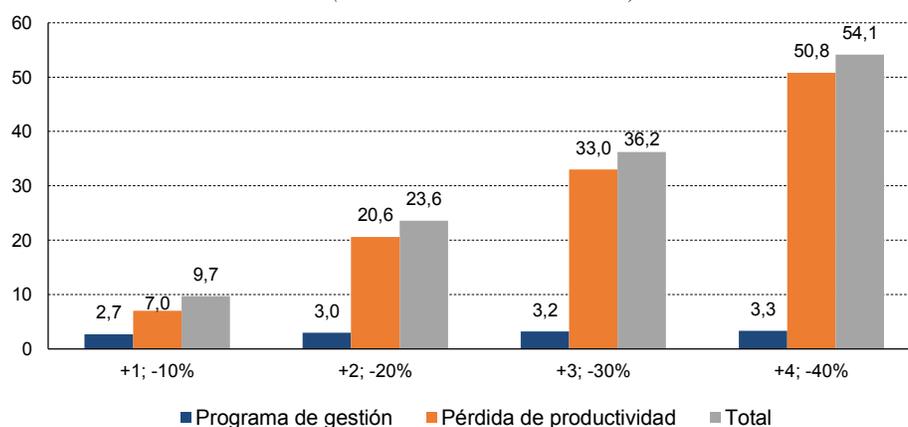
El cuadro 23 muestra los resultados de las reducciones de rendimiento en términos porcentuales en la matriz de cultivos que se encuentra en la cuenca del Limarí para distintos escenarios de aumento de temperatura y de reducciones de oferta de agua asociados a escenarios de cambio climático.

2. Costo de las medidas de gestión

Se aplicó la misma metodología que en el caso del Maipo, basada en la simulación del impacto de un plan de gestión de recursos hídricos que tuviese que incrementar los niveles de eficiencia hasta los límites superiores de la tecnología, y que contabilizara las pérdidas productivas generadas a partir de la incapacidad de suplir la demanda. El gráfico 7 muestra la estimación de costos para el caso de un programa de adaptación al cambio climático basado en mejoras en la gestión de recursos hídricos y prácticas de riego para la cuenca del Limarí.

Puesto que nos encontramos en una zona árida que ya tiene niveles de eficiencia de uso de agua bastante altas (producto de la participación del riego tecnificado) se observa que los planes de gestión, aun cuando introducen mejoras, son insuficientes para enfrentar el problema del cambio climático.

Gráfico 7
Estimación de costos de adaptación y su desagregación por componente para programas de gestión frente a escenarios de cambio climático en la cuenca del Limarí
(En millones de dólares/año)



Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

3. Costo de los cambios en tecnología de riego

Se aplicó el modelo de optimización desarrollado para estimar los costos de adaptación por la vía de cambios en la superficie de riego de la cuenca del Limarí. Según la base del censo de 2007, la superficie bajo riego tecnificado es mayor que en el Maipo, y se estima que aún hay margen para suplir los problemas de restricción del cambio climático ya que persiste una importante fracción de la superficie en riego superficial de baja eficiencia. No obstante, la reciente sequía que ha experimentado en la zona (por un período mayor a 5 años) puede que haya cambiado de manera muy significativa la distribución de cultivos y el porcentaje de riego tecnificado en el área. Sólo con valores más actualizados y evaluando en detalle los modelos en función de parámetros de cada valle tendremos un valor refinado que se aproxime mejor a la realidad.

El cuadro 25 presenta la estimación de costos de adaptación basado en un sistema de modificación progresiva de la tecnología de riego sustituyendo el riego superficial (tendido y surco) por alternativas más eficientes en el valle del Limarí.

Los resultados de las simulaciones muestran que adoptar mejoras en los sistemas de riego (sustitución de tecnología) sigue siendo una medida eficaz para abordar los problemas de disponibilidad de agua en relación al cambio climático.

Cuadro 25
Costos de adaptación por la vía de reemplazo de sistemas de riego por alternativas más eficientes frente a distintos escenarios de cambio climático en la cuenca del Limarí

Escenario	1 (+ 1; -10 %)	2 (+ 2; -20 %)	3 (+ 3; -30 %)	4 (+ 4; -40 %)
Costo de adaptación (En millones de dólares/año)	3,8	8,6	14,8	23,1
Costo por unidad de superficie (En dólares/ha/año)	90,3	203,1	348,8	544,6

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

4. Costo de las medidas de aumento de la oferta

La inversión en infraestructura de acumulación de agua a nivel predial es una alternativa muy costosa en términos monetarios. En forma adicional, es necesario señalar que, a falta de un estudio detallado de ingeniería que despeje las incertidumbres con respecto a la viabilidad técnica, las estimaciones de sus costos debieran manejarse con bastante cautela.

