



**EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UN PROYECTO DE TRANSFERENCIA DE
AGUA EN CHILE**

Modelo hidro-económico para analizar los efectos redistributivos de agua dulce
en la agricultura

POR: FERNANDA DE JESÚS SÁNCHEZ RODRÍGUEZ

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Desarrollo
para optar al grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería

PROFESOR GUÍA:

Dr. ROBERTO DANIEL PONCE OLIVA

Marzo 2021

SANTIAGO

© Se autoriza la reproducción de fragmentos de esta obra para fines académicos o de investigación, siempre que se incluya la referencia bibliográfica.

“When the well is dry, we learn the worth of water”.

– Benjamin Franklin

AGRADECIMIENTOS

Dicen que por algo pasan las cosas. A pesar de lo arrepentida que me siento a veces, de haber entrado a al Magíster, no puedo hacer vista gorda de todas las oportunidades que tuve gracias a esto.

En realidad, este espacio lo tomé como una reflexión... Reconozco que entré porque al egresar de pregrado me vi igual de perdida a cuando entré: no tenía idea de qué hacer con mi vida, entonces seguir estudiando pareció una buena opción. En fin, la vida da muchas vueltas y gracias a este magíster tuve la oportunidad de conocer gente increíble y vivir momentos que hoy son importantes hitos en mi vida. Uno de ellos fue llegar al trabajo que tengo hoy. Tengo la suerte de tener un equipo increíble, de alto valor humano, que me valora y cree en mí. Gracias por el apoyo con este tema pendiente todo este tiempo, por la motivación e impulsos de ánimo, especialmente a la Maca B y la Ana María.

Ahora, como reflexión personal, lejos lo más duro de estos años fue verme enfrentada por primera vez a mí misma. En el colegio y en pregrado de una u otra manera tienes a alguien o algo que te mantiene encarrilado y te marca la pauta a seguir. Además, reconozco que nunca fui una alumna estudiosa. Me iba súper bien, pero nunca fui muy preocupada de controlar mi dispersión mental y la falta de disciplina. Al llegar al magíster fue una caída en seco, donde el que no era autosuficiente, disciplinado y extremadamente proactivo se quedaba atrás. Fue super decepcionante, porque por primera vez sentí que "no me daba". Logré pasar los ramos, pero gracias a rogar paciencia, mucha ayuda, y a mi formación escolar, que le agradezco profundamente a mis papás, porque sé lo mucho que les costó. Descubrí que lo que me decían mis papás era cierto, que de nada sirve la inteligencia si no se acompaña de disciplina y fuerza de voluntad, me demoré 3 años en verlo con mis propios ojos... la tesis, definitivamente, no se iba a hacer sola.

Fueron 3 años innecesariamente largos de ir y venir con la tesis, cambiando su tema como si fueran calcetines, tomándola 1 mes y dejándola en el olvido los 6 siguientes. Con un nivel de irresponsabilidad y poca seriedad que yo no aguantaría si fuera tutora de alguien. Así que, gracias a Roberto, por "adoptarme" como su alumna cuando no tenía la obligación, por recibirme con Felipe y encarrilarme en mis millones de idas a CCP.

Gracias especiales a mi familia, mis papás, mis hermanas, a mi Lilita que pasó muchas noches apañándome, a mi partner de magíster: la Hallie, a la Lolo, la Anto, la Miry, la Maca U, la Cata, la Luz, la tía Pao, la Coni, la Javi, la Jesu, la Pau, la Pacita, la Isi, la Vale, Carlos, Guille, Pablo y Camilo, por darse el tiempo de ayudarme y bancarme en momentos que fueron clave.

Yo creo que todos los que me conocen saben lo que sufrí con esto (sí, por culpa mía y súper sobremedido, pero igual) así que agradezco infinitamente esos mensajes de ánimo, esos empujones cuando no quería seguir avanzando, los mensajes con noticias nuevas sobre la carretera hídrica, los eternos memes de burla... en fin, gracias a mis amigos, son lo máximo y se preocupan más por mí de lo que yo habría pensado, es lindo darse cuenta y valorar esas cosas.

Y bueno, gracias a China... yo creo que sin la pandemia y su eterna cuarentena jamás habría terminado esto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

LISTA DE ABREVIATURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO	5
El cambio climático y su impacto en la agricultura	5
Proyectos de transferencia de agua a larga distancia (TALD)	7
TALD en Chile.....	10
Estudios de asignación de recursos hídricos	13
METODOLOGÍA.....	17
Caso de estudio.....	17
El proyecto	20
El modelo.....	21
RESULTADOS	28
DISCUSIÓN	42
Otros efectos.....	48
CONCLUSIONES.....	51
Consideraciones futuras	53
REFERENCIAS	55
ANEXO 1	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	29
Tabla 2.....	30
Tabla 3.....	31
Tabla 4.....	32
Tabla 5.....	32
Tabla 6.....	33
Tabla 7	34
Tabla 8.....	35
Tabla 9.....	37
Tabla 10.....	38
Tabla 11.....	39
Tabla 12.....	40
Tabla 13.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3 – 1. Esquema representativo de los flujos hidrológicos de la cuenca del río Vergara y de la provincia de Cardenal Caro, más el flujo del trasvase.....	21
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

CAF – Banco de Desarrollo de América Latina

CEPAL – Comisión Económica para América Latina y el Caribe

CNR – Comisión Nacional de Riego

CR2 – Centro de la Ciencia del Clima y la Resiliencia, (CR)2

DGA – Dirección General de Aguas

DOH – Dirección de Obras Hidráulicas

ESRI – Environmental Systems Research Institute

FAO – Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Food and Agriculture Organization)

HLPE – Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición (High Level Panel of Experts)

INE – Instituto Nacional de Estadísticas

IPCC – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)

MMA – Ministerio de Medio Ambiente

MOP – Ministerio de Obras Públicas

ODEPA – Oficina de Estudios y Políticas Agrarias

PNUD – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

WWF – Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wildlife Fund)

WRI – Instituto de Recursos Mundiales (World Resources Institute)

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es realizar una evaluación de un proyecto genérico de trasvase de agua en la zona central de Chile. Esto, con el fin de evaluar los efectos redistributivos de este tipo de proyectos en la industria agrícola, y de cuestionar que este sean una solución viable para nuestro país.

Para ello, se creó un proyecto hipotético que trasvasa agua desde la sub-cuenca del río Vergara, hasta la provincia de Cardenal Caro, que se simuló bajo 3 escenarios: el actual, sin el proyecto; con proyecto bajo las condiciones actuales; y con proyecto proyectado al año 2045, considerando los efectos de cambio climático. La metodología implementada fue un modelo de optimización lineal hidro-económico, que combina los impactos físicos de las alteraciones en la disponibilidad de agua, con la capacidad de respuesta económica de los agricultores. Su función objetivo es maximizar las ganancias totales, sujeto a restricciones hidrológicas, agrónomas e institucionales.

Los resultados obtenidos indican que, si bien las ganancias totales y de la provincia de Cardenal Caro aumentan, son en detrimento de la cuenca del río Vergara. Bajo condiciones actuales, las ganancias totales aumentaron un 5,12%, asociado a 1352,16 km³ de agua trasvasada. Ante los efectos del cambio climático, con el tiempo el aumento de las ganancias se redujo a 3,81% y el volumen trasvasado se contrajo en un 35,14%.

La ejecución del proyecto implicó cambios en el patrón productivo de ambas cuencas, alterando las hectáreas sembradas, producción y los ingresos de cada comuna. Sobre esto, cabe destacar que el modelo no considera el factor sociocultural en la toma de decisiones de los agricultores, por lo que, sumado a la extrapolación de los resultados de operación de otros proyectos en el mundo, se concluyó que la implementación de un proyecto así en Chile podría generar una reducción en sus beneficios inicialmente proyectados y costos irreparables tanto sociales, económicos como ambientales.

ABSTRACT

The aim of this research is to carry out an economic assessment of a generic water transfer project in Chile's central zone. This, to evaluate the redistributive effects of such projects in the agricultural industry, and to question whether this is a viable solution for the country.

To do this, a hypothetical project was created, that transfers water from the Vergara river Sub-basin to the Cardenal Caro province, which was simulated under 3 scenarios: the current one, without the project; with the project under current conditions; and with the project, projected to the year 2045, considering the effects of climate change. The methodology implemented was a hydro-economic linear optimization model, which combines the physical impacts of alterations in water availability, with the economic response capacity of farmers. Its objective function is to maximize total profits, subject to hydrological, agronomic and institutional constraints.

Results show that, although the total and Cardenal Caro's profits increase, they are to the detriment of the Vergara river basin. Under current conditions, total profits increased by 5.12%, associated to 1352.16 km³ of transferred water. With the effects of climate change, over time the increase in profits shrunk to 3.81% and the transferred volume was contracted by 35.14%.

The execution of the project implied changes in the productive pattern of both basins, altering the planted hectares, production and income of each commune. Regarding this, it should be noted that the model does not consider sociocultural factors in the decision-making of farmers; therefore, added to the extrapolation of the operating results of other projects in the world, it was concluded that the implementation of a project of this type in Chile could generate a reduction in its initial projected benefits and irreparable social, economic and environmental costs.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el agua dulce corresponde al 2,5% del total de recursos hídricos disponibles y de eso, sólo el 0,62% está disponible para consumo humano (Cirelli & du Mortier, 2005). Con esto, la dotación de agua por habitante al año es de 6.000 m³/s, cifra por sobre los 2.000 m³/s que aseguran el desarrollo sostenible (Banco Mundial, 2011). Pero no está distribuida equitativamente: existen factores como la geografía, el clima o la distribución de los asentamientos urbanos que hacen que no todos puedan acceder a la cantidad de agua necesaria para vivir (CAF, 2015; Figueroa et al., 2020; Shumilova, Tockner, Thieme, Koska, & Zarfl, 2018). Un ejemplo de esto es Ciudad del Cabo, que en 2018 tuvo graves problemas de disponibilidad hídrica, peligrando llegar al "día cero" y agotar en la totalidad sus recursos hídricos (Ziervogel, 2019).

La falta de recursos hídricos se ve incrementada por el cambio climático. Sus principales efectos se asocian con alteraciones en los patrones de lluvia, de temperatura y con la frecuencia de fenómenos climáticos extremos (IPCC, 2013). Lo anterior se traduce en un impacto directo sobre los recursos hídricos, su ciclo natural, flujos, disponibilidad y calidad final. Con esto el problema de inequidad hídrica se agrava, aumenta la competencia entre sus usuarios y se ven afectados el bienestar, salud de la población, productividad y economía (CEPAL, 2012; Ponce, Blanco, & Giupponi, 2014).

La situación en Chile no es ajena al problema: el balance hídrico indica que la dotación anual por habitante es de 53.000m³/s, cifra que toma distancia de la realidad mundial, sugiriendo que el escenario nacional es más favorable. Sin embargo, informes y estudios alertan que Chile se está quedando sin agua; la mega-sequía que se está viviendo hace más de 10 años sumada a una escasez hídrica sectorial conllevan que ciudades como Antofagasta no exceda los 52 m³/s disponibles per cápita anual (Banco Mundial, 2011; Santibáñez, 2017).

La superficie nacional continental, que suma 4300 km de longitud (DGA, 2016), se caracteriza por poseer una disposición geográfica que abarca una variedad de relieves, condiciones climáticas, fenómenos naturales y oferta de recursos (INE, 2016; Valdés-Pineda et al., 2014). Esto condiciona la forma en que la población, las actividades económicas y los mismos recursos naturales se distribuyen dentro del país, dando como resultado un fuerte desequilibrio distributivo y la inevitable necesidad de compartir los recursos hídricos que existen en una determinada zona geográfica (CEPAL, 2012; Santibáñez, 2017).

Esto ubica a Chile dentro de los países más vulnerables ante los efectos del cambio climático, cumpliendo 7 de los 9 criterios de vulnerabilidad ante dicho fenómeno (MMA, 2016) y proyectándolo dentro de los 25 países con problemas graves de agua dulce al año 2040 (WRI, 2015).

Ante esta situación, estudios afirman que es necesario implementar medidas de reasignación para reducir los efectos de la crisis hídrica. Plantean medidas

enfocadas principalmente en asegurar el abastecimiento de la agricultura y la minería, las principales fuentes de ingresos económicos y puestos de trabajo que, además, extraen grandes cantidades de agua para el buen funcionamiento de sus procesos de operación. Ante esta situación, una de las soluciones que se barajan son los proyectos de transferencia de agua a larga distancia (CNR, 2011; CR2, 2015; MOP, 2020b; Santibáñez, 2017).

Actualmente, hay varios proyectos de trasvase operando en el mundo, destacando casos de España, California, China y Perú. Si bien estas propuestas han amortiguado la crisis hídrica en algunas zonas, han traído consigo consecuencias económicas, sociales y ambientales que, bajo el criterio de algunos científicos, ponen en duda si los beneficios percibidos compensan el costo que hay detrás (Berkoff, 2003; Department of Water Resources, 2019; Dourojeanni, 2014; Morales Gil, Rico Amorós, & Hernández Hernández, 2005; Pittock, Meng, Geiger, & Chapagain, 2009; Vargas et al., 2020a; WWF, 2007).

El objetivo de este estudio es presentar una evaluación económica de un proyecto genérico de trasvasije de agua en la zona central de Chile, utilizando para ello un modelo hidro-económico (HE), definido a partir de un análisis de las distintas iniciativas de trasvase de cuencas que se están discutiendo actualmente. Lo anterior, se justifica en la necesidad de evaluar los efectos redistributivos de estos proyectos en la industria agrícola.

La metodología para esta investigación realiza la evaluación de 3 proyectos nacionales: “Aquatacama”, “Carretera Hídrica” y “Vía Hídrica del Norte de Chile”. Estos tres proyectos son relevantes debido a que se fundamentan en un exceso de disponibilidad de recursos hídricos en el río Bio Bío que es preciso cuestionar.

El siguiente capítulo presenta una revisión de los estudios previamente realizados tanto a nivel mundial como nacional, asociados al trasvase de agua entre cuencas y a estudios que implementen modelos HE. El tercer capítulo expone y detalla el procedimiento metodológico llevado a cabo para un contexto simulado basado principalmente en el proyecto de Reguemos Chile. El capítulo cuatro exhibe los resultados tras la ejecución del modelo con sus respectivos análisis. El capítulo de discusión profundiza en torno a los proyectos de trasvase en Chile y rebate los argumentos que los sustentan, de acuerdo con los resultados obtenidos complementados con literatura. Finalmente, el quinto y último capítulo presenta las conclusiones y proyecciones de la investigación.

MARCO TEÓRICO

El presente capítulo entrega antecedentes que respaldan la propuesta de investigación. En primer lugar, se abordará impacto del cambio climático, la escasez hídrica y la agricultura, y cómo los proyectos de transferencia de agua a larga distancia se presentan como una solución. En segundo lugar, se expondrá en detalle los 3 proyectos que se están evaluando en Chile. La presentación de estas propuestas será revisada a partir de referencias mundiales, además de una breve descripción de los modelos HE y las aplicaciones que se les ha dado en estudios previos en el contexto nacional e internacional.

El cambio climático y su impacto en la agricultura

El cambio climático es un fenómeno natural cíclico que en los últimos 300 años se ha visto afectado por el incremento de gases de efecto invernadero post revolución industrial, lo que ha acelerado la tasa de aumento de las temperaturas. Esto predice una alteración en el estado del clima, generando consecuencias en distintos procesos y en la disponibilidad de recursos naturales a lo largo del planeta. Este fenómeno ha tenido consecuencias complejas, entre las que se identifica el alto impacto en las actividades económicas, en especial, la agrícola (IPCC, 2014).

Entre las diversas manifestaciones climáticas que han sido detectadas, están aquellas asociadas a cambios de temperaturas, cambios en las frecuencias de precipitaciones y de su intensidad, cambiando los patrones de sequía e

inundaciones a lo largo del mundo. Si bien ya se han advertido consecuencias generales, es necesario recalcar el nivel de impacto que esto tiene en la conducta de la agricultura, ya que al condicionar la toma de decisiones de los agricultores se llegan a forzar cambios en el tipo de cultivos, su ubicación y en las estrategias de riego implementadas, alterando así su rendimiento y producción final (Abdalhi & Jia, 2018; Ponce, Fernández, Stehr, Vásquez-Lavín, & Godoy-Faúndez, 2017).

Actualmente, la agricultura consume el 70% del agua dulce mundial, con una tasa de eficiencia de riego promedio bajo el 50% (Fundación Chile, 2018; Fundación Chile & MOP, 2017), por lo que ante la crisis hídrica el consumo tenderá al aumento, al igual que la de los demás usuarios. Se agudizará entonces la competencia por el recurso entre los distintos usuarios que coexisten en una determinada zona geográfica. Esto significa que la demanda de cada usuario no alcanzará a ser satisfecha, lo que se define como escasez (CAF, 2015).

Históricamente el ser humano se ha preocupado por disponer de suficiente agua dulce de calidad para abastecer su salud y sus actividades (Fundación Chile & MOP, 2017). Desde tiempos babilónicos y a lo largo de la historia, la transferencia de agua entre cuencas ha sido una medida de reacción rápida ante la escasez hídrica, el crecimiento demográfico, restricciones ambientales o asignación dispar de recursos (Meador, 1992; Pittock et al., 2009). Es un tipo de solución que se ha seguido utilizando hasta el día de hoy en países como España, Perú,

Portugal, Estados Unidos, India, Australia o China (Sürmelihiindi, Passchier, Baykan, Spötl, & Kessener, 2013; L. Zhang, Li, Loa, Zhuang, & Du, 2015).

Proyectos de transferencia de agua a larga distancia (TALD)

Teóricamente, los proyectos TALD buscan promover el crecimiento económico al tratar las restricciones hídricas de una región en escasez. Estos proyectos operan reasignando los recursos hídricos más allá de sus límites geográficos o de su cuenca, llevando agua desde regiones sin escasez hacia regiones donde la escasez afecta sus actividades económicas y a sus habitantes (Feng, Li, Duan, & Zhang, 2007).

Hoy en día existen muchos proyectos de este tipo, ya sea vigentes o en proceso de construcción. Sin embargo, a pesar de ser una medida necesaria y en algunas variables, mejor que otras alternativas de combate a la escasez, como los embalses o la desalación (CAF, 2015; MOP, 2020b), es pertinente contextualizar el escenario que enfrentan: Dourojeanni (2014) estableció 2 factores comunes en el escenario de estos proyectos, basado en la experiencia del proyecto Majes-Siguas en Perú.

Primero, indicó que no se debe olvidar que no hay zonas geográficas de dónde extraer agua sin interferir en localidades, su población, ni despertar inquietud por el medio ambiente. Que también es importante considerar que, si bien estos proyectos son necesarios, generan dependencia e incentivan a la agricultura a

seguir creciendo y aumentando sus hectáreas cultivables en el tiempo, llevando al proyecto a ser una solución insuficiente ante la escasez hídrica.

Segundo, planteó que, de implementar un proyecto de este tipo, es necesario partir desde un principio con la creación de organismos de gestión dentro de la cuenca de donde se va a extraer el recurso, a modo de facilitar la capacidad de diálogo y negociación entre habitantes y quien construye el proyecto. Establece que es esperable que la población de donde se extrae agua se vea de alguna manera beneficiada por las rentas generadas a causa del proyecto.

En cuanto a los estudios en torno a estos proyectos, cobran fuerza desde 1972 (L. Zhang et al., 2015) y se enfocan principalmente en evaluar los impactos hidrológicos asociados a las desviaciones de aguas (Poff & Matthews, 2013; Putty, Thipperudrappa, & Chandramouli, 2014), la migración de peces como respuesta a las desviaciones (Ellender & Weyl, 2014; Rose, Huang, Justic, & de Mutsert, 2014), los riesgos de degradación y contaminación de agua para consumo doméstico (Sun, Yang, & Huang, 2014; Tang, Yi, Yang, & Cheng, 2014), los impactos ambientales, económicos y sociales desde perspectivas cualitativas y cuantitativas (Kingsford, 2000; Dourojeanni, 2014; Feng et al., 2007; Morales Gil et al., 2005; Uche, Martínez-Gracia, Círez, & Carmona, 2015; Wilson, Li, Ma, Smith, & Wu, 2017; Ye, Duan, Chu, Xu, & Mao, 2014), evaluaciones económicas (Calatrava & Martínez-Granados, 2012; Hernández Hernández & Morales Gil, 2008; Morales Gil et al., 2005) o evaluaciones más generales cuyo objetivo es

sólo cuestionar o validar este tipo de medidas de control de escasez (Banco Mundial, 2011; Berkoff, 2003; Pittock et al., 2009; WWF, 2007).

Algunos ejemplos de los casos de mayor renombre y en operación (Shumilova et al., 2018; L. Zhang et al., 2015) son:

- a. Trasvase Tajo-Segura en España: un canal de 286 km que transporta una media de 33 m³/s de agua desde el río Tajo hasta el río Mundo, destinando el 64% para el riego de 90.000 nuevas hectáreas (Gil Olcina, 1995; Morales Gil et al., 2005).
- b. The California State Water Project en Estados Unidos: un conjunto de acueductos que suman más de 1.100 kms y transporta un promedio de 113,43 m³/s contable (Department of Water Resources, 2019; Shumilova et al., 2018).
- c. Snowy River Scheme en Australia: un proyecto orientado a la generación de energía eléctrica y riego, que comprende embalses, centrales hidroeléctricas, más de 145 kms de túneles y 80 de acueductos. Le entrega 1,1 km³ al año a la cuenca Murray-Darling para irrigación (WWF, 2007).
- d. South-North en China: a pesar de que actualmente opera con un funcionamiento parcial, es hasta ahora el proyecto más extenso del mundo. Aspira recorrer 5.600 kms entre sus 3 fases para trasladar 44,8 billones m³/año desde el río Yangtze hasta el río Amarillo en el norte de China (He, He, & Fu, 2010; Wilson et al., 2017).

Tras detallar en las evaluaciones económicas de estos proyectos, la mayoría se orientan mayoritariamente a analizar los parámetros de rentabilidad y productividad de la zona receptora; a comparar los costos con otras alternativas de suministro de agua dulce, como la desalinización (Hernández Hernández & Morales Gil, 2008; Uche et al., 2015; Wilson et al., 2017); o a calcular el valor económico del agua (Calatrava & Martínez-Granados, 2012). No se encontró estudios que evalúen los efectos económicos redistributivos asociados a la implementación de este tipo de proyectos.

TALD en Chile

En cuanto al contexto chileno, este no está muy alejado de la realidad mundial. Chile cuenta con las tierras más secas del mundo en su zona norte y la desertificación avanza a un ritmo/velocidad de 400 metros al año hacia el sur (PNUD, 2013), mas, existen actividades en esta zona que requieren de grandes volúmenes de agua dulce para su operación. El resultado es que la zona norte está viviendo escasez hídrica que implica conflictos, reducción de la productividad industrial y degradación ambiental inevitable (Aitken, Rivera, Godoy-Faúndez, & Holzapfel, 2016; CR2, 2015).

Actualmente existen sólo canales, como el Laja-Diguillín o el Teno-Chimbarongo (Arumí-Ribera, Rivera-Salazar, Rougier-Herrera, & Díaz-Borquez, 2012; Reguemos Chile, 2016). No obstante, en el MOP hay 3 propuestas de proyectos

de transferencia de agua a larga distancia: Aquatacama, la Carretera Hídrica y la Vía Hídrica del Norte de Chile.

Estas propuestas buscan redistribuir el agua a lo largo del territorio nacional de forma que la agricultura y la minería puedan operar sin ver alterada su productividad y resguardando el agua presupuestada para uso doméstico. Los tres proyectos apuntan a extraer agua principalmente desde la cuenca del río Bio Bío. El argumento principal es que el agua al desembocar en el mar se está perdiendo y puede ser aprovechada en distintos puntos río arriba sin generar un impacto ambiental ni productivo en la octava región (DOH, 2018; Reguemos Chile, 2016; Romeu Fernández, 2014; Via Marina, 2016b).

El primer proyecto, Aquatacama, es propuesto por el grupo francés Vinci, un consorcio de empresas constructoras. Su principal objetivo es extraer agua desde el límite de salinidad de la desembocadura de los ríos Bio Bío, Maule y Rapel, para trasladarla a una tasa variable de hasta 100 m³/s por tubos flexibles submarinos de 2500 kms, abasteciendo desde Quilimarí hasta Arica con estaciones de bombeo para descarga cada 100-300 kms (Via Marina, 2016a). Así, busca abastecer a la industria minera del norte y generar 100.000 nuevas hectáreas de riego. Con un costo de 0,7 USD/m³ y un consumo energético asociado de 0,9 kWh/m³, considera una inversión de USD 15 millones (Fundación Chile, 2019; Via Marina, 2016b, 2016a).

El segundo proyecto en estado de evaluación es “Vía Hídrica del Norte Chile”; liderado por el consorcio español Euro Engineering Group. Su principal objetivo es asegurar el consumo doméstico y ser una medida paliativa ante la escasez hídrica en el norte. Con una inversión de 7.300 millones de dólares, contempla trasladar, a través de 2400 kms de tubería tradicional de acero siguiendo la trayectoria de la ruta 5, un caudal constante de 25 m³/s de agua desde los ríos Bio Bío, Maule y Rapel hasta el tramo comprendido entre Arica y Valparaíso, dividido en 5 m³/s para consumo humano, 15 m³/s para minería y 5 m³/s para la agricultura de las regiones de Atacama, Tarapacá y Arica y Parinacota (DOH, 2018; Romeu Fernández, 2014; Sáez Gallardo, 2015).

Como último y tercer proyecto está la Carretera Hídrica de la corporación Reguemos Chile, que apunta a convertir al país una potencia agroalimentaria a nivel mundial, tras duplicar sus exportaciones, y justifica su efectividad en los excedentes de agua de los ríos de la región del Bio Bío. Este proyecto pretende trasladar agua a través de un ducto impulsado por gravedad a la altura de la cordillera dividido en 5 tramos, que a través de un proceso de reserva y entrega de agua alternado que va desde el embalse Ralco hasta Huasco, generará 548.473 hectáreas de nuevas zonas de riego, distribuidas entre la región del Maule y de Atacama. Considera un caudal ecológico equivalente al 50% del caudal generado en escorrentía bajo un 95% de excedencia, un parámetro de eficiencia de riego del 75% y un caudal de extracción que varía entre el 10% y el 40% del caudal total del río según el mes del año (Reguemos Chile, 2016).

Si bien los tres proyectos reportan una serie de beneficios para el norte del país y tienen algunas ventajas de costo o eficiencia sobre alternativas de solución a la escasez, como la desalación, embalsar o uso de aguas subterráneas; comparten aspectos negativos de su implementación, relacionados al alto costo de inversión más los impactos sociales y ambientales a corto y largo plazo en las regiones de extracción, que no están siendo considerados en los estudios de prefactibilidad que están realizando sus respectivas instituciones (Dourojeanni, 2014; Fundación Chile, 2018; He et al., 2010; Vargas et al., 2020a; WWF, 2007).

Cabe destacar, que más allá de los estudios realizados por las propias instituciones detrás de cada proyecto, no existen estudios cuantitativos o de modelación que respalden o desarrollen un análisis crítico de alguno de los proyectos ya mencionados. No obstante, durante el segundo semestre del 2020 se presentaron cuatro publicaciones que advierten sobre la inviabilidad e inconveniencia de este tipo de proyectos en nuestro país, además de rebatir que el agua se pierde al llegar al mar tras hacer hincapié en las funciones ecológicas que cumplen estas aguas en los ecosistemas costeros (Figuerola et al., 2020; Valdés-Negrón et al., 2020; Vargas et al., 2020a, 2020b)

Estudios de asignación de recursos hídricos

Con respecto a la existencia de estudios cuantitativos o de modelación matemática, sí existen registros y metodologías en el resto del mundo que han evaluado cuestiones relacionadas con la gestión del agua en general. Es más,

según la revisión realizada por Graveline (2016), la programación matemática es preferida por sobre otros métodos empíricos de economía para estos análisis; principalmente por la capacidad de poder detallar funciones de producción específicas de los cultivos que relacionan directamente el rendimiento con insumos como agua o fertilizantes, lo que asegura una comprensión detallada de los efectos de las políticas/escenarios.

Los modelos desarrollados en torno al análisis de recursos hídricos se han orientado principalmente en: evaluaciones de la gestión de aguas (Reca, Roldán, Alcaide, López, & Camacho, 2001); asignación de agua para riego en condiciones de escasez (Bernardo, Whittlesey, Saxton, & Bassett, 1987; Kuschel-Otárola, Rivera, Holzapfel, Palma, & Godoy-Faúndez, 2018); medición de impactos del cambio climático en la agricultura (Ponce et al., 2014; Stehr, Debels, Romero, & Alcayaga, 2008), entre otros.

Pero más específicamente, dentro de los tipos de modelación resaltan los modelos HE. Son modelos de optimización que – en el contexto agrícola – combinan los impactos físicos relacionados al cambio climático y alteraciones en la disponibilidad de agua, con la capacidad de respuesta económica de los agricultores. En general, su objetivo es maximizar un valor para toda la zona estudiada, que puede ser ingresos, producción o un excedente sujeto a restricciones hidrológicas, agrónomas e institucionales. Estos modelos proponen dos aproximaciones: la holística, donde todas las variables son resueltas de

forma endógena mediante un sistema de ecuaciones; y la aproximación modular, que conecta los módulos biofísico y socioeconómico, a través de los datos de salida de un módulo para proveer información de entrada necesaria para el otro módulo (Ossa-Moreno et al., 2018; Ponce et al., 2017).