El cuadro 26 muestra los resultados de la estimación del volumen a embalsar y el costo de aplicar esta medida para distintos escenarios de cambio climático que produzcan una reducción en la oferta de recursos hídricos para la cuenca del Limarí.

Cuadro 26
Volumen necesario y costo de adaptación por la infraestructura predial de acumulación de agua frente a distintos escenarios de cambio climático en la cuenca del Limarí^a

Escenario	1 (+ 1; -10 %)	2 (+ 2; -20 %)	3 (+ 3; -30 %)	4 (+ 4; -40 %)
Volumen a embalsar para suplir déficit (En m ³)	143,7	287,7	431,8	542,4
Costo de adaptación (En millones de dólares/año)	26,5	53,1	79,7	100,1
Costo por unidad de superficie (En dólares/ha/año)	624,3	1 249,5	1 875,6	2 356,0

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

5. Alternativas óptimas

Se trabajó bajo un supuesto de tomadores de decisiones racionales que buscan minimizar los costos para implementar las alternativas que les permitan enfrentar los efectos adversos del cambio climático.

El cuadro 27 muestra los resultados de la alternativa de adaptación seleccionada y la óptima bajo el criterio de minimización de costos, junto con el daño económico evitado (costo de no adaptación–costo de mejor alternativa).

Cuadro 27
Estimación de los costos adaptación frente a distintos escenarios de cambio climático para la cuenca del Limarí^a
(En millones de dólares/ha)

Escenario	1 (+ 1; 10 %)	2 (+ 2; 20 %)	3 (+ 3; 30 %)	4 (+ 4; 40 %)
No adaptación	19,7	30,9	45,7	61,3
Alternativas basadas en gestión	9,7	23,6	36,2	54,1
Alternativas basadas en modificación de sistemas de riego	3,8	8,6	14,8	23,1
Alternativas basadas en tranques	26,5	53,1	79,7	100,1
Mejor opción	3,8	8,6	14,8	23,1
Daño evitado	15,9	22,2	30,9	38,1

Fuente: Elaboración del autor con base en los escenarios correspondientes.

^a Los escenarios de cambio climático se ven representados por aumentos de temperatura (+1, +2, +3, +4, expresados como +x) y reducciones de precipitación u oferta de agua para riego (-10, -20, -30 y -40%, expresados como -y%).

Se aprecia que dado el nivel de uso de la tierra y las tasas de transpiración impuestas por la combinación entre climatología (actual y futura) y la matriz de distribución de superficie de cultivos, la única opción viable corresponde a la reconversión tecnológica por sistemas de riego más eficientes.

V. Conclusiones y recomendaciones

Por su estrecha dependencia y el nivel de exposición, la agricultura es uno de los sectores más vulnerables al cambio climático. Las proyecciones vigentes para la región central y el centro sur de Chile indican que la temperatura podría incrementarse entre 2 y 4°C y que las precipitaciones podrían sufrir reducciones de hasta un 30%, especialmente en los sectores precordilleros a lo largo de este siglo. Estos cambios ambientales tendrían una profunda incidencia en la hidrología de Chile, alertando el régimen de descarga de los ríos en magnitud y estacionalidad.

La adaptación de la agricultura frente a estos cambios se transforma en un imperativo, toda vez que la seguridad alimentaria del país y su capacidad de generar divisas por exportaciones se ve seriamente comprometida. En el marco de que la seguridad hídrica es uno de los ejes de vulnerabilidad, se ha llevado a cabo este estudio con el objeto de evaluar distintas alternativas de adaptación, proponer una metodología de estimación de costos que sea replicable en el país y desarrollar un análisis en dos cuencas piloto. Desde una perspectiva de balance hídrico y simplificando los componentes determinantes de las extracciones de agua las acciones se pueden agrupar en: a) Medidas de reducción de demanda, b) Medidas de aumento de la disponibilidad u oferta y c) Medidas de incremento de la eficiencia de uso.