La manera en que se alimenta el modelo también es una variable relevante, si la modelación es a escala de cuenca, las herramientas más usadas para obtener los datos de entrada son la Hydrologic Simulation Package Fortran (HSPF), el Soil Water Assessment Tool (SWAT), o el Système Hydrologique Européen (SHE). Todos estos otorgan la posibilidad de generar hidrogramas, calcular rendimientos de cultivos, proveer alternativas para simulaciones continuas, etc (Stehr et al., 2008).

En cuanto a las aplicaciones que se les ha dado a estos modelos, se han enfocado más en: eficiencia del uso del agua (Rosegrant et al., 2000), calidad de agua (Peña-Haro, Llopis-Albert, Pulido-Velazquez, & Pulido-Velazquez, 2010; Peña-Haro, Pulido-Velazquez, & Llopis-Albert, 2011; Riegels et al., 2011; Volk et al., 2008), impactos económicos de la variabilidad hídrica (Fernández, Ponce, Blanco, Rivera, & Vásquez, 2016; Graveline, Majone, Van Duinen, & Ansink, 2013; M. P. Maneta et al., 2009; M. Maneta et al., 2009; Torres et al., 2012), impactos económicos del cambio climático (Esteve, Varela-ortega, Blanco-gutiérrez, & Downing, 2015; Hurd & Coonrod, 2012; Jiang & Grafton, 2012; Ponce, Parrado, Stehr, & Bosello, 2016; Varela-Ortega et al., 2014; Yang, Brown,

Yu, & Savitsky, 2013; You & Ringler, 2010), decisiones de plantación de cultivos (Yu, Tisdell, & Salbe, 2003), etc.

Expuesto lo anterior, es la falta de estudios con modelación matemática para las propuestas de trasvase de agua en Chile lo que motiva esta investigación. Para ello se implementó un modelo HE que evalúa el impacto económico asociado a la ejecución de estos proyectos con las condiciones actuales y bajo una proyección al año 2045 usando un escenario de cambio climático RCP 8.5, que está asociado a una alta emisión de gases de efecto invernadero y poco control sobre sus restricciones (IPCC, 2014).

METODOLOGÍA

Este capítulo exhibe la fundamentación del objeto de estudio: un proyecto genérico creado a partir de los 3 proyectos reales en actual etapa de estudio en Chile. Además, se detalla y justifica el modelo a utilizar, sus variables y los datos ingresados en él.

La evaluación económica realizada en esta investigación es sobre un proyecto genérico hipotético de trasvase de agua implementado en Chile, que extrae agua desde una sub-cuenca del río Bio Bío – cuenca del río Vergara para entregarla a la provincia de Cardenal Caro, en la región de O'higgins.

El proyecto es una versión inspirada mayoritariamente en el proyecto Carretera Hídrica de la corporación Reguemos Chile, ya que es del que más información hay publicada, el que está más cerca de ser ejecutado y el único que está destinado a potenciar exclusivamente la agricultura; los otros dos aspiran a favorecer también la minería y el consumo doméstico.

Caso de estudio

Chile cuenta con un patrimonio hidrológico de 101 cuencas, que nutren 1251 ríos que suman una esorrentía anual de 29.245 m³/s y con una fuerte influencia del fenómeno climático El Niño-La Niña, que explica en parte la variabilidad climática a lo largo del país. Pero lleva más de 10 años sufriendo una mega sequía que ha generado un déficit de precipitaciones entre el 20 y 40% desde el 2010 (Garreaud

et al., 2019). Esto ha traído múltiples repercusiones, sobre todo en la disponibilidad y accesibilidad al agua dulce, y por consecuencia, la actividad agrícola se ha visto fuertemente afectada, viéndose en la obligación de adaptarse: reasignar y redefinir sus cultivos y modificar sus estrategias de irrigación (CNR, 2011; Santibáñez, 2017; Stehr et al., 2019).

La industria agropecuaria consume el 82% de los recursos hídricos disponibles en Chile, y producto del crecimiento poblacional y el desarrollo económico, la demanda de agua va en aumento con el tiempo (DGA, 2016). Siendo la agricultura una actividad fundamental para la seguridad alimentaria un país, y frente a la reducción de la disponibilidad de agua, se ha considerado indispensable la inversión en infraestructuras para riego y para paliar la escasez. Así, la transferencia de agua surgió como una posible medida de adaptación (CAF, 2015; CNR, 2011).

Los 3 proyectos que se están evaluando en Chile coinciden su zona de extracción en el río Bio Bío. Dicho río conforma la cuenca que lleva su nombre, que es de las cuencas de río más importantes del país y de alta relevancia estratégica en términos económicos (INE, 2016). Dentro de sus sub-cuencas, la del río Vergara es la mayor, tiene una extensión de 4.260 km² e incluye 3 comunas de la región del Bio Bío y 7 de la región de la Araucanía (Stehr, Debels et al. 2008). Es por este motivo, además de la preexistencia de múltiples estudios sobre esta sub-

cuenca, que se eligió como zona emisora del proyecto (Fernández et al., 2016; Ponce et al., 2014, 2017, 2016; Stehr, Debels, & Luis, 2010; Stehr et al., 2008).

La cuenca está geográficamente 600 kms al sur de Santiago, su economía se caracteriza principalmente por la presencia de la industria forestal, pequeños agricultores y exportadores de fruta. Si bien las forestales predominan en el uso de suelo, en términos socioeconómicos la actividad más relevante es la agricultura, especialmente cultivos y frutas (Ponce et al., 2017).

Por último, su actividad agrícola está representada por 13 actividades, agrupadas según cultivos y frutas. Los cultivos corresponden a porotos, maíz, papas, remolacha azucarera, trigo y las frutas a manzanas, aceitunas, cerezas, peras, duraznos, nueces, uvas de mesa y de vino (Ponce et al., 2017).

En cuanto a la zona receptora, se decidió la región de O'Higgins dado que desde octubre 2019 que está decretada como zona de escasez hídrica, en agosto del mismo año se definió situación de emergencia agrícola para toda la región (Diario Oficial de la República de Chile, 2019; MOP, 2019, 2020a) y, además, es la primera región, de sur a norte, cuyas nuevas hectáreas de riego planificadas son 100% abastecidas por la Carretera Hídrica (Reguemos Chile, 2016). Dentro de ésta, se optó por la provincia de Cardenal Caro.

La provincia cuenta con 6 comunas, un total de 3.295 km² (BCN, s. f.) y su agricultura está representada por 11 actividades: Porotos, maíz y papas por el

lado de los cultivos, y palta, aceitunas, duraznos, naranjas, ciruelas, nueces, uvas de mesa y de vino dentro de las frutas.

El proyecto

Para la determinación de los flujos hidrológicos, en el caso de la cuenca del río Vergara fueron previamente calculados (Stehr et al., 2008), mientras que los de la provincia de Cardenal Caro se asumieron considerando las diferencias de altitud entre cada comuna. Con respecto a la ruta de trasvase, a modo de que el efecto del proyecto sea más significativo, el trasvase se realizó desde la comuna de Nacimiento, ya que es la última en ocupar agua dentro de su cuenca, para ser en la comuna de Litueche, que es la comuna de mayor altitud promedio y por ende, la primera en el esquema de flujos de la provincia (ESRI, s. f.).

Como resultado, los flujos hidrológicos siguen la estructura de la figura 3 – 1, donde las flechas negras corresponden a cómo se mueve el agua y la flecha roja representa el trasvase desde la cuenca del río Vergara a la provincia de Cardenal Caro.

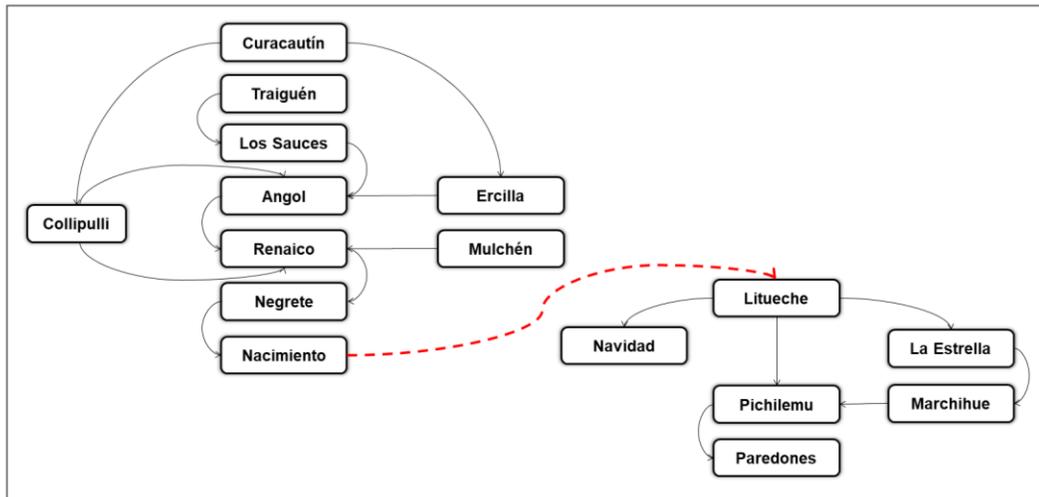


Figura 3 – 1. Esquema representativo de los flujos hidrológicos de la cuenca del río Vergara y de la provincia de Cardenal Caro, más el flujo del trasvase. Elaboración propia.

Los datos asociados a las actividades agrícolas, costos, sistemas de agua, precios y elasticidades que se ingresaron en el modelo fueron extraídos de la base de datos utilizada por Ponce et al (2017), cuyo origen data del Censo agrícola del año 2007 y estudios previos (INE 2007, Britz and Witzke 2008, ODEPA 2010, Foster et al. 2011). Sin embargo, fueron actualizados al 2018 desde los catastros frutícolas, catastros vitícolas, fichas de precios al productor y fichas de costo de cultivos de la ODEPA, y el portal de precios al productor históricos de FAOSTAT (FAO, 2019; ODEPA, 2019).

El modelo

El modelo desarrollado para esta investigación es un modelo de programación matemática, del tipo HE, diseñado para evaluar problemas de la agricultura asociados a recursos hídricos. Propone una aproximación modular y está desagregado a nivel comunal tanto para la cuenca del Vergara como la provincia

de Cardenal Caro. Sus principales ventajas por sobre otros tipos de modelación son que requiere pocos datos de entrada y que permite evaluar proyectos o intervenciones ex-ante.

Las características hidrológicas del modelo fueron definidas usando el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que es una herramienta desarrollada por el departamento de agricultura de estados unidos durante los 90's. El uso de esta herramienta se debe a que, para aplicaciones prácticas en algunos lugares del mundo, entre esos Chile, la disponibilidad de datos meteorológicos acota las opciones de modelos a usar (Stehr et al., 2008). De acuerdo con Stehr (2008), dada la disponibilidad de datos meteorológicos para el territorio nacional, el modelo SWAT es una herramienta útil y suficiente de aplicar para la evaluación de potenciales impactos de uso de tierra y el cambio climático en la hidrología de las cuencas chilenas.

En contraste, las características económicas del modelo, que reflejan el comportamiento económico de los agricultores, se definieron usando un modelo de suministro agrícola no lineal (ASM, por sus siglas en inglés), que es un modelo de programación matemática diseñado para analizar el sector agrícola con un alto nivel de desagregación geográfica. Incluye la mayoría de las actividades dentro del área y distingue entre sistemas de abastecimiento de agua por riego o irrigación. En términos simples, el ASM explica la demanda de agua derivada en función de la asignación de tierras entre los distintos cultivos (Ponce et al., 2014).

Conceptualmente, el modelo se sustenta en que el agua disponible para una comuna se determina desde la dotación total de la cuenca, con el agua asignada para esa comuna sumado al agua que no ocupó la comuna anterior. Así, si una comuna no ocupó la totalidad de sus recursos hídricos asignados, aumentará la disponibilidad de agua para la comuna que sigue río abajo (Ponce et al., 2017).

Por último, por falta de información y a modo de simplificación, es relevante aclarar que se asumen como constantes todas las variables no consideradas por el modelo, como temporalidad, accesibilidad al recurso, disponibilidad técnica y económica de los agricultores de implementar los cambios que sugieran los resultados, ni variaciones en la superficie usada por de alguna otra actividad, como el forestal o inmobiliaria, por ejemplo. Además, se asume que el costo de traslado de agua dentro de las cuencas y a través del proyecto es \$0 y que las pérdidas de eficiencia de traslado del proyecto son despreciables ($hd_c \rightarrow 1$). Finalmente, el modelo queda definido según las siguientes ecuaciones:

$$Z = \sum_c \sum_a \sum_s (Y_{c,a,s} * P_a - AC_{c,a,s}) * X_{c,a,s} \quad (1)$$

Sujeto a,

$$AC_{c,a,s} = \alpha_{c,a,s} * (X_{c,a,s})^{\beta_{c,a,s}} \quad (2) \quad WNU_c = DW_c + WNU_{-c} - \frac{FW_c}{hd_c} \quad (6)$$

$$WR_c = \sum_a fir_{c,a,irr} * X_{c,a,irr} \quad (3) \quad \sum_a \sum_s X_{c,a,s} \leq tland_c \quad (7)$$

$$FW_c \leq (DW_c + WNU_{-c}) * hd_c \quad (4) \quad \sum_a \sum_{irr} X_{c,a,irr} \leq iland_c \quad (8)$$

$$WR_c \leq FW_c \quad (5)$$

Índices:

c: Comuna, que incluye las 10 de la cuenca del río Vergara y las 6 de Cardenal Caro

a: Actividad, que califica como cultivo o fruta

s: Sistema de riego, que puede ser seco o irrigación

Variables y parámetros:

Z → Función objetivo, maximizar ganancia total [\$MM]

X_{c,a,s} → Variable de decisión, hectáreas a asignar en cada comuna, para cada tipo de cultivo según su sistema de riego [ha]

Y_{c,a,s} → Rendimiento de cada tipo de cultivo según la comuna y sistema de riego [ton/ha]

P_a → Precio al productor de cada tipo de cultivo [\$MM/ton]

AC_{c,a,s} → Costo promedio por tipo de cultivo en cada comuna, de acuerdo con el sistema de riego [\$MM/ha]

α_{c,a,s} ; β_{c,a,s} → Parámetros de costo, derivados de un equilibrio de maximización de ganancias tras la calibración del modelo

WR_c → Requerimiento de agua de cada comuna [m³]

f_{ir}_{c,a,irr} → agua para irrigación que necesita cada tipo de cultivo en cada comuna [m³]

FW_c → Agua disponible para riego en cada comuna [m³]

DW_c → Dotación de agua de cada comuna [m³]

WNU_{-c} → Agua sobrante de la comuna anterior [m³]

hd_c → Parámetro de eficiencia de traslado

WNU_c → Agua no utilizada, sobrante en cada comuna [m^3]

La ecuación (1) es la función objetivo, que busca maximizar la utilidad total de los agricultores, tras la optimización de hectáreas asignadas a cada tipo de cultivo, por comuna, según el sistema de riego.