En el primer grupo se encuentran algunas medidas agronómicas para la reducción del uso de agua (mallas sombreadoras, antitranspirantes, etc.), cuyo efecto aún debe ser evaluado y el reemplazo de cultivos por especies o variedades que tengan un mejor desempeño desde el punto de vista del consumo de agua. Este tipo de avances no ha sido incorporado en el estudio ya que no se dispone de información confiable sobre el potencial de reducción en una amplia gama de cultivos. Asimismo resulta complejo evaluar la sustitución solo desde la perspectiva del uso de agua, de precios y costos relativos, puesto que las decisiones de los agricultores dependen de un gran número de factores.

Aun cuando los costos no han sido incorporados, es necesario resaltar que la agricultura debe tener un programa de investigación en sustentabilidad y mejoramiento genético en el que aporten los centros nacionales de investigación con lo mejor de sus capacidades. Este programa debe ser alentado y financiado con recursos públicos y privados. Como referencia considere que los programas de investigación de Centros de Excelencia (como FONDAP o MILENIO) que tienen presupuestos anuales de entre 1 y 2 millones de dólares.

El segundo grupo contempla el incremento de la oferta de agua disponible. Aquí se encuentran medidas como: construcción de embalses, uso de aguas subterráneas, revestimientos de canales, desalinización, trasvase de aguas desde otras cuencas, etc. A la fecha los costos de este tipo de medidas son altos y no compiten con las asociadas a la mejor gestión de recursos hídricos, aun así la principal limitante para incorporarlos en un sistema de evaluación económica de medidas es que su

dimensionamiento está determinado por estudios específicos de factibilidad que evalúan sus consecuencias negativas. Sólo se han evaluado obras menores de infraestructura predial (cuyo costo por metro cúbico es cercano al de las medidas de infraestructura de mayor envergadura). Un caso de especial atención en las cuencas podría ser el programa de cosecha y captación de agua tanto de cursos efímeros como de lluvias, pero las condiciones climáticas futuras ponen un manto de duda sobre su real capacidad para enfrentar estos problemas. El diagrama 3 muestra los criterios que deben cumplir las obras destinadas a proveer la disponibilidad de agua y que conviene tener presente a la hora de diseñar un plan de adaptación del sector silvoagropecuario frente a la escasez de recursos hídricos y el cambio climático.

Diagrama 3
Representación conceptual de los criterios necesarios para evaluar los sistemas de aumento de oferta de agua para alcanzar la seguridad hídrica



Fuente: Meza y Scott, (2016).

Finalmente, el tercero está asociado a aumentos en la eficiencia del uso de agua (evaluados como los de mejor gestión o los de sustitución de sistemas de riego). En este trabajo se ha supuesto que los ahorros en consumo de agua derivados de implementar estas medidas no son empleados para el aumento de la superficie (de lo contrario el resultado neto es cero o incluso negativo ya que se incrementa la exposición de los cultivos). Dependiendo de las características de cada zona, es posible que las medidas de gestión resulten ser o no costo efectivas. En el caso del Maipo (con una mayor proporción de la superficie destinada a riego superficial) las medidas de gestión pueden ser efectivas frente a cambios climáticos moderados (por ejemplo en los primeros 25 años o bien frente a escenarios de emisiones de menor magnitud). Pasado esto, las medidas de reemplazo de sistemas de riego resultan ser las más atractivas.

Si se seleccionan las opciones de mayor efectividad se estima que el costo de adaptación sería inferior a los 5 millones de dólares anuales en cada una de las cuencas analizadas (1.4 en el caso del Maipo y 3.1 en el caso del Limarí) para escenarios de cambio climático que impliquen reducciones en la oferta superficial de 10% y que crece hasta cerca de los 25 millones de dólares anuales cuando los escenarios de reducción de disponibilidad alcanzan el 40%.

La metodología empleada tiene una serie de supuestos y simplificaciones por lo que es aconsejable desarrollar estudios más acabados y por cuenca sobre el potencial de adaptación y los costos involucrados antes de llegar a conclusiones definitivas sobre un plan de adaptación y su forma de financiamiento.

Finalmente es necesario señalar que la adaptación es un proceso que depende de las condiciones de cada localidad asociados al régimen climático, a los impactos proyectados y a las condiciones productivas. Para realizar una estimación de costos de un plan de adaptación es necesario contar con información detallada de cada sistema productivo y con modelos hidrológicos y de cultivos debidamente validados para estimar, en cada una de las regiones, las pérdidas productivas y los efectos que tendría la introducción de medidas de adaptación en términos de satisfacción de necesidades de agua y de efectos en los rendimientos.

Bibliografía

- Abelson, P. H. (2011), Agriculture and Climate Change. *Science*, 257(5066), 9. <http://doi.org/10.2307/2877403>.
- Al-Bakri, J., Suleiman, A., Abdulla, F., & Ayad, J. (2011), Potential impact of climate change on rainfed agriculture of a semi-arid basin in Jordan. *Physics and chemistry of the earth, Parts A/B/C*, 36 (5–6), 125–134. <http://doi.org/10.1016/j.pce.2010.06.001>.
- Allen, R.G., et al. (1998), Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements, vol. 56, FAO, Rome, Italy (1998) p. 287, FAO irrigation and drainage paper N° 56.
- Amundson, J. L. et al. (2006), Environmental effects on pregnancy rate in beef cattle. *Journal of animal science*, 84(12), 3415–3420. <http://doi.org/10.2527/jas.2005-611>.
- Anwar, M. R. et al. (2007), Climate change impact on rainfed wheat in south-eastern Australia. *Field crops research*, 104(1), 139–147.
- ASCE (2005), ASCE: Standardized reference evapotranspiration equation. (M. Jensen, R. Burman, & R. Allen, Edits.) New York: American Society of Civil Engineers.
- Ben Mohamed, A. (2011), Climate change risks in Sahelian Africa. *Regional environmental change*, 11 (S1), 109–117. <http://doi.org/10.1007/s10113-010-0172-y>.
- Biesbroek, G. R., et al (2010), Europe adapts to climate change: Comparing national adaptation strategies. *Global environmental change*, 20(3), 440–450. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.03.005>.
- Byjesh, K., Kumar, S. N., & Aggarwal, P. K. (2010), Simulating impacts, potential adaptation and vulnerability of maize to climate change in India. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 15(5), 413–431. <http://doi.org/10.1007/s11027-010-9224-3>.
- Cannon, R. J. C. (1998), The implications of predicted climate change for insect pests in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Global Change Biology*, 4(7), 785–796. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00190.x>.
- CEPAL (2010), *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: síntesis 2010*. (L. M. Galindo y C. L. De Miguel, Eds.). Santiago de Chile. Naciones Unidas.
- Costa, L. C., et al (2009), Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. *Environmental research letters*, 4(1), 14013. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014013>.
- Dunn, R. J. H. et al (2014), Analysis of heat stress in UK dairy cattle and impact on milk yields. *Environmental research letters*, 9(6), 64006. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064006>.
- Giridhar, K., & Samireddypalle, A. (2015), Impact of climate change on forage availability for livestock. V. Sejian, J. Gaughan, L. Baumgard, & C. Prasad (Eds.), *Climate change impact on livestock: Adaptation and mitigation SE-7* (pp. 97–112). Springer India. http://doi.org/10.1007/978-81-322-2265-1_7.
- Guis, H., et al. (2012), Modelling the effects of past and future climate on the risk of bluetongue emergence in Europe. *Journal of The Royal Society Interface*, 9(67), 339–350. <http://doi.org/10.1098/rsif.2011.0255>.