La ecuación (2) corresponde a la función de costo, calibrada usando Programación Matemática Positiva (PMP). Ésta es una metodología formalizada por Howitt (1995) que asume que el objetivo de los agricultores es maximizar sus ingresos. Tras un procedimiento de 3 pasos, asegura reproducir de manera exacta el comportamiento de los agricultores durante el año base (Torres, Howitt, & Rodrigues, 2016).

Las ecuaciones siguientes corresponden a las restricciones del modelo. La (3) representa demanda hídrica de una comuna; la (4) restringe que oferta de agua en una comuna no puede exceder la suma de la dotación de agua de esa comuna, con el agua no usada por la comuna anterior, multiplicado por el parámetro de eficiencia de traslado. La (5) limita que la demanda de agua no puede superar la oferta disponible en una comuna; la (6) define que el agua no usada en una comuna es la diferencia entre la dotación de agua y el agua consumida en la misma comuna. Al fin, las ecuaciones (7) y (8) restringen el uso de suelos, indicando que el total de hectáreas sembradas no puede ser superior

al total de hectáreas disponibles por comuna y que las hectáreas de riego no pueden superar al total de tierra disponible para dicho sistema en cada comuna.

Se realizaron 3 simulaciones a través del software GAMS 23.5, primero con el escenario base, donde no hay transferencia de agua entre las cuencas. Cada zona ocupó sólo el agua asignada, asumiendo que la demanda de agua es igual a la oferta o agua total disponible.

Dada la escasez hídrica y situación de emergencia agrícola que se vive en toda la región de O'higgins desde 2019, se asumió que en Cardenal Caro los agricultores no cuentan con el agua suficiente para suplir su demanda ideal y que han tenido que aplicar estrategias de déficit de irrigación, lo que significa que la actividad agrícola de la primera simulación está usando el 100% del agua disponible, pero con niveles de operación bajo su potencial (Abdalhi & Jia, 2018; Chai et al., 2016; de Oliveira, Trezza, Holzapfel, Lorite, & Paz, 2009; FAO, 2012; J. Zhang et al., 2018).

Por lo tanto, para la segunda simulación del modelo, se aplicó un shock positivo sobre el rendimiento de los cultivos de Cardenal Caro, para reflejar su operación sin estrategias de déficit de irrigación. Con esto, se le permitió al modelo tener la posibilidad de incrementar las hectáreas de riego de dicha provincia y además, forzar un aumento en su dotación hídrica, pues como el modelo tiende a asignar el agua a su mayor valor, induce que a lo largo de su recorrido, ésta sea reservada para la provincia receptora del trasvase.

De acuerdo con la FAO (2012), el valor exacto de la variación de los rendimientos depende de múltiples factores además del agua suministrada, por lo que se asumió que el aumento de los rendimientos de Cardenal Caro sería el suficiente para alcanzar los rendimientos promedio a nivel nacional en el caso de los cultivos. Por lo tanto, los shocks aplicados fueron 25% a los porotos; 216% al maíz y 437% para las papas.

En el caso del rendimiento de los frutales, se aplicó un aumento de un 5% constante, ya que éstos al ser más sensibles al déficit de irrigación porque el tamaño y peso de los frutos se reduce, se asumió evitar someterlos a esta estrategia (Abdalhi & Jia, 2018; FAO, 2012).

La última simulación fue considerando los efectos del cambio climático. Se simuló un impacto de -13% promedio en la disponibilidad hídrica, tras alterar el parámetro DW_c , a través del SWAT para la cuenca del río Vergara, y con datos de variación de precipitaciones obtenidos de la plataforma de simulaciones climáticas del CR2 con el escenario RCP 8.5 proyectado al año 2045. Los resultados obtenidos de la ejecución del modelo se muestran en el capítulo a continuación.

RESULTADOS

Como se mencionó previamente, la primera ejecución del modelo se usó sólo para efectos de análisis y tener con qué comparar los efectos del proyecto. La segunda ejecución refleja la interacción de los agricultores de ambas zonas con el proyecto sin alterar el agua disponible a partir de precipitaciones, mientras que la tercera considera impactos en esta variable generados por el cambio climático, proyectado al año 2045. Con relación a los efectos inmediatos de la implementación del proyecto, se comparó en primera instancia los resultados de la primera (abreviada SIM1) contra la segunda simulación (SIM2) y para el efecto del cambio climático sobre el funcionamiento del proyecto, se comparó el resultado de la tercera simulación (SIM3) sobre el escenario SIM2.

La evaluación de los cambios se refleja en las columnas “Cambio” en cada una de las tablas presentadas más adelante. Estos valores se obtuvieron a través de la fórmula de variación porcentual relativa:

$$(SIM2 - SIM1) / SIM1$$

Por último, a modo de orden, la estructura de análisis es: primero se evalúan los efectos inmediatos de la implementación del proyecto, y después por separado se analiza la evolución de estos efectos producto del escenario de cambio climático.

En lo que respecta a las hectáreas cultivadas, los resultados indican que, tras la ejecución del proyecto, la superficie agrícola en Cardenal Caro aumentó un 16,67% en las tierras abastecidas por secano y un 1,57% en sus hectáreas de riego.

Tabla 1
Variación de superficie (ha) por comuna según sistema de riego en Cardenal Caro

	SIM1		SIM2		Cambio	
	Secano	Irrigación	Secano	Irrigación	Secano	Irrigación
Pichilemu	6,26	12,28	7,30	12,66	16,67%	3,07%
La Estrella	0	3.373,81	0	3.464,06	0%	2,68%
Litueche	0	1.060,53	0	1.108,61	0%	4,53%
Marchihue	0	5.291,73	0	5.291,73	0%	0%
Navidad	0	93,06	0	101,65	0%	9,23%
Paredones	0	180,94	0	189,98	0%	4,99%
TOTAL	6,26	10.012,35	7,30	10.168,69	16,67%	1,56%

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Como se muestra en la tabla 1, los beneficios del proyecto no son percibidos por todas las comunas de manera equivalente, siendo Navidad la comuna con un mayor aumento de superficie irrigada (9,23%), mientras que Marchihue no modificó sus hectáreas totales cultivadas.

En contraste, la tabla 2 refleja las variaciones de superficie en la cuenca del río Vergara. La superficie irrigada se redujo en 98,75 hectáreas, que corresponde a un -1,18%, mientras que la superficie de secano aumentó un 1,13%, lo que permitió dejar 1352,16 Km³ disponibles para trasvasar a Cardenal Caro.

Tabla 2
Variación de superficie (ha) por comuna según sistema de riego en Río Vergara

	SIM1		SIM2		Cambio	
	Secano	Irrigación	Secano	Irrigación	Secano	Irrigación
Mulchén	2.245,29	729,46	2.245,29	698,58	0%	-4,23%
Nacimiento	47,00	189,07	58,24	177,83	23,91%	-5,94%
Negrete	1,10	985,23	1,40	945,91	27,39%	-3,99%
Angol	20,11	1.447,45	19,48	1.448,08	-3,13%	0,04%
Collipulli	12,75	350,97	12,75	349,87	0%	-0,31%
Curacautín	24,41	74,44	24,41	74,44	0%	0%
Ercilla	58,99	103,00	58,99	103,00	0%	0%
Los Saucés	32,93	137,60	32,93	137,60	0%	0%
Renaico	11,66	3.555,33	28,49	3.538,49	144,45%	-0,47%
Traiguén	11,42	790,43	11,42	790,43	0%	0%
TOTAL	2.465,65	8.362,98	2.493,40	8.264,23	1,13%	-1,18%

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Al desagregar las cifras, se puede ver que hubo comunas que optaron por reducir una fracción de sus tierras de riego y potenciar el secano (Nacimiento, Negrete, Renaico), otras que sólo redujeron las hectáreas de riego (Mulchén, Collipulli) u otras que optaron por no alterar su superficie (Curacautín, Ercilla, Los Saucés, Traiguén). Un caso particular fue Angol, que optó por mejorar levemente sus hectáreas abastecidas por riego y reducir la superficie de secano. No obstante, esta situación se analiza más adelante al evaluar en conjunto las variaciones de rendimiento, producción e ingresos.

Tabla 3
Distribución (%) de hectáreas según actividad y sistema de riego en Cardenal Caro y Río Vergara

	Cardenal Caro		Río Vergara	
	SIM1	SIM2	SIM1	SIM2
Cultivos-Sec	0,06%	0,07%	22,77%	23,18%
Cultivos-Irr	0,90%	2,25%	30,02%	29,87%
Frutales-Irr	99,03%	97,68%	47,21%	46,95%

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Desde otra perspectiva, la tabla 3 refleja cómo cambió la ocupación de la superficie en cada zona. Así, se ve que Cardenal Caro privilegia la cosecha de frutales, ocupando más del 95% de sus hectáreas tanto antes como después del proyecto. Por el contrario, la cuenca del Vergara distribuye su tierra de manera más homogénea entre sus actividades, dejando cerca de la mitad para cada tipo de actividad, y distribuyendo los cultivos entre riego y secano también en una proporción similar, sin embargo, privilegiando los cultivos de secano tras la ejecución del proyecto, que es razonable al considerar que el agua total disponible en la cuenca disminuyó.

Para facilitar el análisis de los demás resultados, se optó por presentar tablas resumen de aquellas variaciones que son interesantes y pertinentes. El origen de los datos presentados en la tabla resumen se presentan en el Anexo 1.

En primera instancia, es preciso mencionar la variación sobre los ingresos. Se ve en la tabla 4 que el ingreso total tras la implementación del proyecto aumenta en un 5,12%, cifra que hace caso a uno de los objetivos de los proyectos de transferencia de agua, que apunta a potenciar la economía nacional.

Tabla 4
Variación total de ingresos (\$MM).

	SIM1	SIM2	Cambio
Cardenal Caro	\$ 114.882,3	\$ 124.511,2	8,38%
Río Vergara	\$ 72.620,0	\$ 72.584,0	-0,05%
TOTAL	\$ 187.502,3	\$ 197.095,2	5,12%

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Al pasar a un análisis más en detalle, se puede ver en las tablas 5 a 8 la relación entre la variación de superficie, producción, ingresos y el rendimiento para cada actividad y para cada comuna en cada una de las dos zonas estudiadas.

Tabla 5
Resumen de variaciones (%) por actividad en Cardenal Caro

Frutales	Sist.	Area	Rend.	Prod.	Ingreso
Palta	irr	4,25%	5,00%	8,28%	8,15%
Uva de mesa	irr	2,43%	5,00%	7,55%	8,11%
Aceituna	irr	3,12%	5,00%	8,19%	8,12%
Naranja	irr	22,37%	5,00%	28,49%	12,86%
Durango	irr	8,92%	5,00%	11,88%	8,63%
Ciruela	irr	1,12%	5,00%	6,27%	7,92%
Uva de vino	irr	-1,95%	5,00%	2,43%	6,46%
Nuez	irr	2,46%	5,00%	7,10%	7,98%
Cultivos					
Poroto	irr	-38,41%	25,00%	-38,41%	-16,45%
Maíz	irr	94,62%	216,00%	320,67%	346,38%
Papa	sec	16,67%	0,00%	4349,45%	3880,17%
	irr	1110,09%	437,00%		
TOTAL		1,57%	65,00%	9,01%	8,38%

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Tras la mejora de los rendimientos, impuesta como parámetro dentro del modelo, se explica en las tablas 5 y 6 por qué Cardenal Caro no tuvo la necesidad de ocupar la totalidad de nuevas hectáreas que se le pusieron a disposición y optó por ampliar en sólo un 1,57% su superficie total. Como balance general, las

variaciones totales no reflejan proporcionalidad con el aumento en los rendimientos; éste se promedió en un 65% para el total de las actividades de la provincia, lo que llevó a un aumento de 9,01% su producción, asociado a un aumento de 8,38% en los ingresos netos.

En relación con los frutales, que sólo aumentaron un 5% su rendimiento, destaca la cosecha de naranjas, con un aumento de 28,49% en su producción que está fuertemente relacionada a su aumento de superficie, lo que dio un aumento de 12,86% en sus ingresos. No así el caso de la uva vinífera que, a pesar de haber reducido sus hectáreas, el 5% de aumento en su rendimiento fue suficiente para mejorar su producción y, por ende, ingreso final.

Tabla 6
Resumen de variaciones (%) por comuna en Cardenal Caro

Cardenal Caro	Sist.	Area	Rend.	Prod.	Ingreso
La Estrella	irr	2,68%	85,00%	9,80%	8,08%
Litueche	irr	4,53%	5,00%	9,70%	8,16%
Marchihue	irr	0,00%	88,00%	8,10%	8,43%
Navidad	irr	9,23%	5,00%	13,90%	9,02%
Paredones	irr	4,99%	5,00%	10,26%	8,67%
Pichilemu	sec	16,67%	0,00%	8,99%	9,00%
	irr	3,07%	5,00%		

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Abordando una perspectiva desde las comunas, la tabla 6 muestra que todas tienen un balance positivo en todas las variables analizadas y un aumento de sus ingresos que es proporcional entre cada comuna y con el total de la provincia. No obstante, como Pichilemu es la única comuna que tiene sus tierras divididas entre irrigación y secano, tuvo la necesidad de tener que aumentar su superficie de

cosechas en un mayor porcentaje que el resto de las comunas para hacer crecer su rentabilidad.

Tabla 7
Resumen de variaciones (%) por actividad en Río Vergara

Frutales	Sist.	Area	Rend.	Prod.	Ingreso
Apple	irr	-0,30%	0,00%	-0,29%	-0,01%
Cherry	irr	-0,29%	0,00%	-0,24%	-0,01%
Grapes	irr	0,02%	0,00%	0,02%	0,00%
Olive	irr	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Peach	irr	-0,13%	0,00%	-0,15%	-0,01%
Pear	irr	-1,91%	0,00%	-1,91%	-0,09%
Vineyard	irr	-6,88%	0,00%	-7,10%	-1,93%
Walnut	irr	-1,18%	0,00%	-0,81%	-0,05%
Cultivos					
Poroto	irr	-2,91%	0,00%	-1,63%	-0,23%
Maíz	irr	-2,37%	0,00%	-2,13%	-0,24%
Papa	sec	12,56%	0,00%	1,21%	0,48%
	irr	-0,68%	0,00%		
Remolacha azucarera	irr	-0,80%	0,00%	-0,81%	-0,31%
Trigo	sec	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
TOTAL		-0,66%	0,00%	-0,59%	-0,05%

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Caso contrario, como en la cuenca del río Vergara no hubo alteraciones en los rendimientos, el único cambio fue una reducción en el agua consumida por cada comuna y el modelo busca maximizar el ingreso neto a pesar de los efectos negativos asociados a la reducción de agua, los impactos negativos totales sufridos por cada variable sí son proporcionales entre sí. De acuerdo con la tabla 7, el ingreso neto de la cuenca sufrió una baja de 0,05%, asociada a una reducción en la producción de 0,59% y en la superficie total de 0,66%. Cifras que

en su mayoría son similares a las variaciones experimentadas por las distintas actividades de la cuenca.