- Hannah, L. et al (2013), Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the national academy of sciences*, 110(17), 6907–6912. <http://doi.org/10.1073/pnas.1210127110>.
- Hasegawa, T. et al. (2005), Impact of increased source capacity on rice yield: a case study with CO₂. *Copyright International Rice Research Institute 2005*, 124.
- Iglesias, A., Garrote, L., Quiroga, S., & Moneo, M. (2012), A regional comparison of the effects of climate change on agricultural crops in Europe. *Climatic change*, 112(1), 29–46. <http://doi.org/10.1007/s10584-011-0338-8>.
- IPCC (2014a), Annex II: Glossary [Agard, J. et al, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1757–1776). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- _____ (2014b), Summary for policy makers. In *Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability—contributions of the working group II to the fifth assessment report* (pp. 1–32). <http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.012>.
- _____ (2013), Climate change 2013: The Physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- _____ (2011), Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. summary for policymakers. In *IPCC: Spacial report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation* (p. 30). <http://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>.
- Iqbal, M. M. et al. (2010), Climate change aspersions on food security of Pakistan. *Science vision*, 15(1), 15–23.
- Jones, G. V., & Goodrich, G. B. (2008). Influence of climate variability on wine regions in the western USA and on wine quality in the Napa Valley. *Climate research*, 35(3), 241–254. <http://doi.org/10.3354/cr00708>.
- Jones, G. V. et al. (2009), Analysis of the spatial climate structure in viticulture regions worldwide. *Bull. OIV (944–946)*, 507–518..
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005), Climate change and global wine quality. *Climatic change*, 73(3), 319–343. <http://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>.
- Knox, J., et al. (2012), Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environmental research letters*, 7(3), 34032. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034032>.
- Kulshreshtha, S. N. (2011), Climate change, prairie agriculture, and prairie economy: The new normal. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue Canadienne D'agroeconomie*, 59(1), 19–44. <http://doi.org/10.1111/j.1744-7976.2010.01211.x>.
- Kumar, S. N. et al. (2013), An assessment of regional vulnerability of rice to climate change in India. *Climatic change*, 118(3–4), 683–699. <http://doi.org/10.1007/s10584-013-0698-3>
- _____ (2011), Impact of climate change on crop productivity in Western Chats, coastal and northeastern regions of India. *Current Science*, 101(3), 332–341.
- Lal, M. (2011), Implications of climate change in sustained agricultural productivity in South Asia. *Regional environmental change*, 11(S1), 79–94. <http://doi.org/10.1007/s10113-010-0166-9>
- Liu, S., et al. (2010), Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agricultural water management*, 97(8), 1195–1209. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.001>.
- Lobell, D. B., & Burke, M. B. (2008), Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. *Environmental research letters*, 3(3), 34007. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/3/3/034007>.
- Luo, Q., Bellotti, W., Williams, M., & Wang, E. (2009), Adaptation to climate change of wheat growing in South Australia: Analysis of management and breeding strategies. *Agriculture, ecosystems & environment*, 129(1–3), 261–267. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2008.09.010>.
- Meza, F. J., & Silva, D. (2009), Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. *Climatic change*, 94, 143–156. <http://doi.org/10.1007/s10584-009-9544-z>.
- MINAGRI (2013), *Plan de adaptación al cambio climático del sector silvoagropecuario. Propuesta ministerial elaborada en el marco del PANCC 2008-2012*. Santiago de Chile: Ministerio de Agricultura.
- MMA (2011), *Segunda Comunicacion Nacional de Chile ante la CMNUCC*. (Ministerio de Medio Ambiente Chile, Ed.) (1st ed.). Santiago de Chile: Ministerio de Medio Ambiente.
- Mooney, H. A., & Hobbs, R. J. (2000), *Invasive species in a changing world*. Island press.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2005), Soil and water assessment tool theoretical documentation: Version 2005. Recuperado el 22 de Septiembre de 2015, de SWAT: <http://swat.tamu.edu/documentation/>.

- Nelson, G. C. et al. (2009), *Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation*. Food policy. International Food Policy Research Institute. <http://doi.org/10.2499/089629535>.
- Olesen, J. E., et al. (2012), Changes in time of sowing, flowering and maturity of cereals in Europe under climate change. *Food additives & contaminants: Part A*, 29(10), 1527–1542. <http://doi.org/10.1080/19440049.2012.712060>.
- Porter, J. R. R. et al. (2014), Climate change 2014: Impacts, adaptations, and vulnerability. Food Security and Food Production Systems. In C. B. Field, et al. (Eds.), (pp. 485–533). Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press..
- Riebau, A. R., & Qu, J. J. H. (2005), *Natural disasters and extreme events in agriculture*. (M. V. K. Sivakumar, R. P. Motha, & H. P. Das, Eds.) *Natural disasters and extreme events in agriculture: Impacts and mitigation*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. <http://doi.org/10.1007/3-540-28307-2>.
- Rosenthal, S., & Kurukulasuriya, P. (2003), Climate change and agriculture a review of impacts and adaptations. *Climate change series*, (91), 1–77. [http://doi.org/10.1016/0169-5347\(91\)90186-2](http://doi.org/10.1016/0169-5347(91)90186-2).
- Ruane, A. C. et al. (2013), Climate change impact uncertainties for maize in Panama: Farm information, climate projections, and yield sensitivities. *Agricultural and forest meteorology*, 170, 132–145. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.015>.
- Shen, S. H. et al. (2011), Simulating the rice yield change in the middle and lower reaches of the Yangtze River under SRES B2 scenario. *Acta ecologica sinica*, 31(1), 40–48. <http://doi.org/10.1016/j.chnaes.2010.11.007>.
- Smit, B., & Wandel, J. (2006), Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global environmental change*, 16(3), 282–292. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>.
- Srivastava, A. et al. (2010), Assessment on vulnerability of sorghum to climate change in India. *Agriculture, ecosystems & environment*, 138(3–4), 160–169. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2010.04.012>.
- Stöckle, C. O. et al. (2010), Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture. *Climatic change*, 102, 77–102. <http://doi.org/10.1007/s10584-010-9851-4>.
- St-Pierre, N. R. et al. (2003), Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of dairy science*, 86(31), E52–E77. [http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)74040-5](http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5).
- Tao, F., & Zhang, Z. (2011), Impacts of climate change as a function of global mean temperature: Maize productivity and water use in China. *Climatic change*, 105(3–4), 409–432. <http://doi.org/10.1007/s10584-010-9883-9>.
- Tao, F., & Zhang, Z. (2013), Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: A new super-ensemble-based probabilistic projection. *Agricultural and forest meteorology*, 170, 146–165. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.003>.
- Thornton, P. K. et al. (2010), Adapting to climate change: Agricultural system and household impacts in East Africa. *Agricultural systems*, 103(2), 73–82. <http://doi.org/10.1016/j.agry.2009.09.003>.
- Thornton, P. K. et al. (2011), Agriculture and food systems in sub-Saharan Africa in a 4 C+ world. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1934), 117–136. <http://doi.org/10.1098/rsta.2010.0246>.
- Vicuña, S, R. Garreaud and J. McPhee (2011), Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change* 105:469-488.
- Vicuna, S. P. et al. (2014), Understanding future climate variability and climate change adaptation capacity through an historic perspective of irrigation infrastructure development: lessons from the Limarí basin in Central Chile. *Water international*. 39(5): 620-634.
- Watkiss, P. et al. (2007), *Climate Change: the cost of inaction and the cost of adaptation*. EEA technical report. Copenhagen, Denmark: European Environment Agency.
- Wreford, A., Moran, D., & Adger, N. (2010), *Climate change and agriculture: Impacts, adaptation and mitigation*. Source *OECD Agriculture & Food, Volume 9*.
- Yang, X., Liu, Z., & Chen, F. (2011), The Possible effect of climate warming on northern limits of cropping system and crop yield in China. *Agricultural sciences in China*, 10(4), 585–594. [http://doi.org/10.1016/S1671-2927\(11\)60040-0](http://doi.org/10.1016/S1671-2927(11)60040-0).
- Yoshimoto, M., Oue, H., & Kobayashi, K. (2005), Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO₂ enrichment. *Agricultural and forest meteorology*, 133(1), 226–246.
- Ziska, L. H. et al. (2010), Invasive species and climate change: an agronomic perspective. *Climatic change*, 105, 13–42. <http://doi.org/10.1007/s10584-010-9879-5>.

Por sus fuertes vínculos con las condiciones climáticas y su alto nivel de exposición, la agricultura es uno de los sectores más vulnerables a las manifestaciones del cambio climático. En Chile, las proyecciones vigentes señalan incrementos de la temperatura y reducciones de las precipitaciones que podrían incidir en la magnitud y estacionalidad de descarga de los ríos. En este contexto, en el Plan de Adaptación al Cambio Climático del Sector Agropecuario de Chile se sugiere implementar medidas de adaptación que contribuyan a minimizar los efectos negativos de este fenómeno sobre la productividad de las especies, la dinámica del sector y la seguridad alimentaria; sin embargo, no existe una evaluación completa del costo económico de las medidas que es necesario implementar.

Para avanzar en esa dirección, en este estudio se evalúan diferentes alternativas y se propone una metodología de estimación de los costos asociados a medidas agronómicas para la reducción del uso de agua, el incremento de su eficiencia o el aumento de su oferta, sobre la base de información hidrometeorológica y de modelos de simulación de cultivos. El estudio se realiza en dos cuencas piloto, cuyos resultados fácilmente pueden extrapolarse al resto del país. Los resultados obtenidos se comparan con el cálculo de pérdida productiva en un escenario de no adaptación, generando así información con la que se espera contribuir a la toma de decisiones.