Las excepciones son la uva vinífera, que redujo su superficie y producción en un redondeo del 7%, y las papas de secano que aumentaron su superficie en casi un 13%. A pesar de lo anterior, ambas actividades tuvieron una alteración en sus ingresos más bien baja.

En cuanto al detalle por comuna, en la tabla 8 resalta Renaico, que a tuvo que reducir un 0,47% su superficie de riego y a pesar de intentar compensar con un aumento de 144,45% en la tierra de secano, no pudo evitar reducir su producción e ingresos, no obstante, fue una variación menor a un 1%. Las demás comunas no sufren mayores variaciones, con excepción de Nacimiento y Negrete, que también compensaron la reducción de sus hectáreas de riego aumentando las de secano y lograron que esto no afectara en sus ingresos.

Tabla 8
Resumen de variaciones (%) por comuna de Río Vergara.

Río Vergara	Sist.	Area	Rend.	Prod.	Ingreso
Angol	sec	-3,13%	0,00%	0,05%	-0,12%
	irr	0,04%			
Collipulli	sec	0,00%	0,00%	-0,16%	-0,36%
	irr	-0,31%			
Curacautín	sec	0,00%	0,00%	0,00%	-0,48%
	irr	0,00%			
Ercilla	sec	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	irr	0,00%			
Los Sauces	sec	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%
	irr	0,00%			
Mulchén	sec	0,00%	0,00%	-2,13%	0,00%
	irr	-4,23%			
Nacimiento	sec	23,91%	0,00%	-3,21%	0,00%

	irr	-5,94%			
Negrete	sec	27,39%	0,00%	-2,87%	0,00%
	irr	-3,99%			
Renaico	sec	144,45%	0,00%	-0,56%	-0,02%
	irr	-0,47%			
Traiguén	sec	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	irr	0,00%			

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Como se observó previamente, llama la atención la comuna de Angol, que optó por reducir sus hectáreas de secano más aumentar en un 0,04% sus hectáreas irrigadas, sin dejar agua de excedente para sumar a la dotación de Renaico, que es la comuna que sigue río abajo. Contra lo esperado, aumentó en un 0,05% su producción, pero sus ingresos se redujeron un 0,12%.

Lo anterior se puede clasificar como “efectos inmediatos” o a corto plazo, por lo tanto, pierde efectividad al intentar analizar proyecciones y la sostenibilidad en el tiempo del proyecto; ya que sabemos que el cambio climático tiene impactos y consecuencias directas en la agricultura que se están empezando a reflejar ahora y que tendrán un mayor efecto en unos años más.

Por ello se optó por ejecutar una simulación del modelo bajo un escenario a 25 años con condiciones pesimistas dentro de las posibles de desarrollo de este fenómeno. Y para el análisis de sus efectos sobre el proyecto, se evaluó la variación de los resultados del escenario SIM3, que es el escenario de cambio climático, contra el escenario SIM2 como escenario base, que refleja los resultados inmediatos de la puesta en marcha del proyecto.

Como la variable de interés es el impacto porcentual sobre el comportamiento del proyecto, se presentan únicamente los resultados de la variación porcentual relativa de los ingresos, superficie y producción. Para los resultados de las ejecuciones del modelo en detalle ir al Anexo 1.

Tabla 9
Variación total de ingresos (\$MM)

	SIM2	SIM3	Cambio
Cardenal Caro \$	124.511,2	\$ 123.114,8	-1,12%
Río Vergara \$	72.584,0	\$ 71.537,7	-1,44%
TOTAL	\$ 197.095,2	\$ 194.652,5	-1,24%

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

La tabla 9 presenta los resultados de la maximización de ingresos netos totales y para cada zona bajo los 2 escenarios analizados. Si bien, el monto total del escenario SIM3 sigue siendo mayor a los \$187.502MM del escenario base, éste se redujo en un 1,24% en relación al escenario SIM2, lo que equivale a una mejora total de 3,81% en el ingreso neto con respecto al escenario base SIM1. Con respecto a los cambios en cada zona, ambas sufren una reducción en sus ingresos, sin embargo, se traduce en una reducción de ganancia para la zona receptora del trasvase y en un empeoramiento de las pérdidas en la zona emisora.

Tabla 10
Resumen de variaciones (%) por actividad en Cardenal Caro

Frutales	Sist.	Área	Prod.	Ingreso
Palta	irr	-0,76%	-1,23%	-0,08%
Uva de mesa	irr	-1,17%	-1,17%	-0,05%
Aceituna	irr	-1,10%	-1,08%	-0,05%
Naranja	irr	3,09%	3,09%	0,12%
Durazno	irr	-0,02%	-1,70%	-0,44%
Ciruela	irr	-4,56%	-4,04%	-1,11%
Uva de vino	irr	-19,14%	-17,11%	-9,67%
Nuez	irr	-5,63%	-6,28%	-1,42%
Cultivos				
Poroto	irr	21,92%	21,92%	10,06%
Maíz	irr	2,33%	2,28%	0,04%
Papa	sec	0,00%	-7,80%	-3,09%
	irr	-5,57%		

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Referente a los cambios en la provincia de Cardenal Caro, en la tabla 10 se evidencia una reducción de ganancia en prácticamente todas sus actividades, con excepción de las naranjas, que nuevamente sobresalen sobre los demás frutales siendo esta vez los únicos que aumentan su superficie, producción y por ende, ingresos, solo que esta vez en una magnitud menor; y a excepción del maíz y los porotos por el lado de los cultivos. Los segundos, a diferencia de la comparación anterior, esta vez recuperan parte de las hectáreas y producción que habían reducido desde el escenario base al SIM2.

El comportamiento desde una perspectiva comunal es distinto. La tabla 11 muestra que Paredones y Pichilemu no mostraron variación alguna, lo que significa que equilibraron las alteraciones de sus actividades, y/o que las

actividades que sufrieron alguna variación se concentran en las comunas de La Estrella, Litueche, Marchihue y Navidad.

Como última observación, de todas las comunas con alteraciones destaca Litueche, que a pesar de reducir en más de un tercio su superficie agrícola y su producción, sus ingresos no varían más de un -10%, en cambio Navidad, si bien aumentó sus valores, fue en una magnitud mínima y constante entre las 3 variables.

Tabla 11
Resumen de variaciones (%) por comuna de Cardenal Caro

	Sist.	Área	Prod.	Ingreso
La Estrella	irr	-4,26%	-3,15%	-0,39%
Litueche	irr	-35,92%	-35,05%	-9,96%
Marchihue	irr	-10,87%	-8,73%	-1,94%
Navidad	irr	0,90%	0,70%	0,01%
Paredones	irr	0,00%	0,00%	0,00%
Pichilemu	sec	0,00%	0,00%	0,00%
	irr	0,00%	0,00%	0,00%

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

En el otro extremo de la transferencia de agua, la situación en la cuenca del río Vergara sólo empeora tras los efectos en la dotación de agua producto del cambio climático. El 100% de sus actividades irrigadas sufrieron reducción de su superficie, producción e ingresos, siendo las papas de secano las únicas que aumentaron su superficie; Sin embargo, como se ve en la tabla 12, no fue una magnitud de mejora suficiente para compensar la reducción de su producción e

ingresos. Un caso particular es el trigo, que además de ser una actividad de secano, no sufrió modificaciones en ninguna de sus variables.

Tabla 12
Resumen de variaciones (%) por actividad de Río Vergara

Frutales	Sist.	Área	Prod.	Ingreso
Manzana	irr	-1,99%	-1,95%	-0,18%
Cereza	irr	-4,66%	-3,10%	-0,74%
Uva de mesa	irr	-1,64%	-1,64%	-0,16%
Aceituna	irr	-8,00%	-8,00%	-2,43%
Durazno	irr	-13,45%	-12,57%	-3,68%
Pera	irr	-5,11%	-5,10%	-0,68%
Uva de vino	irr	-25,75%	-23,41%	-16,04%
Nuez	irr	-6,45%	-4,55%	-1,07%
Crops				
Poroto	irr	-12,43%	-10,13%	-2,68%
Maíz	irr	-10,79%	-9,90%	-3,00%
Papa	sec	20,69%	-16,73%	-11,88%
	irr	-31,45%		
Remolacha azucarera	irr	-35,18%	-35,20%	-22,18%
Trigo	sec	0,00%	0,00%	0,00%

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Finalmente, desde un análisis enfocado en las comunas, se repite el patrón de reducción de ingresos en el 100% de las comunas. Cerca de la mitad, dejando fuera Collipulli, Mulchén, Negrete y Traiguén, amortiguaron el impacto de la falta de agua al potenciar sus actividades de secano asignándoles más hectáreas, sin embargo, no fue suficiente pues el 100% de las comunas presenta una variación negativa en su producción.

Tabla 13
Resumen de variaciones por comuna de Río Vergara

	Sist.	Área	Prod.	Ingreso
Angol	sec	36,72%	-23,48%	-1,73%
	irr	-16,28%		
Collipulli	sec	0,00%	-6,66%	-1,88%
	irr	-13,92%		
Curacautín	sec	41,22%	-9,74%	-10,24%
	irr	-13,52%		
Ercilla	sec	9,95%	-4,73%	-1,75%
	irr	-16,38%		
Los Sauces	sec	21,71%	-2,10%	-0,67%
	irr	-5,20%		
Mulchén	sec	0,00%	-4,82%	-0,89%
	irr	-11,04%		
Nacimiento	sec	25,05%	-4,48%	-1,07%
	irr	-8,48%		
Negrete	sec	0,00%	-8,27%	-2,10%
	irr	-10,93%		
Renaico	sec	23,26%	-18,23%	-1,11%
	irr	-16,96%		
Traiguén	sec	0,00%	-5,96%	-1,53%
	irr	-16,43%		

Nota: Tabla hecha en base a los resultados de la modelación

Cabe mencionar también, la evidencia de una variación no proporcional entre la producción e ingresos dentro de cada comuna en la tabla 13, siendo los ingresos menos sensibles a los efectos del cambio climático que la producción.

DISCUSIÓN

A grandes rasgos, los resultados obtenidos arrojaron que, si bien la utilidad total del modelo aumenta tras la implementación del proyecto, las ganancias obtenidas en Cardenal Caro van en detrimento de la cuenca del río Vergara.

Si se relacionan los resultados de la modelación con el proyecto Tajo-Segura de España y se extrapola en base a este, se puede inferir que el agua total trasvasada desde el río Vergara a Cardenal Caro será menos que los 1352,16 Km³ proyectados por el modelo; por lo tanto, el agua disponible para irrigación será menor, afectando los rendimientos, hectáreas y producción total de Cardenal Caro. Como resultado, la utilidad total de la zona receptora sería menor a la proyectada en el escenario SIM2 (Hernández Hernández & Morales Gil, 2008).

Con respecto al proyecto Tajo-Segura, el gran defecto que tuvo fueron los cálculos con data significativamente sobreestimada de la disponibilidad hídrica en la cuenca donante, lo que generó margen de error entre la teoría y la realidad con efecto dominó en toda la estructura y proyecciones del trasvase (Pittock et al., 2009).

Además, los cambios en el uso de suelo y el clima en la cuenca del Tajo han generado una reducción sobre el 47% en los flujos promedio del río en los últimos 50 años. El trasvase se proyectó y planificó con una transferencia anual de 0,6 km³, mas el volumen de transferencia actual fluctúa entre 0,2 y 0,4 km³ al año.

En cuanto al manejo económico, se estableció que parte de los ingresos generados por la transferencia de agua sería transferido a la cuenca donante a modo de compensación, sin embargo, como los usuarios pagan sólo en proporción a lo que en realidad reciben, actualmente no han pagado más del 30% de lo proyectado y las comunas de la cuenca emisora han recibido una compensación menor a la presupuestada. Sumado a esto, la cuenca del Tajo ha sufrido impactos ecológicos, económicos, sociales y sanitarios producto de la extracción y reducción en su flujo (Hernández Hernández & Morales Gil, 2008; Pittock et al., 2009).

En cuanto a la resolución del problema que inspiró la ejecución del trasvase, el tener una infraestructura de transferencia de agua así de extensa fue el motor para un uso insostenible del recurso, lo que fomentó aumentos descontrolados en la agricultura de riego, la construcción ilegal de pozos y el desarrollo urbano (Pittock et al., 2009).

Morales Gil (2005) indicó además que, si bien se ha atenuado el déficit hídrico, los resultados son menos ambiciosos que lo esperado, ya que no se logró solucionar el problema de escasez. Esto en parte debido al sostenido aumento de la demanda urbana y agrícola en la cuenca del Segura y a que los volúmenes enviados han ido disminuyendo en el tiempo; dada una planificación deficiente y la no creación de reglas de funcionamiento y orden del trasvase, además de la disminución de agua total disponible por temporada en ambas cuencas.

Como sugiere Dourojeanni (2014), este tipo de proyectos generan dependencia e incentivan a la agricultura a seguir creciendo y aumentando sus hectáreas cultivables en el tiempo, llevando al proyecto a ser una solución insuficiente ante la escasez hídrica.

Por lo tanto, al analizar la situación que enfrenta nuestro país, los proyectos Aquatacama y de Reguemos Chile pueden estar en una situación similar. Las fuentes de los estudios presentados son mayoritariamente del año 2003 y del Censo agrícola 2007, cifras que difieren de la realidad actual tanto en las zonas emisoras como receptoras (Reguemos Chile, 2016; Via Marina, 2016a). Esto, junto con no considerar los efectos del cambio climático en sus evaluaciones, más el incremento de costos durante la construcción, generan un aumento en el margen de error entre las proyecciones teóricas y la operación real de los proyectos en el futuro (Boisier, Rondanelli, Garreaud, & Muñoz, 2016; Shumilova et al., 2018; Vargas et al., 2020b; WWF, 2007).

Como complemento a todo esto, la HLPE (2015) declaró que las alteraciones de patrones de lluvias y de temperatura pueden generar pérdidas agrícolas, y además (MMA, 2016; Santibáñez, 2017), han demostrado la vulnerabilidad de Chile ante este fenómeno y que ya se están percibiendo algunos efectos. Con esto, los argumentos a favor de estos proyectos enfocados en ganancias netas son cuestionables.

Retomando el proyecto simulado, llama la atención también el aumento del rendimiento de los cultivos asociado a la ejecución del modelo en Cardenal Caro. Se asumieron sobre el 100% con tal de alcanzar el promedio nacional de cada cultivo, sin considerar su factibilidad en la vida real. Por lo tanto, toda percepción de beneficio del proyecto depende de tasas de rendimiento que son poco congruentes con la realidad. Si a esto se le suma el cambio climático, se reduce aún más las certezas y objetividades detrás del proyecto, ya que, al simular los efectos del fenómeno con sólo alterar las precipitaciones, las ganancias se redujeron en un 1,24%. No se proyectó cambios en ninguna otra variable influyente como la temperatura, hectáreas disponibles, requerimientos de suelo o los precios.

Si bien el proyecto bajo estudio es un plan hipotético, el tipo de resultados arrojados por el modelo son una primera aproximación general que permite evidenciar que la implementación de un proyecto de transferencia de agua a larga distancia en nuestro país va más allá que sólo ofrecer beneficios. A pesar de que muchos (CNR, 2011; MOP, 2020b; Santibáñez, 2017) han evidenciado que urge una solución ante la escasez sitioespecífica que está afrontando nuestro país, es necesario reflejar un par de variables que no deben quedar atrás a la hora de analizar un proyecto de este calibre. En el modelo y proyecto ejecutados se revelan costos económicos a escala comunal que a grandes rasgos no son contabilizados.

Además, las ganancias de este proyecto – que fueron de \$197.095 MM en la segunda simulación y \$194.653 MM en la tercera, versus las ganancias sin el proyecto, en la simulación 1 de \$187.652 MM – dejan un margen de ganancia de alrededor de 10 mil millones de pesos y 7 mil millones de pesos, respectivamente. En estos montos, el costo de llevar a cabo el proyecto no está considerado, ya que el modelo no lo considera. Sin embargo, se comparó el diferencial de ganancias de las simulaciones 2 y 3 sobre la 1, con los costos de ejecución que han declarado las propuestas reales. Si bien Reguemos Chile aún no declara su costo total de implementación, tanto la Vía Hídrica del Norte de Chile como Aquatacama declararon costos que superan el diferencial de 10 mil millones o 7 mil millones de pesos.

Así, dejando de lado los costos sociales y ambientales que están fuera del alcance de estudio del modelo, los efectos económicos muestran que el proyecto no es netamente ganancia, como prometen los estudios de los proyectos reales; El proyecto simulado genera un aumento en la ganancia total de 5,12%, desagregado en 8,38% en Cardenal Caro y -0,05% en el río Vergara, con consecuencias en el patrón productivo de ambas cuencas. No obstante, si se considera que detrás de un proyecto así el alto costo de inversión puede aumentar, los costos sociales y ambientales no están considerados, y aun así la cuenca del río Vergara sufre una reducción de sus ingresos netos en un 0,05%, un 5,12% de aumento total no parece ser suficiente para afirmar que este proyecto genérico sea beneficioso.

Asimismo, la estructura y operación del modelo utilizado busca compensar las pérdidas de algunas actividades conjugando la rentabilidad con el rendimiento y viabilidad en pro de maximizar las utilidades. Con esto, se explica el leve porcentaje de reducción de ingresos en la cuenca del río Vergara, pues si bien se reduce la producción, esta no llega a cero. Sin embargo, esto no necesariamente ocurriría en la realidad, ya que una de las limitaciones del modelo es que considera un comportamiento maximizador de los agricultores, dejando fuera a aquellos cuyas decisiones y cosechas implican una pérdida de dinero.

De esta manera, el modelo asume que la asignación del agua está determinada sólo por factores económicos y deja fuera factores socioculturales. Así, no considera ineficiencias y asume como constantes o despreciables todas las variables no consideradas en él, por lo tanto, no considera la capacidad de respuesta operacional, técnica ni económica por parte de los agricultores de la cuenca del Vergara ante los cambios implementados por el modelo.

Extrapolando a la situación real de la cuenca del río Vergara, las regiones que la comprenden tienen una incidencia de pobreza de 12,3% (Bío Bío) y 17,2% (Araucanía) y de pobreza extrema de 3,7% y 4,6%, respectivamente. Ambas están por sobre el promedio nacional (8,6% y 2,3%) y son de las más elevadas del país, lo que sustenta lo recién mencionado en relación con la capacidad de respuesta de los agricultores ante una alteración en sus patrones productivos (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2019).

Otros efectos

Con respecto a otros efectos y variables que no son primariamente económicas, pero cuyos costos tienen un valor económico asociado, cabe resaltar dos ejemplos. El primero es que justificar la viabilidad y conveniencia de un proyecto de trasvase en la cantidad de agua de los ríos que desemboca en el mar, evidencia una gran debilidad teórica. El agua que desemboca al mar cumple funciones de manejo del ecosistema costero que son esenciales para mantener el equilibrio entre los procesos oceánicos y continentales, por lo que una alteración en este caudal alteraría la geomorfología del paisaje, las condiciones hidrográficas y oceanográficas, y una serie de procesos que se pueden resumir en la insostenibilidad de los servicios ecosistémicos asociados, como la pesca (Figueroa et al., 2020; Fundación Chile, 2016; Vargas et al., 2020b).

El segundo ejemplo está relacionado con lo que conlleva el compartir aguas. Como indican múltiples estudios (Feng et al., 2007; Habit, Belk, Tuckfield, & Parra, 2006; Meador, 1992; Rose et al., 2014; Shumilova et al., 2018; Wilson et al., 2017; WWF & WRI, 2004; L. Zhang et al., 2015), está el riesgo de transmitir enfermedades, parásitos, flora, fauna, residuos contaminantes o plagas; cada una de estas posibilidades tiene consecuencias negativas sobre el ecosistema de la cuenca donante y las receptoras.

El didymo, por ejemplo, es una microalga exótica de agua dulce que altera física, química y biológicamente los sistemas acuáticos, fue declarada plaga en 2010 y

está presente desde la cuenca del Bio Bío al sur del país. Una de sus características es que avanza de sur a norte, por lo que la implementación de un proyecto como este sólo aumentaría los riesgos y probabilidades de expandir el alcance de esta plaga, contagiando aguas de las cuencas del norte a un ritmo más acelerado al actual (Betancourt, Baffico, & Beamud, 2017; Rivera, Basualto, & Cruces, 2013).

Estos últimos dos puntos son sólo ejemplos de los múltiples resultados e impactos en otros sectores que podría tener el trasvase. El valor económico de estos impactos no está calculado, pero existe. Por ende, se corre el riesgo de exponer al país entero a un “efecto mariposa” que no está dimensionado en las apuestas de estos proyectos.

Para finalizar, empero de la sequía que vivimos hace 10 años, que nadie la pone en duda, hay argumentos que refutan la existencia de escasez a nivel país. Desde la región de O’higgins al sur, más del 100% del agua de las cuencas desemboca en el mar y recordemos que la dotación de agua por habitante promedio del país es de 53.000 m³/año (Santibáñez, 2017). El problema en realidad es la percepción de escasez o escasez relativa, ya que la limitación está en la inseguridad económica y gestión del recurso hídrico más que en su disponibilidad física a lo largo del país (CAF, 2015; HLPE, 2015).

Entonces, estos proyectos están mal fundados. Como además son proyectos riesgosos, creo que más que invertir en sacar agua de una cuenca, se debe

pensar en otras alternativas; como sugiere la WWF (2007), primero se debe evaluar medidas en torno a la gestión de la demanda, evaluando variables como uso, reducción, reciclaje o manejo; luego evaluar opciones asociadas al suministro, como el agua virtual, suplementar artificialmente de forma local o abastecimiento alternativo como desalinización, y así dejar como último recurso un trasvase entre cuencas.

En el caso de nuestro país, al analizar el proyecto modelado, si se considera que detrás de un proyecto así hay un alto costo de inversión, costos sociales y ambientales, que la cuenca del río Vergara haya sufrido una reducción de ingresos netos de 0,05% bajo condiciones ideales, un 5,12% de aumento total de ingresos no es suficiente para afirmar que este proyecto genérico sea beneficioso. Dada la dotación hídrica de Chile, parece ser mejor opción el invertir en una mejor gestión, acceso y administración de los recursos que cada cuenca tiene de manera natural, por sobre la solución que ofrecen los proyectos de trasvase que no consideran factores como cambio climático o calidad/tipo de suelo, que son tanto o más importantes que el solo contar con agua para regar.

CONCLUSIONES

El objetivo detrás de esta investigación era demostrar que si bien a gran escala, la implementación de un proyecto de transferencia de agua entre cuencas en Chile reporta beneficios económicos, al evaluar en detalle a nivel comunal o incluso de cuenca, este beneficio conlleva que alguien debe perder.

Actualmente existen múltiples proyectos en operación a lo largo del mundo, resaltando el Tajo-Segura en España y el South-to-North en China, tanto por su envergadura, volumen trasvasado, como su importancia en las actividades productivas de dichos países. Ambos han sido ampliamente estudiados desde perspectivas cualitativas y cuantitativas, teniendo conclusiones que los apoyan y justifican y otras que rechazan su validez y enfatizan en que los costos sociales, económicos y ambientales pesan más que los beneficios percibidos.

La realidad chilena hoy cuenta con 3 proyectos en estado de evaluación: la Vía Hídrica del Norte de Chile, Aquatacama y la Carretera Hídrica, siendo los dos últimos los con mayor renombre, avances e información publicada. Los tres coinciden con su zona de extracción principal en el río Bio Bío, con presentar a la agricultura como uno de los principales consumidores beneficiados y justifican su validez en el caudal de los ríos que desembocan en el mar, junto con la falta de agua para riego en el norte. Estos puntos, más la falta de un análisis económico matemático de cualquiera de estos tres proyectos fue lo que inspiró este estudio.

El proyecto estudiado, que fue una simulación genérica simple con 1 punto de extracción en la cuenca del río Vergara y 1 punto de entrega en la provincia de Cardenal Caro, se sometió a un modelo de optimización HE adaptado para este estudio, cuya principal ventaja es el requerimiento de pocos datos de entrada y su principal limitación es el no considerar factores socioculturales, que son parte de la toma de decisiones de los agricultores.

Se simuló el trasvase primero con las condiciones actuales y luego con un escenario de cambio climático RCP 8.5 proyectado al 2045. El primer escenario entregó un aumento en la ganancia total de 5,12%, desagregada en 8,38% en Cardenal Caro y -0,05% en el río Vergara, sustentado en el trasvase de 1352,16 km³ de agua.

Para incentivar el trasvase, se asumió un aumento en los rendimientos dentro de Cardenal Caro, justificado en alcanzar los promedios de rendimiento nacional que están por sobre los valores actuales, dada la emergencia agrícola declarada en la región. Se aplicaron shocks de 5% en el rendimiento de los frutales y de 25% a los porotos; 216% al maíz y 437% para las papas. Esto, por un lado, significa un cambio evidente en el patrón productivo de ambas cuencas; por otro lado, deja como consecuencia el cuestionarse la viabilidad de los resultados al extrapolarlos a la realidad.

A modo de interpretación final del proyecto estudiado, como los beneficios percibidos dependen de una mejora en los rendimientos poco replicable en un

escenario real, y el cambio climático genera una reducción en los beneficios, la ejecución del proyecto funda más dudas que certezas. Ya que el margen de error entre la teoría y la práctica, el cambio climático, un aumento en los costos de construcción, reducciones de desempeño evidenciadas por otros proyectos, ineficiencias más los efectos ambientales y sociales fuera del alcance de este estudio, pueden absorber todos los beneficios inicialmente percibidos por un proyecto de este tipo en Chile.

Finalmente, si se considera el alto costo de inversión, costos sociales y ambientales, y dada la abundante dotación hídrica que presenta, es mejor opción invertir en mejoras de gestión, acceso y administración de los recursos hídricos que cada cuenca tiene de manera natural, por sobre la construcción de una carretera hídrica. Ésta se presenta como una solución en que “todos ganan”, pero al analizar en detalle, hay alguien en la cuenca donante que asume los costos, y que, a juicio personal, son más graves que la idea idílica detrás de poder entregarle a otra cuenca más agua para regar.

Consideraciones futuras

Para la continuidad y/o profundización de este estudio es relevante considerar agregar variables que, si bien agregan complejidad, aumentan la precisión de los resultados. El estudio realizado fue una aproximación que buscó evaluar un comportamiento general con el fin de extraer resultados y consecuencias a

grandes rasgos, sin embargo, parte de sus limitaciones están asociadas a la no inclusión de algunas variables, como:

- Agregar una restricción asociada al caudal ecológico de la cuenca donante.
- Estacionalidad: los proyectos en estudio en nuestro país consideran variar los m³ extraídos y entregados en cada cuenca según el mes del año, evaluando lluvia caída, tipo de actividad agrícola y disponibilidad hídrica de cada zona.
- Múltiples puntos de entrega/captura: Como Chile es un país de gran longitud, los proyectos están definidos bajo un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas. Sin embargo, el caso de estudio considera sólo un punto de extracción (Nacimiento) y uno de entrega (Litueche).
- Costos y eficiencia: Se omitió un valor económico asociado al traslado de agua de una cuenca a otra, además se asumió una eficiencia de traslado de 100%. Para futuros análisis sería pertinente adaptar ambas variables.
- Mejorar la precisión de la variación de rendimientos aplicada sobre la cuenca destino.
- Sumar variables de consumo industrial, minero y doméstico, que deben ser previamente monetarizadas para poder incluirlas.
- Por último, tras la realización del nuevo censo agrícola, que se encuentra en proceso, es pertinente actualizar los datos obtenidos de dicha fuente.

REFERENCIAS

- Abdalhi, M. A. M., & Jia, Z. (2018). Crop yield and water saving potential for AquaCrop model under full and deficit irrigation managements. *Italian Journal of Agronomy*, 13. <https://doi.org/10.4081/ija.2018.1288>
- Aitken, D., Rivera, D., Godoy-Faúndez, A., & Holzapfel, E. (2016). Water Scarcity and the Impact of the Mining and Agricultural Sectors in Chile. *Sustainability*, 8, 128. <https://doi.org/10.3390/su8020128>
- Arumí-Ribera, J. L., Rivera-Salazar, D. A., Rougier-Herrera, A., & Díaz-Borquez, R. (2012). Estimación de pérdidas de agua en tramos de ríos del sistema Laja-Diguillín en la zona central de Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, 3, 135–141.
- Banco Mundial. (2011). Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Chile. *Departamento del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 92. Recuperado de [http://www.dga.cl/eventos/Diagnostico gestion de recursos hidricos en Chile_Banco Mundial.pdf](http://www.dga.cl/eventos/Diagnostico_gestion_de_recursos_hidricos_en_Chile_Banco_Mundial.pdf)
- BCN. (s. f.). SIIT / Reportes comunales. Recuperado 12 de octubre de 2020, de SIIT - Reportes estadísticos, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. website: <https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunal.html?unidad=Comunales&anno=2020>
- Berkoff, J. (2003). China: The South – North Water Transfer Project — is it

justified? *Water Policy*, 5, 1–28.

Bernardo, D. J., Whittlesey, N. K., Saxton, K. E., & Bassett, D. L. (1987). An Irrigation Model for Management of Limited Water Supplies. *Western Journal of Agricultural Economics*, (2), 164–173.

Betancourt, R. F., Baffico, G., & Beamud, S. G. (2017). Alga Didymo, una pequeña gran invasora. *Desde la Patagonia difundiendo saberes*, 14, 28–34.

Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43, 413–421.
<https://doi.org/10.1002/2015GL067265>.Abstract

Britz, W., & Witzke, P. (2008). CAPRI model documentation 2008: Version 2. *Institute for Food and Resource Economics*, University of Bonn, Bonn.

CAF (2015). *Inseguridad económica del agua en Latinoamérica: de la abundancia a la inseguridad*. Recuperado de https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/787/CAFInseguridad_economica_del_agua_America_del_Sur.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Calatrava, J., & Martínez-Granados, D. (2012). El valor de uso del agua en el regadío de la cuenca del Segura y en las zonas regables del trasvase Tajo-

Segura. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 12, 5–32.

<https://doi.org/10.7201/earn.2012.01.01.1>

CEPAL (2012). *La economía del cambio climático en Chile*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/35372-la-economia-cambio-climatico-chile>

Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H., Waskom, R. M., Niu, Y., & Siddique, K. H. M. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress . A review. *Agronomy for Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>

Cirelli, A. F., & du Mortier, C. (2005). Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica. *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. Solar Safe Water*, 11–26.

CNR (2011). *Política nacional de riego*. Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile.

CR2 (2015). *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. Centro de la Ciencia del Clima y la Resiliencia. Recuperado de www.cr2.cl/megasequia

de Oliveira, A. S., Trezza, R., Holzapfel, E. A., Lorite, I., & Paz, V. P. S. (2009). Irrigation water management in latin america. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69, 7–16.

Decreto N° 54 de 2020a [Ministerio de Obras Públicas]. Declara zona de escasez a la región del Libertador General Bernardo O'higgins. 6 de abril de 2020. Santiago, Chile.

Decreto N° 116 de 2019 [Ministerio de Obras Públicas]. Declara zona de escasez a la región del Libertador General Bernardo O'higgins. 3 de octubre de 2019. Santiago, Chile.

Department of Water Resources. *Management of the California State Water Project. Bulletin 132-17*, (2019).

DGA (2016). *Atlas del Agua, Chile 2016*. Dirección General de Aguas, Chile.

Dourojeanni, A. C. (2014). Trasvases de agua en el Perú: No solo un proyecto de ingeniería hidráulica. *Debate Agrario*, 46, 17–27.

Ellender, B. R., & Weyl, O. L. F. (2014). A review of current knowledge, risk and ecological impacts associated with non-native freshwater fish introductions in South Africa. *Aquatic Invasions*, 9(2), 117–132.

<https://doi.org/10.3391/ai.2014.9.2.01>

ESRI (s. f.). Mapa topográfico Región del Libertador General Bernardo O'higgins, altitud, relieve. Environmental Systems Research Institute. Recuperado 12 de octubre de 2020, de <https://es-ar.topographic-map.com/maps/d6tt/?7435>

Esteve, P., Varela-ortega, C., Blanco-gutiérrez, I., & Downing, T. E. (2015). A

hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecological Economics*, 120, 49–58.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.017>

FAO (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. En *Estudio*

FAO: Riego y drenaje (Vol. 66). <https://doi.org/978-92-5-308564-4>

FAO (2019). Precios al Productor. Organización de las Naciones Unidas para la

Agricultura y la Alimentación. Recuperado 20 de septiembre de 2020, de

<http://www.fao.org/faostat/es/#data/PP>

Feng, S., Li, L. X., Duan, Z. G., & Zhang, J. L. (2007). Assessing the impacts of

South-to-North Water Transfer Project with decision support systems.

Decision Support Systems, 42(4), 1989–2003.

<https://doi.org/10.1016/j.dss.2004.11.004>

Fernández, F. J., Ponce, R. D., Blanco, M., Rivera, D., & Vásquez, F. (2016).

Water Variability and the Economic Impacts on Small-Scale Farmers. A

Farm Risk-Based Integrated Modelling Approach. *Water Resources*

Management, 30, 1357–1373. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1227-8>

Figuroa, R., Rojas, J., Barra, R., Arumí-Ribera, J. L., Delgado, V., Alvez, A., ...

Díaz, M. E. (2020, julio 8). Por qué la carretera hídrica no es un proyecto

sustentable. *CIPER Académico*. Recuperado de

<https://www.ciperchile.cl/2020/07/08/por-que-la-carretera-hidrica-no-es-un-proyecto-sustentable/>

Foster, W., López de Lérída, J., & Valdes, A. (2011). *Impacto del nivel de distorsiones en el sector agrícola nacional*. Subsecretaría de Agricultura, Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Economía Agraria, Santiago, Chile.

Fundación Chile (2016). *Servicios Ecosistémicos para la gestión del agua*. Santiago, Chile.

Fundación Chile (2018). Radiografía del Agua: Brecha y riesgo hídrico en Chile. En *Escenarios Hídricos 2030* (p. 144). Recuperado de <http://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/REMA-2017.pdf>

Fundación Chile (2019). Portafolio de Medidas, Acciones y Soluciones MAS Seguridad Hídrica. En *Transición Hídrica: El Futuro del Agua en Chile*. Recuperado de https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/07/seguridad-hidrica_mas.pdf

Fundación Chile, & MOP (2017). *Desafíos del Agua para la región Latinoamericana*. Recuperado de <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/desafios-del-agua.pdf>

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2019). The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40, 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

- Gil Olcina, A. (1995). Conflictos autonómicos sobre trasvases de agua en España. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, 13, 17–28.
- Graveline, N. (2016). Economic calibrated models for water allocation in agricultural production: A review. *Environmental Modelling & Software*, 81, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.03.004>
- Graveline, N., Majone, B., Van Duinen, R., & Ansink, E. (2013). Hydro-economic modeling of water scarcity under global change: an application to the Gállego river basin (Spain). *Regional Environmental Change*, 14, 119–132. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0472-0>
- Habit, E., Belk, M. C., Tuckfield, R. C., & Parra, O. (2006). Response of the fish community to human-induced changes in the Biobío River in Chile. *Freshwater Biology*, 51(1), 1–11. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01461.x>
- He, C., He, X., & Fu, L. (2010). China's south-to-north water transfer project: Is it needed? *Geography Compass*, 4(9), 1312–1323. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00375.x>
- Hernández Hernández, M., & Morales Gil, A. (2008). Trascendencia socio-económica del trasvase Tajo Segura tras 30 años de su funcionamiento en la provincia de Alicante. *Investigaciones Geográficas*, 46, 31–48.
- HLPE (2015). Contribución del agua a la seguridad alimentaria y la nutrición. *Un*

informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición, Roma 2015, 9.

Howitt, R. (1995). Positive Mathematical Programming. *Amer. J. Agric. Econ.*, 77, 329–342.

Hurd, B. H., & Coonrod, J. (2012). Hydro-economic consequences of climate change in the upper Rio Grande. *Climate Research*, 53(2), 103–118.
<https://doi.org/10.3354/cr01092>

INE (2016). *Medio Ambiente, Informe Anual 2016*. Instituto Nacional de Estadísticas, Chile.

INE (2007) *Censo Agropecuario y Forestal*. Instituto Nacional de Estadísticas, Chile.

IPCC, 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., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-

Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Jiang, Q., & Grafton, R. Q. (2012). Economic effects of climate change in the Murray-Darling Basin, Australia. *Agricultural Systems*, 110, 10–16.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.009>

Kingsford, R. T. (2000). Ecological impacts of dams, water diversions and river management on floodplain wetlands in Australia. *Austral Ecology*, 25(2), 109–127. doi:10.1111/j.1442-9993.2000.tb00012.x.

Kuschel-Otárola, M., Rivera, D., Holzapfel, E., Palma, C. D., & Godoy-Faúndez, A. (2018). Multiperiod Optimisation of Irrigated Crops under Different Conditions of Water Availability. *Water*, 10, 1434.

<https://doi.org/10.3390/w10101434>

Maneta, M. P., Torres, M. O., Wallender, W. W., Vosti, S., Howitt, R., Rodrigues, L., ... Panday, S. (2009). A spatially distributed hydroeconomic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment. *Water Resources Research*, 45(11), 1–19.

<https://doi.org/10.1029/2008WR007534>

Maneta, M., Torres, M., Vosti, S. A., Wallender, W. W., Allen, S., Bassoi, L. H., ... Young, J. (2009). Assessing agriculture-water links at the basin scale:

Hydrologic and economic models of the São Francisco River Basin, Brazil.

Water International, 34(1), 88–103.

<https://doi.org/10.1080/02508060802669496>

Meador, M. R. (1992). Inter-basin Water Transfer : Ecological Concerns Inter-basin Water Transfer : Ecological Concerns. *Fisheries*, 17–22.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2019). *Informe de Desarrollo Social*.

Recuperado de https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/storage/docs/Informe_de_Desarrollo_Social_2019.pdf

MMA (2016). *Tercera Comunicacion nacional de Chile ante la Convención*

Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente, Chile. Recuperado de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/TCN-2016b1.pdf>

MOP (2020b). *Mesa Nacional del Agua - Primer Informe*. Ministerio de Obras Públicas, Chile.

Morales Gil, A., Rico Amorós, A. M., & Hernández Hernández, M. (2005). El trasvase Tajo-Segura. *Observatorio Medioambiental*, 8, 73–110.

ODEPA (2010) *Estimación del impacto socioeconómico del cambio climático en el Sector Silvoagropecuario de Chile*, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Chile.

ODEPA. (2019). Fichas de costo. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Chile.

Recuperado 22 de septiembre de 2020, de

<https://www.odepa.gob.cl/fichas-de-costos>

Ordenanza N° 1531 de 2018 [Dirección de Obras Hidráulicas]. Informa sobre Proyecto Carretera Hídrica. 10 de agosto de 2018. Santiago, Chile.

Ossa-Moreno, J., McIntyre, N., Ali, S., Smart, J. C. R., Rivera, D., Lall, U., & Keir, G. (2018). The Hydro-economics of Mining. *Ecological Economics*, 145, 368–379. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.010>

Peña-Haro, S., Llopis-Albert, C., Pulido-Velazquez, M., & Pulido-Velazquez, D. (2010). Fertilizer standards for controlling groundwater nitrate pollution from agriculture: El Salobral-Los Llanos case study, Spain. *Journal of Hydrology*, 392(3–4), 174–187. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.006>

Peña-Haro, S., Pulido-Velazquez, M., & Llopis-Albert, C. (2011). Stochastic hydro-economic modeling for optimal management of agricultural groundwater nitrate pollution under hydraulic conductivity uncertainty. *Environmental Modelling and Software*, 26(8), 999–1008. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.02.010>

Pittock, J., Meng, J., Geiger, M., & Chapagain, A. K. (2009). Interbasin water transfers and water scarcity in a changing world - a solution or a pipedream? *World Wildlife Fund Germany*.

PNUD (2013). *Proyectos exitosos e innovadores en la lucha contra la*

desertificación. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Chile. Recuperado de https://www.cl.undp.org/content/chile/es/home/library/environment_energy/proyectos-exitosos-e-innovadores-en-la-lucha-contra-la-desertifi.html

- Poff, N. L. R., & Matthews, J. H. (2013). Environmental flows in the Anthropocene: Past progress and future prospects. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 667–675. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.006>
- Ponce, R. D., Blanco, M., & Giupponi, C. (2014). The economic impacts of climate change on the Chilean agricultural sector. A non-linear agricultural supply model. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 74, 404–412. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000400005>
- Ponce, R. D., Fernández, F., Stehr, A., Vásquez-Lavín, F., & Godoy-Faúndez, A. (2017). Distributional impacts of climate change on basin communities: an integrated modeling approach. *Regional Environmental Change*, 17, 1811–1821. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1152-2>
- Ponce, R. D., Parrado, R., Stehr, A., & Bosello, F. (2016). Climate Change, water scarcity in agriculture and the economy-wide impacts in a CGE framework. *Fondazione Eni Enrico Mattei Working Paper Series*, 79.
- Putty, M. R. Y., Thipperudrappa, N. M., & Chandramouli, P. N. (2014). Hydrological feasibility of gravity diversion of the west flowing nethravathi in

Karnataka. *Journal of Earth System Science*, 123(8), 1781–1792.

<https://doi.org/10.1007/s12040-014-0511-3>

Reca, J., Roldán, J., Alcaide, M., López, R., & Camacho, E. (2001). Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems; I. Description of the model. *Agricultural Water Management*, 48, 103–116.

Reguemos Chile (2016). *Memoria de cálculos ingeniería preliminar*. Recuperado de www.reguemoschile.cl

Resolución Exenta N° 400 de 2019 [Ministerio de Obras Públicas]. Define situación de emergencia agrícola los efectos de daño productivo derivados de la condición de déficit hídrico que afecta la región del Lib. Bernardo O'higgins. 20 de agosto de 2019. Santiago, Chile.

Riegels, N., Jensen, R., Bensasson, L., Banou, S., Møller, F., & Bauer-Gottwein, P. (2011). Estimating resource costs of compliance with EU WFD ecological status requirements at the river basin scale. *Journal of Hydrology*, 396(3–4), 197–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.005>

Rivera, P., Basualto, S., & Cruces, F. (2013). Acerca de la diatomea *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M . Schmidt: su morfología y distribución en Chile. *Gayana Botanica*, 70(1), 154–158.

Romeu Fernández, G. (2014). *El mercado del tratamiento de aguas en Chile*. Recuperado de

<https://www.camarazaragoza.com/exterior/BoletinNET/docs/DocumentoHerramienta341.pdf>

Rose, K. A., Huang, H., Justic, D., & de Mutsert, K. (2014). Simulating Fish Movement Responses to and Potential Salinity Stress from Large-Scale River Diversions. *Marine and Coastal Fisheries*, 6(1), 43–61.
<https://doi.org/10.1080/19425120.2013.866999>

Rosegrant, M. W., Ringler, C., McKinney, D. C., Cai, X., Keller, A., & Donoso, G. (2000). Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: The Maipo river basin. *Agricultural Economics*, 24, 33–46.

Sáez Gallardo, G. I. (2015). *Evaluación económica de la incorporación de una fuente no convencional de agua para satisfacer la demanda de agua subterránea de los sectores 5 y 6 del acuífero del valle del río Copiapó*. Universidad de Chile.

Santibáñez, F. (2017). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. En *Agricultura Chilena. Reflexiones y desafíos al 2030* (pp. 147–178). Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/cambioClim12parte.pdf>

Shumilova, O., Tockner, K., Thieme, M., Koska, A., & Zarfl, C. (2018). Global Water Transfer Megaprojects: A Potential Solution for the Water-Food-Energy Nexus? *Frontiers in Environmental Science | www.frontiersin.org*, 6.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00150>

Stehr A., C. Álvarez, P. Álvarez, J. L. Arumí, C. Baeza, R. Barra, C. A. Berroeta, Y. Castillo, G. Chiang, D. Cotoras, S. A. Crespo, V. Delgado, G. Donoso, A. Dussailant, F. Ferrando, R. Figueroa, C. Frêne, R. Fuster, A. Godoy, T. Gómez, E. Holzapfel, C. Huneeus, M. Jara, C. Little, K. Lizama, M. Musalem, M. Olivares, O. Parra, R. D. Ponce, D. Rivera, I. Rodríguez, A. Sepúlveda, M. Somos, F. Ugalde, R. Urrutia, M. Valenzuela, C. Vargas, X. Vargas, S. Vásquez, I. L. Vera, S. Vicuña, G. Vidal y M. Yévenes (2019). *Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático. Informe de la mesa Agua*. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación

Stehr, A., Debels, P., & Luis, J. (2010). *Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático : experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. I*, 37–58.

Stehr, A., Debels, P., Romero, F., & Alcayaga, H. (2008). Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability : evaluation of results from a Chilean case study Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case stud. *Hydrological Sciences Journal*, 53(3), 588–601.

<https://doi.org/10.1623/hysj.53.3.588>

Sun, F., Yang, Z., & Huang, Z. (2014). Challenges and Solutions of Urban Hydrology in Beijing. *Water Resour Manage*, 28, 3377–3389.

<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0697-9>

Sürmelihindi, G., Passchier, C. W., Baykan, O. N., Spötl, C., & Kessener, P. (2013). Environmental and depositional controls on laminated freshwater carbonates: An example from the roman aqueduct of patara, turkey. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 321–335. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.06.002>

Tang, C., Yi, Y., Yang, Z., & Cheng, X. (2014). Water pollution risk simulation and prediction in the main canal of the South-to-North Water Transfer Project. *Journal of Hydrology*, 519(PB), 2111–2120. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.010>

Torres, M. D. O., Howitt, R., & Rodrigues, L. N. (2016). VER DE NUEVOOO!!! Modeling the economic benefits and distributional impacts of supplemental irrigation. *Water Resources and Economics*, 14, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2016.03.001>

Torres, M. D. O., Maneta, M., Howitt, R., Vosti, S. A., Wallender, W. W., Bassoi, L. H., & Rodrigues, L. N. (2012). Economic impacts of regional water scarcity in the São Francisco river Basin, Brazil: An application of a linked hydro-economic model. *Environment and Development Economics*, 17(2), 227–248. <https://doi.org/10.1017/S1355770X11000362>

Uche, J., Martínez-Gracia, A., Círez, F., & Carmona, U. (2015). Environmental impact of water supply and water use in a Mediterranean water stressed

region. *Journal of Cleaner Production*, 88, 196–204.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.076>

- Valdés-Negróni, J. M., Astorga-Vera, K., Billi, M., Escobar-Avaria, C., Fuster-Gómez, R., Silva-Urrutia, K., & Urquiza-Gómez, A. (2020, noviembre 14). Enfrentar la sequía con una regadera: carretera hídrica, riesgos sistémicos y desafíos de política pública. *CIPER Académico*. Recuperado de <https://www.ciperchile.cl/2020/11/14/enfrentar-la-sequia-con-una-regadera-carretera-hidrica-riesgos-sistemicos-y-desafios-de-politica-publica/>
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., ... Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538–2567.
- Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., Esteve, P., Bharwani, S., Fronzek, S., & Downing, T. E. (2014). How can irrigated agriculture adapt to climate change? Insights from the Guadiana Basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 16, 59–70. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0720-y>
- Vargas, C. A., Garreaud, R., Barra, R., Vásquez-Lavín, F., Saldías, G. S., & Parra, O. (2020a). Environmental costs of water transfers. *Nature Sustainability*, 3, 408–409. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0526-5>
- Vargas, C. A., Garreaud, R. D., Barra, R., Vásquez-Lavín, F., Saldías, G. S., & Parra, Ó. (2020b). Análisis: El agua de los ríos no se pierde cuando llega al

mar. Recuperado 8 de enero de 2021, de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 website: <http://www.cr2.cl/analisis-el-agua-de-los-rios-no-se-pierde-cuando-llega-al-mar-cr2/>

Via Marina. (2016a). *Presentación final de estudio preliminar Proyecto Aquatacama*. Chile.

Via Marina. (2016b). *Proyecto Aquatacama Resumen ejecutivo*. París.

Volk, M., Hirschfeld, J., Dehnhardt, A., Schmidt, G., Bohn, C., Liersch, S., & Gassman, P. W. (2008). Integrated ecological-economic modelling of water pollution abatement management options in the Upper Ems River Basin. *Ecological Economics*, 66(1), 66–76.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.01.016>

Wilson, M. C., Li, X.-Y., Ma, Y.-J., Smith, A. T., & Wu, J. (2017). A Review of the Economic, Social, and Environmental Impacts of China's South–North Water Transfer Project: A Sustainability Perspective. *Sustainability*, 9. <https://doi.org/10.3390/su9081489>

WRI (2015). *Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings Executive Summary*. World Resources Institute. Recuperado de www.wri.org/publication/aqueduct-projected-water-stress-country-rankings

WWF (2007). *Pipedreams? Interbasin water transfers and water shortages*. World Wildlife Fund. Recuperado de <https://wwfeu.awsassets.panda.org/>

downloads/pipedreams_ibts_final_report_27_june_2007_1.pdf

WWF & WRI. (2004). Rivers at risk: Dams and the future of freshwater ecosystems. En *Paper to the 7th international river symposium*. Recuperado de

<http://awsassets.panda.org/downloads/riversatriskriversymposiumpapercollier.doc>

Yang, Y. C. E., Brown, C. M., Yu, W. H., & Savitsky, A. (2013). An introduction to the IBMR, a hydro-economic model for climate change impact assessment in Pakistan's Indus River basin. *Water International*, 38(5), 632–650. <https://doi.org/10.1080/02508060.2013.830691>

Ye, A., Duan, Q., Chu, W., Xu, J., & Mao, Y. (2014). The impact of the south-north water transfer project (CTP)'s central route on groundwater table in the Hai River basin, north China. *Hydrological Processes*, 28(23), 5755–5768. <https://doi.org/10.1002/hyp.10081>

You, G. J.-Y., & Ringler, C. (2010). Hydro-economic modeling of climate change impacts in Ethiopia. *IFPRI Discussion Paper*, 960(April). Recuperado de <http://www.ifpri.org/publication/hydro-economic-modeling-climate-change-impacts-ethiopia>

Yu, B., Tisdell, J., & Salbe, I. (2003). A hydrologic and economic model for water trading and reallocation using linear programming techniques. *MODSIM 2003: International congress on modelling and simulation, July 2003*, 1–4.

- Zhang, J., Elia Campana, P., Yao, T., Zhang, Y., Lundblad, A., Melton, F., & Yan, J. (2018). The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: a case study in the United States. *Applied Energy*, 227, 449–464. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.036>
- Zhang, L., Li, S., Loa, H. A., Zhuang, Y., & Du, Y. (2015). Opportunities and challenges of interbasin water transfers : a literature review with bibliometric analysis. *Scientometrics*, 105, 279–294. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1656-9>
- Ziervogel, G. (2019). Unpacking the Cape Town drought: Lessons Learned. *Cities Support Programme |Climate resilience paper, February.*

ANEXO 1

Tablas de resultados de las ejecuciones del modelo

Tabla 1

Variación de superficie (ha) por actividad en Cardenal Caro

Fruits	Sys	SIM1	SIM2	Change
Avocado	irr	140,25	146,21	4,25%
Grapes	irr	9,90	10,14	2,43%
Olive	irr	3.357,64	3.462,49	3,12%
Orange	irr	0,40	0,49	22,37%
Peach	irr	1,62	1,76	8,92%
Plum	irr	573,7	580,13	1,12%
Vineyard	irr	5525,29	5417,59	-2%
Walnut	irr	312,9	320,61	2,46%
Crops				
Common_Bean	irr	4,87	3,00	-38,41%
Maize	irr	79,95	155,60	94,62%
Potato	dry	6,26	7,30	16,67%
	irr	5,84	70,67	1110,09%

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

Tabla 2

Variación de superficie (ha) por actividad en Río Vergara

Fruits	Sys	SIM1	SIM2	Change
Apple	irr	2.790,84	2.782,33	-0,30%
Cherry	irr	1.032,70	1.029,69	-0,29%
Grapes	irr	0,50	0,50	0,02%
Olive	irr	9,90	9,90	0,00%
Peach	irr	17,18	17,15	-0,13%
Pear	irr	11,17	10,95	-1,91%
Vineyard	irr	613,19	570,99	-6,88%
Walnut	irr	636,39	628,89	-1,18%
Crops				
Common_Bean	irr	17,95	17,43	-2,91%
Maize	irr	706,58	689,84	-2,37%
Potato	dry	220,91	248,66	12,56%
	irr	231,87	230,30	-0,68%
Sugar_Beet	irr	2.294,72	2.276,26	-0,80%
Wheat	dry	2.244,74	2.244,74	0,00%

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

Tabla 3

Variación de la producción (Ton) por actividad en Cardenal Caro

Fruits	GEN	GEN1	CHANGE
Avocado	1963,4	2126	8,28%
Grapes	255,7	275	7,55%
Olive	93231,1	100864,7	8,19%
Orange	2,5	3,2	28,49%
Peach	18,8	21	11,88%
Plum	17773,1	18887,5	6,27%
Vineyard	69954,5	71654,6	2,43%
Walnut	1914,3	2050,3	7,10%
Crops			
Common_Bean	7,3	4,5	-38,41%
Maize	843,4	3547,7	320,67%
Potato	75,5	3359,4	4349,45%
TOTAL	186040	202794	9,01%

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

Tabla 4
Variación de la producción (Ton) por actividad en Río Vergara

Fruits	SIM1	SIM2	Change
Apple	242.507,7	241.798,6	-0,29%
Cherry	7.885,2	7.866,4	-0,24%
Grapes	8,4	8,4	0,02%
Olive	54,4	54,4	0,00%
Peach	130,1	129,9	-0,15%
Pear	259,9	255,0	-1,91%
Vineyard	6.497,0	6.035,9	-7,10%
Walnut	3.006,7	2.982,2	-0,81%
Crops			
Common_Bean	50,3	49,5	-1,63%
Maize	12.084,6	11.826,7	-2,13%
Potato	9.431,2	9.545,7	1,21%
Sugar_Beet	193.879,4	192.314,9	-0,81%
Wheat	17.463,4	17.463,4	0,00%
TOTAL	493.258	490.331	-0,59%

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

Tabla 5
*Variación de producción (Ton) por comuna de
 Cardenal Caro*

	SIM1	SIM2	Change
Cardenal Caro			
La Estrella	86.882,25	95.399,58	9,80%
Litueche	7.987,02	8.761,49	9,70%
Marchihue	88.817,96	96.016,38	8,10%
Navidad	693,07	789,41	13,90%
Paredones	1.471,57	1.622,63	10,26%
Pichilemu	187,66	204,52	8,99%
Río Vergara			
Angol	89.928,17	89.977,03	0,05%
Collipulli	19.778,25	19.747,01	-0,16%
Curacautín	5.079,14	5.079,14	0,00%
Ercilla	5.352,33	5.352,33	0,00%
Los Sauces	3.073,51	3.073,51	0,00%
Mulchén	34.504,81	33.770,05	-2,13%
Nacimiento	3.063,37	2.964,98	-3,21%
Negrete	22.379,80	21.737,23	-2,87%
Renaico	260.706,32	259.237,09	-0,56%
Traiguén	49.392,56	49.392,56	0,00%

*Nota: Elaboración propia a partir de los resultados
 obtenidos*

Tabla 6
Variación de ingresos [\$MM] por actividad, Cardenal Caro

Fruits	GEN	GEN1	CHANGE
Avocado	\$ 3566,9	\$ 3587,6	8,15%
Grapes	\$ 189,7	\$ 214,8	8,11%
Olive	\$ 90789,1	\$ 98165,2	8,12%
Orange	\$ 1,2	\$ 1,4	12,86%
Peach	\$ 13,1	\$ 14,3	8,63%
Plum	\$ 5425,3	\$ 5855,0	7,92%
Vineyard	\$ 11932,1	\$ 12703,3	6,46%
Walnut	\$ 2854,9	\$ 3082,6	7,98%
Crops			
Common_Bean	\$ 4,4	% 3,6	-16,45%
Maize	\$ 91,4	\$ 407,8	346,38%
Potato	\$ 5,2	\$ 205,6	3880,17%
TOTAL	\$ 114882,3	\$ 124511,2	8,38%

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

Tabla 7
Variación de ingresos [\$MM] por actividad, Río Vergara

Fruits	SIM1	SIM2	Change
Apple	\$ 52.313,0	\$ 52.308,0	-0,01%
Cherry	\$ 8.725,8	\$ 8.724,6	-0,01%
Grapes	\$ 6,7	\$ 6,7	0,00%
Olive	\$ 57,2	\$ 57,2	0,00%
Peach	\$ 90,0	\$ 90,0	-0,01%
Pear	\$ 58,5	\$ 58,5	-0,09%
Vineyard	\$ 1.114,8	\$ 1.093,2	-1,93%
Walnut	\$ 4.412,2	\$ 4.410,2	-0,05%
Crops			
Common_Bean	\$ 29,4	\$ 29,3	-0,23%
Maize	\$ 1.301,0	\$ 1.297,9	-0,24%
Potato	\$ 875,4	\$ 879,7	0,48%
Sugar_Beet	\$ 2.328,2	\$ 2.320,9	-0,31%
Wheat	\$ 1.307,8	\$ 1.307,8	0,00%
TOTAL	\$ 72.620,0	\$ 72.584,0	-0,05%

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos

Tabla 8
Variación de ingresos (\$MM)

	SIM1	SIM2	Change
Cardenal Caro			
Pichilemu	\$ 168,1	\$ 181,7	8,08%
La Estrella	\$ 82.216,3	\$ 88.929,3	8,16%
Litueche	\$ 4.430,4	\$ 4.803,9	8,43%
Marchihue	\$ 26.923,5	\$ 29.351,9	9,02%
Navidad	\$ 760,4	\$ 826,4	8,67%
Paredones	\$ 383,6	\$ 418,1	9,00%
Río Vergara			
Mulchén	\$ 5.426,7	\$ 5.420,0	-0,12%
Nacimiento	\$ 1.114,3	\$ 1.110,2	-0,36%
Negrete	\$ 3.997,4	\$ 3.978,1	-0,48%
Angol	\$ 10.942,7	\$ 10.943,1	0,00%
Collipulli	\$ 4.626,2	\$ 4.625,6	-0,01%
Curacautín	\$ 709,2	\$ 709,2	0,00%
Ercilla	\$ 1.187,4	\$ 1.187,4	0,00%
Los Sauces	\$ 1.554,5	\$ 1.554,5	0,00%
Renaico	\$ 32.521,1	\$ 32.515,3	-0,02%
Traiguén	\$ 10.540,7	\$ 10.540,7	0,00%

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos