



*The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library*

**This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.**

**Help ensure our sustainability.**

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

[aesearch@umn.edu](mailto:aesearch@umn.edu)

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

*No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.*

## Modelamiento hidro-económico de los efectos del cambio climático y política en la agricultura andina

Marianella Crispin Cunya<sup>ab</sup>, Roberto Daniel Ponce Oliva<sup>cde</sup>, Eric Rendon Schneir<sup>a</sup>,  
Esteban Eduardo Arias Montevechio<sup>f</sup>

**RESUMEN:** El cambio climático viene afectando de manera diferenciada a la agricultura, en particular, en la zona andina, dada su alta exposición, sensibilidad y baja capacidad adaptativa. Se evaluó la respuesta adaptativa de la agricultura andina frente a una variación de la disponibilidad hídrica debido al cambio climático en base al modelo hidro-económico que integra dos módulos: el modelamiento hidrológico en base al SWAT y un modelo económico de optimización en base al PMP. Se determinó una alta vulnerabilidad agrícola frente al cambio climático situación que podría revertirse al aplicar una política agraria en base al uso eficiente del agua.

### Hydro-economic modeling of the climate change and politics effects in Andean agriculture

**ABSTRACT:** Climate change has been affecting agriculture activities, particularly, in the Andean Region, given its high level of exposure, sensitivity and low adaptive capacity. The adaptive response of Andean agriculture to a variation in water availability due to climate change was evaluated. For this, a hydro-economic model was developed that integrates two modules: hydrological modeling based on SWAT and an economic optimization model based on PMP. There is a high agricultural vulnerability to climate change, situation that could be reversed through the application of an agricultural policy based on the efficient use of water.

**PALABRAS CLAVE / KEYWORDS:** Agricultura andina, Cambio climático, hidro-económico / *Andean agriculture, Climate change, Hydro-economic.*

**Clasificación JEL / JEL classification:** Q12, Q18, Q57

**DOI:** <https://doi.org/10.7201/earn.2023.01.03>

<sup>a</sup> Escuela de Postgrado. Programa Doctorado de Economía de los Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, Universidad Nacional Agraria La Molina. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.

<sup>b</sup> Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Cercado de Lima, Perú.

<sup>c</sup> Facultad de Economía y Negocios. Universidad del Desarrollo. Concepción, Chile.

<sup>d</sup> Center of Applied Ecology and Sustainability (CAPES). Concepción, Chile.

<sup>e</sup> Water Research Center for Agriculture and Mining. Concepcion, Chile.

<sup>f</sup> Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad Católica de la Sma. Concepción, Chile.

*Agradecimientos:* Los autores agradecen al Convenio de Subvención N.º 200-2015-FONDECYT, que en su cláusula tercera otorga a favor de la Universidad Nacional Agraria La Molina una subvención para el desarrollo del Doctorado de Economía de los Recursos Naturales y desarrollo sustentable.

*Citar como:* Crispin, M., Ponce, R.D., Rendon, E. & Arias, E. (2023). “Modelamiento hidro-económico de los efectos del cambio climático y política en la agricultura andina”. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 23(1), 55-87. <https://doi.org/10.7201/earn.2023.01.03>

*Dirigir correspondencia a:* Marianella Crispin Cunya. Perú. Email: [macricu@gmail.com](mailto:macricu@gmail.com)

Recibido en septiembre de 2020. Aceptado en febrero de 2023.

## 1. Introducción

Durante mucho tiempo el análisis del sector agrícola y su relación con los recursos hídricos estuvo basado en modelos biofísicos centrados en una dimensión específica del cambio climático, así como la dimensión agronómica (Moriondo *et al.*, 2010; Ventrela *et al.*, 2012), o la dimensión hidrológica (Joyce *et al.*, 2011; Rochdane *et al.*, 2012). Actualmente, la gestión del agua y el cambio climático son considerados como objetivos de desarrollo sostenible (ODS), donde surgen preocupaciones multidimensionales y multiescalares, evidencia la necesidad de integrar el aspecto biofísico y sociales en contextos ambientales y sociales a diferente escala de cuenca y a diferentes altitudes (Downing, 2012; Meinke *et al.*, 2009; Esteve *et al.*, 2015; Rolando *et al.*, 2017). El ODS 13, Acción por el Clima, hace referencia a fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima en países menos adelantados con énfasis en comunidades locales al 2030 (ONU, 2019). Por otro lado, las conclusiones del quinto informe de evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) sugieren que los impactos del cambio climático en los recursos hídricos tendrán consecuencias desiguales entre sectores y regiones los cuales incluyen cambios drásticos de precipitación, temperaturas y el incremento de eventos climáticos extremos (inundaciones y sequías) amenazando el suministro de agua en diferentes sectores económicos o usuarios, entre los cuales se encuentra el sector agrícola (IPCC, 2013; IPCC, 2014).

La agricultura en países andinos y regiones montañosas es considerada una de las actividades económicas más vulnerables frente a los impactos del cambio climático (incremento de eventos climáticos extremos, cambios en los patrones de temperatura y precipitación, entre otros), dada su exposición, alta sensibilidad y baja capacidad adaptativa (IPCC, 2013; MINAM, 2016). Dichos impactos, al afectar la disponibilidad hídrica, afectarían también la producción agrícola, por el gran rol que desempeña el agua (Bates *et al.*, 2008; Field *et al.*, 2014; Buytaert *et al.*, 2011; de Haan, 2009; Rolando *et al.*, 2017). Asimismo, es común que la agricultura sea considerada una actividad familiar, donde los conocimientos y prácticas agrícolas se transfieren de generación en generación con una administración de parcelas con extensiones desde pequeñas a grandes, factor relevante en un contexto de cambio climático, donde se afectarían fuertemente los ingresos familiares (Barrios, 2007; Dietze *et al.*, 2019).

Una de las características de muchas regiones montañosas en el mundo, incluida la zona andina, es que son consideradas como centros primarios del origen de cultivos (Vavilov, 1992); este es el caso de los Andes, que alberga especies importantes para la agricultura de montaña, ya que su diversidad genética actual se mantiene alrededor de los 3000 m.s.n.m., donde probablemente contribuyan con la novedosa diversidad genética que se necesitaría para una futura mejora global del germoplasma (NRC, 1989; de Haan *et al.*, 2010). La zona andina abarca a aquellos países que recorre la cordillera de los andes, desde Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina cuya altura promedio es de 3000 y 4000 m.s.n.m. A nivel mundial, existen

países con condiciones geográficas similares a la altitud de la zona andina como China, Oman y Africa (Tarolli & Straffelini, 2020; Moraetis *et al.*, 2020; Clay & Zimmerer, 2020; Tang *et al.*, 2019).

Los modelos de economía del agua (MEA), que integran las complejas interrelaciones entre sistemas hidrológicos y económicos, son herramientas efectivas para analizar los problemas de reducción en la disponibilidad en muchas regiones del mundo generando escasez de agua y proporcionar soluciones a través de escalas espaciales y temporales variadas examinando posibles cambios futuros en los sistemas de recursos hídricos, incluidos los efectos del cambio climático, los cambios socioeconómicos y las respuestas de infraestructura y políticas (Wheeler & Von Braun, 2013). Estos MEA se clasifican en dos categorías generales: los modelos hidroeconómicos (MHE) basados en redes (simulación u optimización) y modelos de economía amplia (salida de entrada o equilibrio general computable) (Bekchanov *et al.*, 2017).

De acuerdo con Bekchanov *et al.* (2017), geográficamente existe una amplia aplicación del Modelo Hidroeconómico (MHE) en investigaciones, la mayoría ubicadas en China, Australia y América del Norte. Asimismo, se realizaron investigaciones en el sur de Europa, principalmente en España, Asia central y el sur de Asia, sobretodo en India, y un número algo menor de investigaciones en África oriental y septentrional, Asia occidental y América del Sur (principalmente, Brasil y Chile) (González & Velasco, 2008; Ponce *et al.*, 2017; Torres *et al.*, 2012). En ese sentido, países de América Central y de América del Sur, principalmente los ubicados en zona andina, podrían beneficiarse de su aplicación y análisis.

En Chile se aplicó el MHE y ayudó a la gestión de los recursos hídricos (Gorelick & Zheng, 2015; Brouwer & Hofkes, 2008; Harou *et al.*, 2009), para la toma de decisiones (Freeze *et al.*, 1990), bajo escenarios de incertidumbre (D'Agostino *et al.*, 2014; Alexandra, 2017; Knowling *et al.*, 2020). Al analizar los impactos económicos regionales (Kahsay *et al.*, 2019), el modelo contribuye a una adecuada planificación socialmente responsable (Papagiannis *et al.*, 2018), y del mismo modo, permite evaluar la efectividad de posibles políticas a ser implementadas (Dowlatabadi, 1995; Weyant, 1985; Blanco-Gutiérrez *et al.*, 2013; Peña-Haro *et al.*, 2009; Volk *et al.*, 2008; Harou & Lund, 2008; Varela-Ortega *et al.*, 2011) y se convierte en una excelente herramienta para analizar las posibles consecuencias del cambio climático en la agricultura de los países andinos y/o países de montaña. La política está orientada a disminuir la vulnerabilidad de la agricultura familiar frente al cambio climático, la cual está orientada al uso eficiente del agua en la producción agraria.

La aplicación del MHE con consideraciones ambientales a través de funciones no lineales en costos, es ampliamente utilizado a nivel internacional en diferentes campos, desde el análisis de gestión de los recursos de aguas subterráneas como del acuífero Namdan ubicado en la provincia de Fars en Irán (Esteban & Albiac, 2012; Esteban & Dinar, 2013; Ghadimi & Ketabchi, 2019; Knowling *et al.*, 2020), evaluaciones bajo riesgo ambiental para el manejo de acuíferos aluviales en cuencas

de ríos áridos como la cuenca del río Golmud en el noroeste de China (Huang *et al.*, 2019), para evaluar sistemas de aguas azul y verde en zona urbana (Zischg *et al.* 2018; Cunha *et al.* 2016; Haghighatafshar *et al.*, 2019), además, permite evaluar la efectividad del aumento en los precios del agua agrícola para reducir el consumo de agua en el contexto de escasez en Irán y España (Momeni *et al.*, 2019; Tahbaz, 2016; Graveline *et al.*, 2014; Varela-Ortega *et al.*, 2014, Arjoon *et al.* 2014), o estudios más cercanos a la zona andina (Ponce *et al.*, 2017, Ponce *et al.*, 2015, Ponce *et al.*, 2014, Esteve *et al.*, 2015). Sin embargo, hay pocas aplicaciones en la agricultura andina con agrobiodiversidad en un contexto de cambio climático y con tendencia a la microparcelación (Garibaldi *et al.*, 2017; Rose *et al.*, 2019).

En ese sentido, la presente investigación muestra una aplicación novedosa del modelamiento hidro-económico (MHE) que evalúa la respuesta adaptativa de los productores agrarios frente a los impactos del cambio climático en zona andina; es decir, se vincula los impactos del cambio climático con las respuestas económicas de los agricultores. Estos impactos se evalúan mediante escenarios de cambios en la dotación del recurso hídrico haciendo uso de la herramienta *Soil and Water Assessment* (SWAT), que evalúa los cambios en los rendimientos agrícolas bajo riego y secano. Para analizar la respuesta económica de los agricultores se utiliza la programación matemática positiva (PMP), donde mediante la calibración del modelo se asume que los niveles observados reflejan los objetivos sociales y, por lo tanto, son óptimos (Howitt, 1995; Cai & Wang, 2006).

Finalmente, la Ley de los Recursos Hídricos del Perú, Ley N.º 29338, se considera que el agua es un recurso natural renovable e indispensable para la vida, el desarrollo sostenible, el mantenimiento de los sistemas y ciclos naturales que la sustentan, y la seguridad de la Nación. No hay propiedad privada sobre el agua en el Perú y el uso de los recursos hídricos se encuentra condicionado a su disponibilidad (FAO, 2000).

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1. Caso de Estudio**

En zona andina, es común que la producción de los cultivos transitorios es sustituta de las importaciones, compitiendo históricamente con las importaciones (maíz, trigo, cebada, frijol y otros), cuyo crecimiento económico interno de estos cultivos se ha basado en barreras de protección, transferencias y subsidios. Por estas razones, la mayoría de estos cultivos son destinados al mercado interno, mientras que, la existencia de los cultivos tradicionales de exportación es conformado en gran parte por los cultivos permanentes, como lo son el café, el banano, el plátano, el aceite de palma, el azúcar, el cacao, el tabaco y la palta. Existen cultivos pocos transables conformado por los tubérculos (variedades de papa, principalmente), algunas frutas y hortalizas (CAN, 2008). Cabe resaltar, la escasa tecnificación con bajas escalas de producción que limitan el acceso a la tecnología y bienes de capital; es por ello, la elevada presencia de pequeños productores.

En el Perú, el 83 % del total de las unidades agropecuarias está compuesta por las familias, siendo sus miembros la principal fuerza laboral, dando lugar a una agricultura familiar (MINAGRI, 2015; Garibaldi *et al.*, 2017). La ciudad de Abancay situada en la Región Apurímac, tiene un alto crecimiento demográfico y económico generando una competencia por el uso del agua y el suelo, lo que limita la expansión de la superficie agrícola, existiendo contaminación y otras externalidades. En este contexto, los agricultores deben tomar decisiones sobre el patrón de cultivos a priorizar y el uso del agua, pero no cuentan con el conocimiento o herramientas que les permita tomar decisiones en un entorno de cambio climático (Roco *et al.*, 2015).

La microcuenca del río Mariño, forma parte de la subcuenca del río Pachachaca que pertenece a la Intercuenca Alto Apurímac, con un área de 285 km<sup>2</sup>, teniendo una precipitación media anual de 782,82 mm. Desde el punto de vista geomorfológico, la microcuenca se extiende en una depresión dentro de la Cordillera Oriental con altitudes que varían desde los 1625 m.s.n.m. a 5200 m.s.n.m. en los distritos de Abancay y Tamburco de la provincia de Abancay, Región Apurímac (Condori, 2016). La temperatura media anual es 16,6 °C, con un máximo de 18,2 °C y un mínimo de 3 °C. Posee tres zonas bien definidas: alta, media y baja, y un crecimiento poblacional de 0,62 %, alto proceso de deforestación y cambios en el uso de la tierra (degradación de pastizales, sobrepastoreo, quema de pastos, urbanización). Existen 77 canales de riego en funcionamiento que datan de los años 1960 y 1970 y la mayor parte de infraestructura es de tierra con presencia de filtraciones en diferentes sectores. Se destaca el canal Mariño por su extensión y antigüedad, siendo su largo de aproximadamente 29 km y otro canal importante es el Micaela Bastidas cuyo recorrido abarca la parte alta hasta la parte baja (Pachachaca) de la microcuenca (GORE, 2010; ProDesarrollo, 2012). Respecto a la infraestructura de regulación, el ciclo hidrológico de la microcuenca involucra la presencia del nevado de Ampay y la laguna Rontoccocha, donde cualquier afectación y una variación de los patrones de lluvia y temperatura, afectarían la dotación y disponibilidad hídrica. En la actualidad, no se explota agua subterránea en la cuenca.

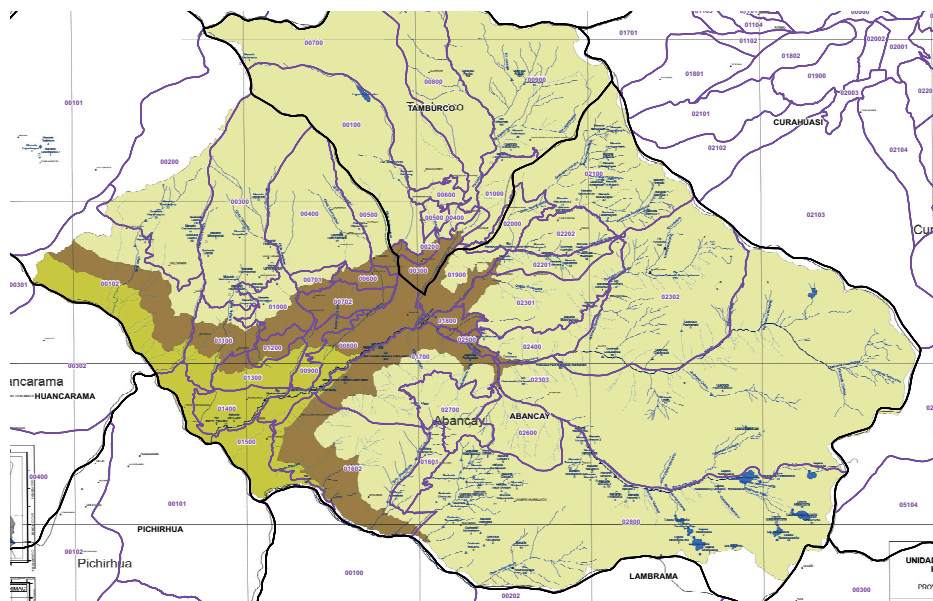
El sistema de gestión del agua en la microcuenca, se otorga en forma de licencias o autorizaciones del uso agrícola del agua en diferentes volúmenes que oscila entre 93,31 m<sup>3</sup> hasta 12.177.027,00 m<sup>3</sup>, el menor volumen corresponde al comité de regantes Ayaorcco y el mayor al Comité de regantes Ccarccatera. Se constató que la tarifa por agua, varía desde 0,93 hasta 4,79 soles por turno, y en cada mes se brindan de 1 a 9 turnos, teniendo cada turno una duración de 3 a 23 horas; la tarifa no compensa los costos de operación y mantenimiento de los canales de captación, transporte y distribución del agua dada la alta variabilidad de sus principales variables explicativas, además de una alta morosidad de los regantes. La gestión a nivel comunitario juega un papel importante con respecto a la adopción de tecnologías, la gestión del uso del agua en las parcelas y la limpieza de canales a través de la mita, que es el trabajo comunitario existente en los andes peruanos.



Los métodos de riego predominantes son los de gravedad y aspersión, donde el de gravedad plantea desafíos importantes para el Estado, los agricultores y los administradores del agua en el diseño y adecuada implementación de políticas. La agricultura, aunque no ocupe la mayor superficie del suelo, es la actividad más relevante en términos socioeconómicos de la microcuenca, donde el tamaño de la unidad agropecuaria oscila entre 0,001 ha hasta 3,2 ha. Existen cultivos transitorios, como el maíz, papa y hortalizas y cultivos permanentes de cosecha estacional, como los frutales y los cultivos permanentes de cosecha continua, como la alfalfa.

El área bajo riego es de 4.451,85 ha estando los agricultores están organizados en la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Medio Apurímac Pachachaca (JUSHMA), que se compone de tres comisiones y cada comisión está compuesta por diferentes comités que integran a 2.886 usuarios. Cada comité se encarga de administrar la distribución del agua en todas las parcelas, cobro de tarifas de agua y control del uso del agua y el riego. De un total de 67 comunidades identificadas en la microcuenca, el proceso de recolección de información se realizó a través de una muestra distribuida en 23 comunidades ubicadas en la parte alta (color verde claro en el Mapa 1), media (color marrón) y baja (color verde intenso). Para la obtención de dicha muestra representativa, se superpuso el mapa de la microcuenca y el mapa de clasificación Sector de Enumeración Agropecuaria (SEA) mostrado en el Mapa 1 (INEI, 2018).

**MAPA 1**  
**Distribución de la microcuenca Mariño**



Fuente: Adaptado en base a la información del Proyecto Mariño 2012 y el INEI.

## 2.2. Metodología

En la estructura y balance hídrico de los MHE se considera la simulación y optimización como similares, donde la simulación se construye y calibra para reproducir el comportamiento de los sistemas de agua reales y la optimización tiene como objetivo representar algunos supuestos de comportamiento más restrictivos que impulsan la gestión de los sistemas de agua. Los resultados óptimos se definen como aquellos que maximizan o minimizan el valor de la función objetivo, por ejemplo, minimizar los costos de asignación de agua (Cai *et al.*, 2003; Ringler *et al.*, 2004; Jenkins *et al.*, 2004; Brouwer & Hofkes 2008; Harou *et al.*, 2009; Tsur *et al.*, 2004; Young, 2005).

El MHE es diseñado en base a la programación matemática positiva (PMP) que permite analizar el uso agrícola del agua vinculando con el comportamiento económico de los agricultores considerando las características hidrológicas de la microcuenca en un contexto de cambio climático evaluando escenarios de asignación de agua, agricultura familiar y diversidad agrícola (Bekchanov *et al.*, 2017; Ossa-Moreno *et al.*, 2018; Bekchanov *et al.*, 2015; Cai, 2008) y la realidad de las campañas agrícolas en zona altoandina. Es importante mencionar que existe diferentes formas de aplicación de la PMP de acuerdo a la necesidad y tipo de información agrícola, como la PMP basada en máxima entropía, la cual considera un análisis probabilístico; PMP basada en el enfoque bayesiano, la cual selecciona valores desconocidos que maximicen una distribución de probabilidades y por ende un sistema de ecuaciones; y la PMP econométrica con una programación doble nivel (Henry de Frahan, 2019).

El componente hídrico considera la simulación de la oferta hídrica mediante la aplicación del SWAT haciendo uso de información climática (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, donde, para la situación actual 1982-2013, la base de datos climáticos diaria del grillado PISCO versión 2.0<sup>1</sup>, elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI); hidrométrica (aforos de caudales mensuales medidos en el ámbito de la microcuenca realizado por la Unidad Ejecutora Pro-Desarrollo Apurímac del GORE Apurímac) y material cartográfico (involucra 13 Unidades Hidrográficas, suelos, cobertura y uso de tierra) (GORE, 2010; Arnold *et al.*, 1998). Es importante mencionar que la bondad de ajuste del modelo calibrado permitió obtener como resultados: antes de la calibración: Coeficiente de correlación de Pearson = 0,71, Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe = -3,38; luego de la calibración del modelo se obtuvo: Coeficiente de correlación de Pearson = 0,81, Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe = -1,99. Asimismo, para la validación del modelo hidrológico, el RMS es igual a 0,77 (ANA, 2014). Los resultados de esta modelación permitieron definir el escenario de referencia (BL) sin considerar el cambio climático y la aplicación de una política. En adición, dado que el análisis es a nivel comunal, se construyó una gráfica tipo

<sup>1</sup> Uso del producto grillado PISCO de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico. Dirección de Hidrología SENAHMI. Ministerio del Ambiente 2017.



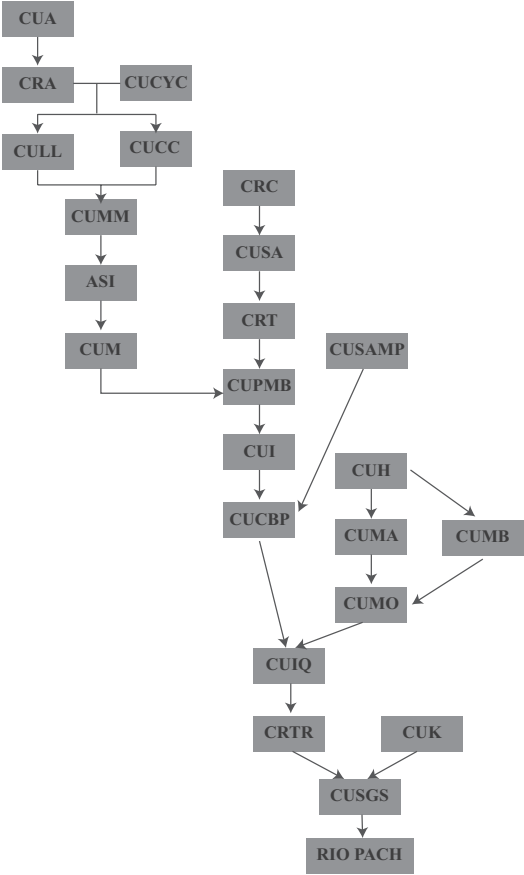
cascada para representar la relación entre las comunidades respecto a su vínculo con el agua de arriba hacia abajo, para analizar el uso y transferencia de agua entre las comunidades (Gráfico 1).

El comportamiento económico de los agricultores se representa a partir de un Modelo de Oferta no Lineal (MONL) enmarcado en la PMP para analizar el sector agrícola con alta desagregación geográfica ampliamente utilizado en modelos de oferta agrícola, análisis de políticas agroambientales, modelos hidroeconómicos, modelos bioeconómicos y análisis de impactos de cambio climático (Mérel & Howitt, 2014; Blanco-Gutiérrez *et al.*, 2013; Peña-Haro *et al.*, 2009; Volk *et al.*, 2008; Harou & Lund, 2008; Varela-Ortega *et al.*, 2011; Pulido-Velázquez *et al.*, 2008). El MONL representa la demanda derivada de agua en función de la asignación de tierras entre cultivos. El modelo PMP aplicado recoge el análisis por parcela para luego integrarlos a nivel comunal donde se considera la optimización restringida que ilustra la toma de decisiones como entrada del modelo (Ponce *et al.*, 2014). El PMP fue formalizado por Howitt (1995), el que por casi tres décadas ha sido utilizado en el campo de la economía agrícola (Ponce *et al.*, 2017). El PMP consta tres etapas para realizar la calibración del modelo, donde se asume que los agricultores optimizan el uso de sus insumos para maximizar sus ganancias. Primero, se define un modelo de programación lineal para maximizar los ingresos agrícolas netos de la microcuenca mediante la asignación de tierras y agua de riego para las actividades agrícolas como restricciones, más la restricción de calibración. Segundo, los valores duales asociados con la restricción de calibración se utilizan para especificar una función de costo no lineal, en la cual los costos marginales son iguales a los precios de mercado para el escenario de referencia. Finalmente, una vez que los parámetros de la función de costo han sido derivados, se especifica el modelo no lineal calibrado (Howitt, 1995; Heckeleei, 2002). La oferta agrícola es obtenida a partir de una encuesta que tomó en cuenta las características de altitud, agricultura familiar, comunidades, la forma de gestión del agua, idioma originario y percepción sobre el cambio climático. El Gráfico 2 sintetiza el esquema metodológico.

El escenario de referencia asume que la oferta coincide con la demanda, lo que significa que los agricultores cuentan con la cantidad de agua para satisfacer la demanda. Para simular el escenario de cambio climático que afecta los suministros de agua, en la aplicación del SWAT se considera el enfoque regionalizado para el periodo 2018-2065 haciendo uso de los datos proyectados del Centro de Datos Climáticos Mundiales-WDCC del Centro Alemán de Computo Climático, el modelo climático utilizado es el CSIRO-Mk3.0 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation-Mark model, version 3) para la Trayectoria de Concentración Representativa (TCR) 2.6, Escenario de impacto del cambio climático, cuyo efecto directo sobre el suministro de agua, es una disminución de la precipitación en un 17,09 % para el periodo 2018-2065 (Van Vuuren *et al.*, 2011).

GRÁFICO 1  
Cascada sobre la distribución de las comunidades

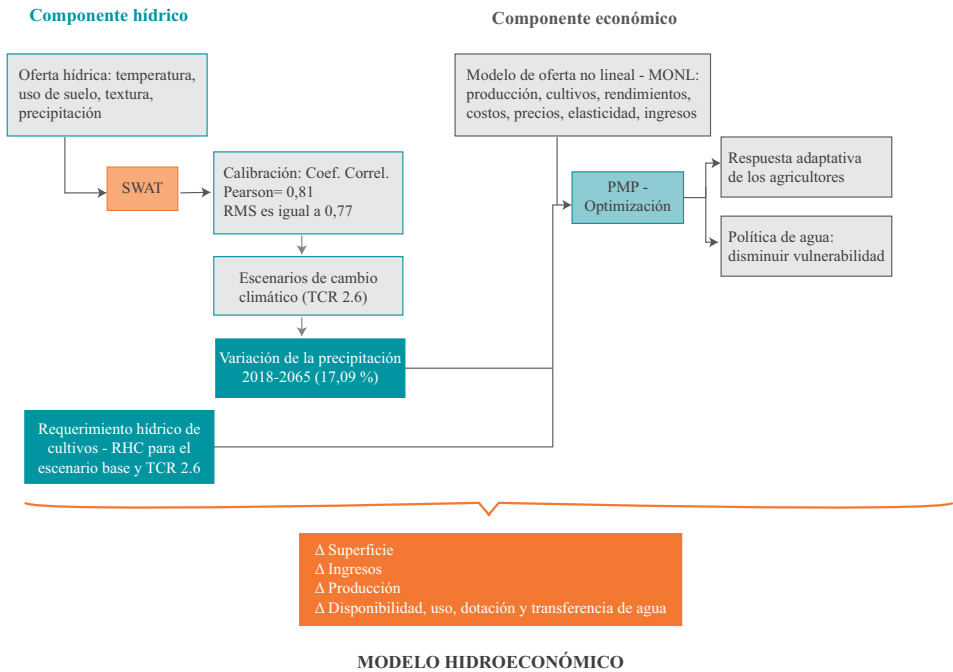
|   |        |
|---|--------|
| Ayaorcco                                    | CUA    |
| Aymas                                       | CRA    |
| Condado - Yurumpata y Curanguyocc           | CUCYC  |
| Llañucancha                                 | CULL   |
| Ccanabamba                                  | CUCC   |
| Marcamarca-Tamburco                         | CUMM   |
| Asillo                                      | ASI    |
| Marcahuasi                                  | CUM    |
| Ccorhuani                                   | CRC    |
| San Antonio                                 | CUSA   |
| Tamburco                                    | CRT    |
| Paltaypata                                  | CUPMB  |
| Illanya                                     | CUI    |
| Sahuanay, Antabamba, Maucacalle y Pantillay | CUSAMP |
| Canal "B" Pachachaca Baja                   | CUCBP  |
| Huayllabamba                                | CUH    |
| Moyocorral Alta                             | CUMA   |
| Moyocorral Baja                             | CUMB   |
| Molinopata                                  | CUMO   |
| Trujipata                                   | CRTR   |
| Karkatera                                   | CUK    |
| Imponeda                                    | CUIQ   |
| San Gabriel                                 | CUSGS  |



Fuente: Elaboración propia.

GRÁFICO 2

Esquema metodológico del modelo hidroeconómico aplicado en la microcuenca Mariño



Fuente: Elaboración propia.

Sobre el requerimiento hídrico de los cultivos (RHC), en base a información histórica para el periodo 1981-2013 para las variables: evapotranspiración potencial y real, precipitación mensual, coeficiente de uso consuntivo mensualizado, valor teórico de 0,50 de eficiencia de riego, demanda unitaria en m<sup>3</sup>/ha (información proveída por el GORE Apurímac); lo que permitió obtener el volumen de agua requerido por mes por cultivo para el escenario TCR 2.6. Asimismo, se evaluó la efectividad de una política de agua destinada a disminuir la vulnerabilidad de la agricultura familiar frente al cambio climático, la cual está orientada al uso eficiente del agua en la producción agraria, conforme la definición del objetivo tres priorizado de la Política Nacional Agraria 2021-2030 del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI).

### **2.3. Información**

En las 23 comunidades analizadas en la microcuenca se identificó 72 actividades entre pastizales, frutales y cultivos, prueba de la diversidad agrícola. Para efectos del estudio se realizó una reclasificación en cultivos (15), frutas (2), pastizales (3) por ocupar mayor área, equivalente al 90 %; el resto, menos relevante, no es considerado en el análisis. Las actividades más comunes son: alfalfa (de secano y riego), papa (de secano), maíz (de regadío), palta (de secano y regadío), hortalizas (de secano y regadío), camote (de secano y regadío) frejol (de regadío), cebada (de regadío), yuca (de secano y regadío) y los grupos corresponde a cultivos, frutales, pastizales y aromáticos. Para definir cultivos transitorios, cultivos permanentes de cosecha estacional y de cosecha continua se considera la disponibilidad de agua y el periodo vegetativo.

La información referida a la superficie, actividades agrícolas (cultivos transitorios, cultivos permanentes de cosecha estacional y cultivos permanentes de cosecha continua), nivel de producción, rendimiento, precios, costos de producción y transporte por comunidad y cultivo, y sistemas de riego (de regadío, de secano), tecnologías de riego por aspersión y/o gravedad, intensidad laboral y el costo de oportunidad para los cultivos que son de autoconsumo, se obtuvieron a partir de un trabajo de campo (encuesta agrícola adaptada a un enfoque de cambio climático con presencia de biodiversidad agrícola).

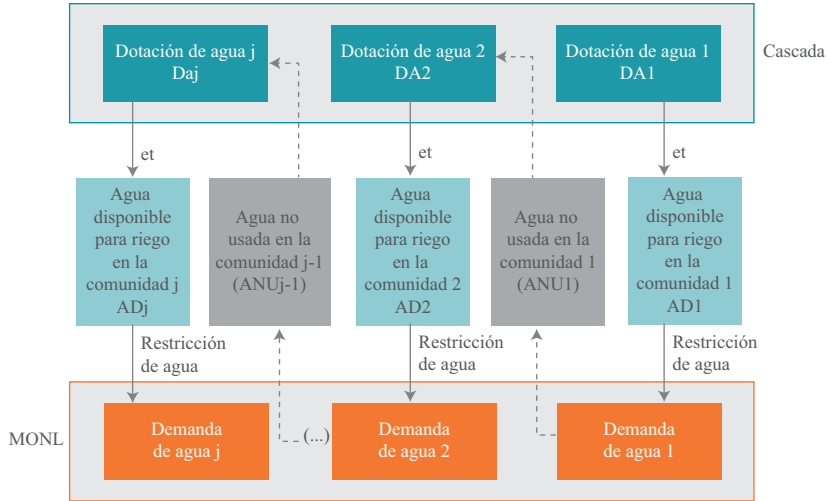
### **2.4. Especificaciones del modelo hidroeconómico (MHE)**

El modelo de optimización para toda la microcuenca maximiza el ingreso agrícola sujeto a los recursos, restricciones geográficas, hidrológicas e institucionales; asimismo, se incorporó el razonamiento del modelo conceptual de cascada dentro del análisis de acuerdo al Gráfico 1. Los impactos económicos del cambio climático se calculan como la diferencia de ingresos entre el escenario de referencia (BL) y el escenario de cambio climático (yw-cc).

El Gráfico 3 muestra que la cantidad de agua disponible para riego en cada comunidad (AD) depende de la dotación de agua (DA), y un parámetro de eficiencia de transporte de agua (et). En este contexto, AD representa la restricción de agua que podría usarse en cada comunidad. En ese sentido, cada comunidad podría usar toda el agua disponible o dejar algo de agua (ANU) para otras comunidades aguas abajo (líneas entrecortadas) donde el agua no utilizada en una comunidad en la parte alta aumentará la dotación de agua para riego en la parte media y/o baja (transferencia de agua). No existe un comercio de agua, por tal el costo de transferencia es cero en todas las comunidades.

## GRÁFICO 3

## Modelo conceptual de la disponibilidad de agua



Fuente: Adaptado en base a Ponce *et al.* (2017).

Considerando a Ponce *et al.* (2017) y las particularidades de la microcuenca, el modelo integrado está representado por las siguientes ecuaciones:

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

$$AC_{c,a,s} = \alpha_{c,a,s} * (X_{c,a,s})^{\beta_{c,a,s}} \quad [2]$$

En la ecuación [1], Z es el valor de la función objetivo (ingreso total agrícola) y  $X_{c,a,s}$  representa el área cosechada de la actividad  $a$  en la comunidad  $c$ , utilizando los sistemas  $s$  (de secano o de regadío). Para el modelamiento se considera área cosechada y no área sembrada dado que hay diferencias originado por la presencia de plagas o eventos climáticos que causan pérdidas. Las actividades agrícolas se refieren a los cultivos dentro de la microcuenca los cuales pueden ser transitorios, permanentes de cosecha continua y permanentes de cosecha estacional. Por otro lado,  $Y_{c,a,s}$  es el rendimiento por hectárea de la actividad  $a$  en la comunidad  $c$ , usando el sistema  $s$ ,  $P_a$  es el precio de la actividad  $a$ ,  $AC_{c,a,s}$  es el vector de costos promedio por unidad de actividad  $a$  en la comunidad  $c$  usando el sistema  $s$ , donde el principal componente de los costos son la mano de obra (contratada y propia), más los costos de fertilizantes, plaguicidas, pesticidas, semillas, yunta, etc.

La ecuación [2] representa la función calibrada de costos en la cual los parámetros de la función,  $\alpha_{c,a,s}$  y  $\beta_{c,a,s}$  son derivados de un equilibrio de maximización del beneficio haciendo uso de la PMP (Howitt, 1995; Blanco *et al.*, 2008; Howitt *et al.*, 2010; Hurd, 2015). Esta calibración de los costos se hace para igualar la cantidad de tierra destinada a cada cultivo del escenario de referencia, resultado de la encuesta, dado el proceso de maximización de beneficio de los productores. Se asume que las elasticidades están dadas para cada cultivo (Heckeley & Britz, 2005; Blanco *et al.*, 2008; Howitt *et al.*, 2010; Medellín-Azuara *et al.*, 2011; McKinney *et al.*, 1999).

$$RA_c = \sum_a freq_{c,a,reg} * X_{c,a,reg} \quad [3]$$

$$AD_c \leq (DA_c + ANU_{-c}) * et_c \quad [4]$$

$$RA_c \leq AD_c \quad [5]$$

En la ecuación [3],  $RA_c$  representa los requerimientos de agua en la comunidad  $c$ , que es igual al requerimiento hídrico del cultivo o actividad de riego  $a$  ( $freq_{c,a,reg}$ ) multiplicado por la superficie asignada a dicha actividad. La ecuación [4] representa el agua disponible para riego ( $AD_c$ ) en la comunidad  $c$  el cual debe ser menor o igual que la dotación de agua de la siguiente comunidad aguas abajo más el agua no utilizada por alguna otra comunidad aguas arriba ( $ANU_{-c}$ ) multiplicado por la eficiencia del transporte parámetro ( $et_c$ ), mientras que la ecuación [5] representa los requerimientos de agua ( $RA_c$ ) los cuales deben ser menor o igual que el agua disponible para riego ( $AD_c$ ).

$$ANU_c = DA_c + ANU_{-c} - \frac{AD_c}{et_c} \quad [6]$$

$$\sum_a \sum_s X_{c,a,s} \leq stierra_c \quad [7]$$

$$\sum_a \sum_{reg} X_{c,a,reg} \leq regtierra_c \quad [8]$$

La ecuación [6] muestra que el agua que no se usa en la comunidad  $c$  es la diferencia entre la dotación de agua y el agua utilizada en la comunidad  $c$ . Finalmente, las ecuaciones [7] y [8] muestran restricciones de recursos asociadas a la superficie de secano ( $stierra_c$ ) y bajo riego ( $regtierra_c$ ). No existe sustitución de tierras. El impacto del cambio climático sobre el recurso hídrico se simula como una perturbación en el parámetro  $DA_c$  que afecta las variables temperatura y precipitación en base al TCR 2.6, el cual es simulado en el SWAT. Asimismo, los impactos del cambio climático



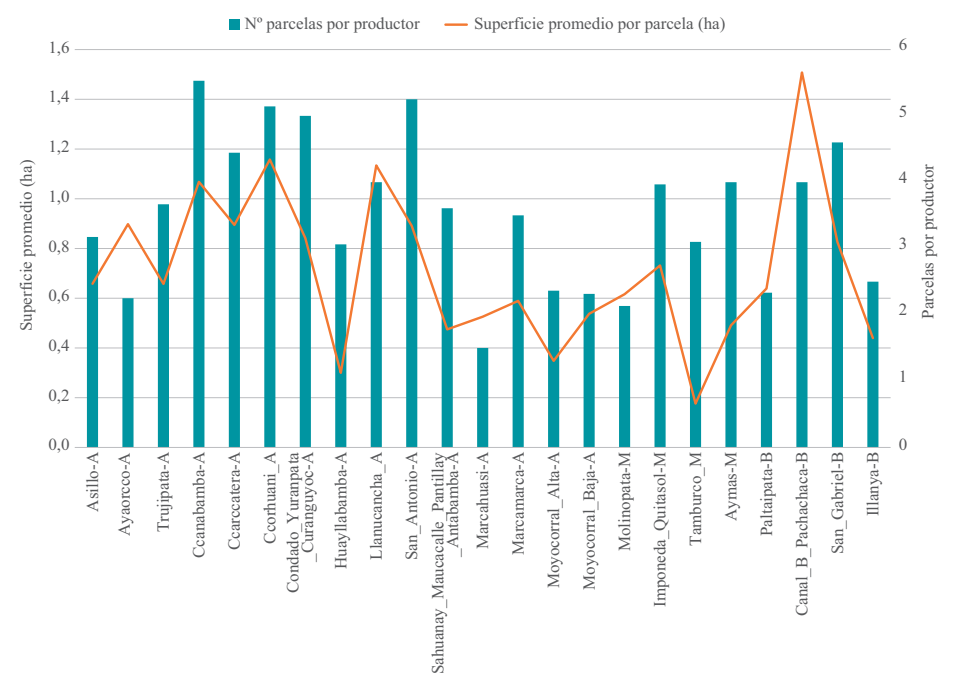
en los rendimientos agrícolas se modelan a partir del parámetro  $Y_{c,a,s}$ , que recoge los cambios de dichos rendimientos a partir de una variación de la disponibilidad hídrica. El impacto de la perturbación resultado del escenario TCR 2.6 el cual considera una reducción de la precipitación en 17,09 % (Jiang & Grafton, 2012; Jonkman *et al.*, 2008; Graveline *et al.*, 2014; Varela-Ortega *et al.*, 2014).

3. Resultados y discusión

3.1. Sobre la superficie agrícola

Uno de los grandes problemas en la agricultura andina como el Perú es la tendencia a la microparcelación, donde un propietario tiene hasta 6 parcelas con un promedio de 0,24 ha de extensión cada una (Gráfico 4). Por otro lado, el 87,37 % de los productores no están asociados (Arjoon *et al.*, 2014; Varela-Ortega *et al.*, 2014).

GRÁFICO 4  
Factores de la microparcelación



(A: alta, M: media, B: baja).

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó dos simulaciones, donde se aborda las respuestas adaptativas de los productores agrarios frente a los impactos del cambio climático, con y sin política del agua. Como resultado de la simulación del impacto del cambio climático sin política (cambios en la disponibilidad de agua y productividad agrícola) a nivel de la superficie agrícola total se da una disminución de 6,42 %. Siendo evidente el impacto en la actividad agrícola como en los mismos agricultores.

Aunque las extensiones son pequeñas para este tipo de agricultura andina, la variación de superficie es significativa, caracterizado por una producción variada para asegurar sus ingresos, aunque ello signifique mayores costos de producción. En el escenario de referencia, la superficie agrícola total es igual a 160,25 ha (35,09 ha seco y 125,16 ha bajo riego); al aplicar la perturbación debido al cambio climático, genera una disminución del 9,36 % para las tierras bajo riego (113,44 ha) y un aumento del 4,08 % en tierras de seco (36,52 ha).

A nivel comunitario, Molinopata aumenta sus tierras de seco en un 13,39 %, reduciendo sus tierras bajo riego en -17,09 %, mientras que Condado–Yuranpata–Curanguyoc, Sahuanay–Maucacalle–Pantilla y Antabamba presenta una disminución de tierras bajo riego igual a -18,31 % y -17,09 %, respectivamente, mientras que sus tierra de seco no presentan variaciones significativas; respecto a Ccarccatera, Huayllabamba, San Gabriel, Ayaorcco, Llanuncancha son las comunidades con mayor disminución de superficie bajo riego (-17,09 %, -17,09 %, -13,80 %, -13,64 % y -13,96 %, respectivamente), mientras que las superficies de seco no presentan variaciones significativas. El resto de comunidades presentan disminuciones no significativas en la superficie bajo riego y de seco. Cabe precisar que Molinopata e Imponeda – Quitasol poseen el 22 % de la superficie de la microcuenca; por lo tanto, una afectación en estas comunidades se sentirá a nivel de microcuenca. La relevancia de estos resultados radica en el hecho de que los cultivos bajo riego son generalmente más rentables que los de seco (Varela-Ortega *et al.*, 2014; Esteve *et al.*, 2015; Graveline *et al.*, 2014; Ponce *et al.*, 2014; Ponce *et al.*, 2017; Ponce *et al.*, 2015). Los resultados se resumen en el Cuadro 1.

La asignación de tierras para las actividades de seco como la alfalfa, maíz, alverja, camote, haba, palta y papa disminuyen en Marcahuasi, Asillo, Molinopata y Ccarccatera. La asignación de tierra para las actividades bajo riego como las hortalizas y legumbres, cebada, frejol, camote y palta disminuyen en Marcahuasi, Canal B Pachachaca y Moyocorral Baja. Aquellas actividades de seco y bajo riego como la papa y el maíz (ambas se obtienen dos cosechas al año conocidas como campaña grande y campaña chica) presentan una disminución en su superficie cosechada tanto en Marcahuasi como Moyocorral Baja. Algunas actividades como la alfalfa y el maíz amarillo son utilizadas como insumo (alimento de cuyes, aves u otros animales de corral), donde la variación de superficie bajo riego y seco afectaría indirectamente a dichas actividades económicas. Aunque existe un aumento de superficie de seco en el escenario de cambio climático en algunas comunidades,

esto no compensa la reducción de superficie bajo riego, donde hay una disminución de superficie agrícola total igual a -6,42 %, 10,29 ha menos. Comparando los resultados con otros estudios aplicados en la región, como Chile (Ponce *et al.*, 2017; Ponce *et al.*, 2015; Ponce *et al.*, 2014), el impacto del cambio climático provoca una disminución de la tierra asignada tanto de secano como bajo riego, mientras que, en la cuenca de Mariño el impacto es más acentuado sobre las tierras bajo riego que la de secano (esta situación podría ser resultado del manejo de una variedad de cultivos que se adaptan más fácilmente, situación que podría evaluarse en otros estudios).

**CUADRO 1**  
**Cambios en la superficie agrícola (ha)**

| Comunidad                               | Escenario BL |               | Escenario yw_cc |               | Var. %      |              | Var. %           |
|---|--------------|---------------|-----------------|---------------|-------------|--------------|------------------|
|   | Secano       | Riego         | Secano          | Riego         | Secano      | Riego        | Superficie total |
| Ccorhuani_1                             | 0,00         | 1,45          | 0,00            | 1,27          | 0,00        | -12,28       | -12,28           |
| Llanucancha_                            | 3,20         | 6,84          | 3,20            | 5,89          | 0,00        | -13,96       | -9,51            |
| Marcahuasi                              | 1,15         | 1,99          | 1,16            | 1,81          | 1,29        | -9,17        | -5,34            |
| Ayaorcco                                | 2,37         | 4,55          | 2,38            | 3,93          | 0,00        | -13,64       | -8,96            |
| Asillo                                  | 3,10         | 2,85          | 3,13            | 2,49          | 1,08        | -12,52       | -5,43            |
| Ccanabamba                              | 1,80         | 8,88          | 1,80            | 7,91          | 0,00        | -10,83       | -9,00            |
| Huayllabamba                            | 0,00         | 2,04          | 0,00            | 1,69          | 0,00        | -17,09       | -17,09           |
| Molinopata                              | 9,05         | 7,09          | 10,26           | 5,88          | 13,39       | -17,09       | 0,00             |
| San_Antonio                             | 1,05         | 7,49          | 1,05            | 6,55          | 0,00        | -12,59       | -11,04           |
| Aymas                                   | 0,00         | 2,98          | 0,00            | 2,52          | 0,00        | -15,60       | -15,60           |
| Ccarccatera                             | 7,45         | 3,07          | 7,62            | 2,54          | 2,24        | -17,09       | -3,40            |
| Paltaipata                              | 0,00         | 2,98          | 0,00            | 2,98          | 0,00        | 0,00         | 0,00             |
| Illanya                                 | 0,00         | 1,86          | 0,00            | 1,86          | 0,00        | 0,00         | 0,00             |
| Trujipata                               | 0,00         | 5,39          | 0,00            | 5,38          | 0,00        | 0,00         | 0,00             |
| Imponeda_Quitasol                       | 0,00         | 18,72         | 0,00            | 18,72         | 0,00        | 0,00         | 0,00             |
| Sahuanay_Maucacalle_Pantillay_Antabamba | 3,02         | 6,37          | 3,02            | 5,28          | 0,10        | -17,09       | -11,57           |
| Moyocorral_Alta                         | 0,00         | 2,68          | 0,00            | 2,30          | 0,00        | -14,03       | -14,03           |
| Canal_B_Pachachaca                      | 2,90         | 9,65          | 2,90            | 9,65          | 0,00        | 0,00         | 0,00             |
| Condado_Yuranpata_Curanguyoc            | 0,00         | 6,61          | 0,00            | 5,40          | 0,00        | -18,31       | -18,31           |
| San_Gabriel                             | 0,00         | 5,53          | 0,00            | 4,77          | 0,00        | -13,80       | -13,80           |
| Marcamarca                              | 0,00         | 7,13          | 0,00            | 6,55          | 0,00        | -8,17        | -8,17            |
| Moyocorral_Baja                         | 0,00         | 9,02          | 0,00            | 8,07          | 0,00        | -10,53       | -10,53           |
| <b>Total</b>                            | <b>35,09</b> | <b>125,17</b> | <b>36,52</b>    | <b>113,44</b> | <b>4,08</b> | <b>-9,37</b> | <b>-6,43</b>     |

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Sobre la producción

Bajo el escenario de cambio climático (yw\_cc), se da una disminución en la producción total en -7,86 % respecto al escenario de referencia sin cambio climático (BL), pasando de 1.141,47 toneladas a 1.051,79 toneladas. La actividad de mayor importancia es la alfalfa con 617,89 tn en el escenario de referencia sin cambio climático (BL) y una disminución del -13,54 % en el de cambio climático (yw\_cc); dicha actividad es sembrada en la mayoría de las comunidades a excepción de San Gabriel y Tamburco. La siguiente actividad de mayor importancia es la palta, cuya producción no se vería afectada por el cambio climático. Sobre las actividades papa y maíz, presentan una disminución de -1,70 % y -1,07 %, respectivamente, en el escenario yw\_cc respecto a BL. Respecto al pepinillo, zanahoria y lechuga, presentan una mayor disminución en su producción de -27,65 %, -12,78 % y -18,12 % respectivamente. Mientras que el haba (actividad introducida, pero de manejo ancestral) aumenta su nivel de producción en 2,52 %. El brócoli y la vainita no presenta variación. El cambio climático tendrá consecuencias desiguales en las comunidades. Por ejemplo, la producción de alfalfa disminuye en la mayoría de las comunas (Ccorhuani, Llanuncancha, Marcahuasi, Ayaorcco, Asillo, Ccanabamba, Huayllabamba, Molinopata, San Antonio, Aymas, Ccarccatera, Sahuanay–Maucacalle–Pantillay–Antabamba, Moyocorral Alta, Condado–Yuranpata–Curanguyoc, Marcamarca y Moyocorral Baja) en 15,37 % menos. Las comunidades Paitaipata, Illanya, Trujipata, Imponeda - Quitasol y Canal B Pachachaca no presentan cambios en su nivel de producción.

### 3.3. Sobre el recurso hídrico

Sobre la dotación total de agua en el escenario de referencia es igual a 104.743,33 m<sup>3</sup>, el cual disminuye un -17,09 % (86.842,70 m<sup>3</sup>) en el escenario de cambio climático, equivalente al escenario RCP 2.6. Respecto a la demanda y suministro del agua a nivel de las comunidades, estos presentan comportamientos diferenciados, donde en algunos casos la demanda es mayor que la oferta de agua, esta situación evidencia una brecha, la cual se puede compensar mediante la transferencia de agua de una comunidad a otra, aguas arriba hacia aguas abajo (tal cual se muestra el flujo en los Gráficos 1 y 3).

Siete de las veintitrés comunas transfieren a otras aguas abajo un total de 12.484,88 m<sup>3</sup>. Esta transferencia de agua es impulsada por las diferencias en la productividad del agua entre comunas. Las comunidades Llanuncancha y Marcahuasi, las cuales presentan una reducción de sus tierras bajo riego (de -13,96 %, 5,88 ha menos, y -9,17 %, 1,81 ha menos, respectivamente) en el escenario yw\_cc, representan el 41,91 % (5.233,51 m<sup>3</sup>) de la transferencia de agua. Al darse la transferencia de agua, se da un incremento del agua disponible para riego. El Cuadro 2, para un escenario de cambio climático, muestra la dotación de agua obtenida mediante la aplicación

del SWAT, el agua puesta en la parcela (ajustado a una eficiencia de transporte de 60 %), el agua disponible (dotación de agua más el agua transferida ajustada por la eficiencia de transporte), el agua utilizada para el riego, el agua no utilizada – ANU (agua disponible menos el agua utilizada).

**CUADRO 2**  
**Indicadores de Gestión del Recurso Hídrico en un escenario de cambio climático (m<sup>3</sup>)**

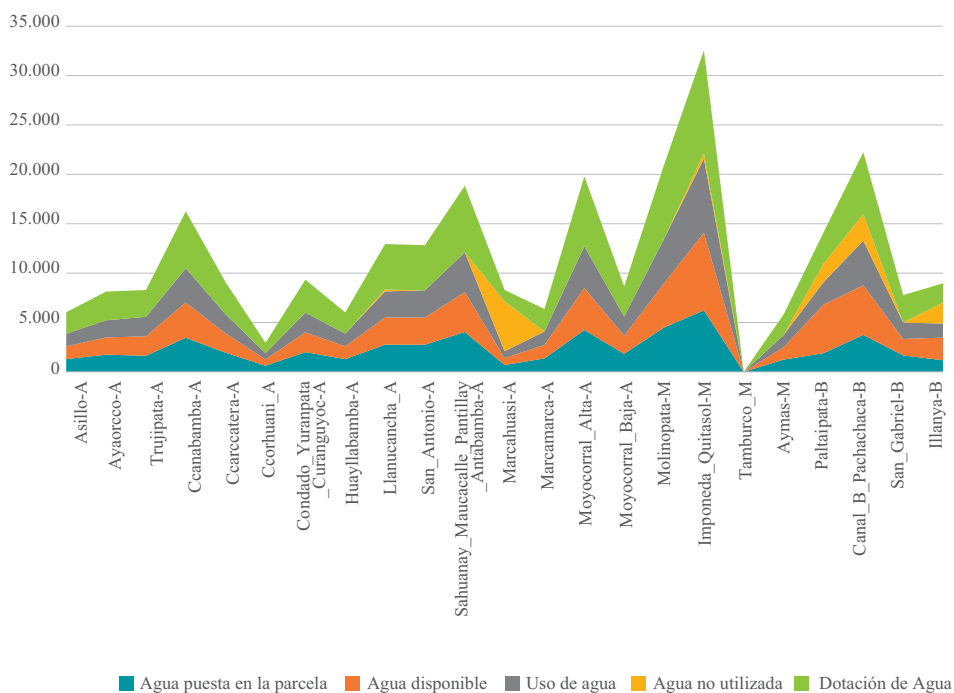
| Comunidades                             | DA        | Agua puesta en parcela | AD       | Uso de agua | ANU             |
|---|-----------|------------------------|----------|-------------|-----------------|
| Ccorhuani_1                             | 1.051,89  | 631,13                 | 631,13   | 631,13      | 0,00            |
| Llanucancha_                            | 4.593,94  | 2.756,36               | 2.756,36 | 2.640,94    | <b>192,37</b>   |
| Marcahuasi                              | 1.161,67  | 697,00                 | 697,00   | 697,00      | <b>5.041,13</b> |
| Ayaorcco                                | 2.903,26  | 1.741,96               | 1.741,96 | 1.741,96    | 0,00            |
| Asillo                                  | 2.155,25  | 1.293,15               | 1.293,15 | 1.293,15    | 0,00            |
| Ccanabamba                              | 5.762,28  | 3.457,37               | 3.572,79 | 3.457,37    | 0,00            |
| Huayllabamba                            | 2.151,49  | 1.290,89               | 1.290,89 | 1.290,89    | 0,00            |
| Molinopata                              | 7.484,82  | 4.490,89               | 4.490,89 | 4.490,89    | 0,00            |
| San_Antonio                             | 4.580,61  | 2.748,36               | 2.748,36 | 2.748,36    | 0,00            |
| Aymas                                   | 2.073,81  | 1.244,28               | 1.244,28 | 1.244,28    | 0,00            |
| Ccarccatera                             | 3.237,26  | 1.942,36               | 1.942,36 | 1.942,36    | 0,00            |
| Paltaipata                              | 3.145,95  | 1.887,57               | 4.912,25 | 2.276,65    | <b>1.872,10</b> |
| Illanya                                 | 1.958,30  | 1.174,98               | 2.298,24 | 1.417,17    | <b>2.116,91</b> |
| Trujipata                               | 2.721,91  | 1.633,14               | 1.969,82 | 1.969,78    | <b>0,08</b>     |
| Imponeda_Quitasol                       | 10.382,02 | 6.229,21               | 7.849,90 | 7.513,22    | <b>561,14</b>   |
| Sahuanay_Maucacalle_Pantillay_Antabamba | 6.728,95  | 4.037,37               | 4.037,37 | 4.037,37    | 0,00            |
| Moyocorral_Alta                         | 2.272,21  | 1.363,33               | 1.363,33 | 1.363,33    | 0,00            |
| Tamburco_                               |           | 0,00                   | 0,00     |             | 0,00            |
| Canal_B_Pachachaca                      | 6.247,89  | 3.748,74               | 5.018,88 | 4.521,45    | <b>2.701,15</b> |
| Condado_Yuranpata_Curanguyoc            | 3.334,60  | 2.000,76               | 2.000,76 | 2.000,76    | 0,00            |
| San_Gabriel                             | 2.776,03  | 1.665,62               | 1.665,62 | 1.665,62    | 0,00            |
| Marcamarca                              | 3.048,72  | 1.829,23               | 1.829,23 | 1.944,66    | 0,00            |
| Moyocorral_Baja                         | 7.069,86  | 4.241,91               | 4.241,91 | 4.241,91    | 0,00            |

Fuente: Elaboración propia.

Para algunas comunidades, la transferencia de agua (ANU) es muy relevante; por ejemplo, Paltaipata recibe agua transferida desde Marcahuasi incrementando el agua disponible para riego, en 2,62 % pasando de 4.912,25 m<sup>3</sup> a 5.041,13 m<sup>3</sup>, mientras que, Illanya al recibir de Marcahuasi incrementa su agua disponible en 219,35 % pasando de 2.298,24 m<sup>3</sup> a 5.041,13 m<sup>3</sup>. Sin embargo, la dotación de agua de riego de

Marcahuasi es 1.161,67 m<sup>3</sup>, menor a su agua no utilizada, esto es porque Marcahuasi recibe transferencias de agua de Asillo, Marcamarca y otras comunidades aguas arriba (de acuerdo a la lógica del Gráfico 1 y 3), siendo su demanda de agua igual al 60 % (697 m<sup>3</sup>) de su dotación. Marcahuasi bajo el escenario yw\_cc, presenta una reducción de su área bajo riego en un -9 % y ANU de 5.041,13 m<sup>3</sup>. Por otro lado, Paltaipata no modifica su tierra bajo riego gracias a la transferencia de agua manteniendo su misma productividad. El Gráfico 5 muestra la dinámica de gestión de los recursos hídricos en el escenario de cambio climático.

GRÁFICO 5  
Dinámica de la gestión de los recursos hídricos (km<sup>3</sup>)



(A: alta, M: media, B: baja).

Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Sobre los ingresos

Al optimizar los ingresos, los agricultores adaptarán sus prácticas agrícolas (sistemas agrícolas) con el objetivo de minimizar los impactos económicos del cambio climático, bajo restricciones de asignación de tierra y disponibilidad del recurso hídrico (Buytaert *et al.*, 2011; Rolando *et al.*, 2017). Del total de actividades,



son consideradas como nativas: variedades de papa, variedades de maíz (maíz amiláceo, maíz morado, choclo, maíz amarillo) y cebada.

Para el escenario de cambio climático, se espera una reducción del nivel de ingresos totales en -3,66 % (13,52 miles de \$), mientras que, a nivel comunitario, la mayoría de ellas presenta una disminución en sus ingresos, siendo las más afectadas Moyocorral Baja, San Gabriel, Huayllabamba, Ccanabamba con -13,62 %, -12,08 %, -13,05 % y -10,02 %, respectivamente (Cuadro 3). Mientras que Canal B Pachachaca, Imponeda – Quitasol, Trujipata, Illanya, Paltaipata no sufren cambios en sus ingresos en el escenario yw\_cc.

**CUADRO 3**  
**Ingresos (Miles de soles) y cambio porcentual (%)**

| Comunidad                               | BL<br>(miles de \$) | yw_cc<br>(miles de \$) | Var. % |
|---|---------------------|------------------------|--------|
| Ccorhuani_1                             | 1,31                | 1,24                   | -5,73  |
| Llanucancha_                            | 13,52               | 12,37                  | -8,52  |
| Marcahuasi                              | 7,68                | 7,60                   | -0,99  |
| Ayaorcco                                | 8,34                | 7,69                   | -7,87  |
| Asillo                                  | 7,94                | 7,67                   | -3,38  |
| Ccanabamba                              | 17,25               | 15,52                  | -10,02 |
| Huayllabamba                            | 4,27                | 3,72                   | -13,05 |
| Molinopata                              | 21,97               | 21,27                  | -3,17  |
| San_Antonio                             | 9,49                | 9,05                   | -4,70  |
| Aymas                                   | 6,22                | 5,89                   | -5,32  |
| Ccarccatera                             | 17,08               | 15,68                  | -8,22  |
| Paltaipata                              | 8,01                | 8,01                   | 0,00   |
| Illanya                                 | 3,18                | 3,18                   | 0,00   |
| Trujipata                               | 7,55                | 7,55                   | 0,00   |
| Imponeda_Quitasol                       | 38,01               | 38,01                  | 0,00   |
| Sahuanay_Maucacalle_Pantillay_Antabamba | 10,18               | 9,24                   | -9,23  |
| Moyocorral_Alta                         | 3,62                | 3,33                   | -7,88  |
| Canal_B_Pachachaca                      | 131,86              | 131,86                 | 0,00   |
| Condado_Yuranpata_Curanguyoc            | 9,36                | 8,83                   | -5,71  |
| San_Gabriel                             | 15,13               | 13,30                  | -12,08 |
| Marcamarca                              | 11,27               | 10,95                  | -2,80  |
| Moyocorral_Baja                         | 16,36               | 14,13                  | -13,62 |

Fuente: Elaboración propia.

Bajo el escenario de yw\_cc, aproximadamente el 50 % de las comunidades son vulnerables económicamente, a excepción de Paltapata, Trujipata, Illanya, Imponeda-Quitashol y Canal B-Pachachaca. Por ejemplo, la papa y sus variedades (Rolando *et al.*, 2017; de Haan, 2009), son los cultivos que menos ingresos genera en la zona andina, sin embargo, son cultivos que no presentan disminuciones en su producción al igual que el maíz y el haba. Los ingresos provenientes de la producción de alfalfa (actividad principal en la microcuenca) disminuyeron en las comunas Llanuncancha, Marcahuasi, Ccanabamba, Molinopata, Condado-Yuranpata-Curanguyoc, San Gabriel y Moyocorral Baja en el orden de -21,64 %, -15,01 %, -19,03 %, -15,67 %, -42,36 %, -25,60 % y -18,98 %, respectivamente. Existen menores impactos en los ingresos, -0,14 % proveniente de la producción de cebada en Ccanabamba. Llanuncancha y Ayaorcco son ligeramente afectados en sus ingresos en -0,15 % y -1,43 %, respectivamente. Por otro lado, Marcahuasi, Molinopata, Ccarccatera, Moyocorral Baja logran incrementar sus ingresos debido a la venta de maíz amarillo en 0,06 %, 9,44 %, 0,10 % y 4,92 %, respectivamente; Ccarccatera, con el haba, muestra un aumento de 0,16 %. San Gabriel, con el pepinillo, aumenta sus ingresos en 25,6 %.

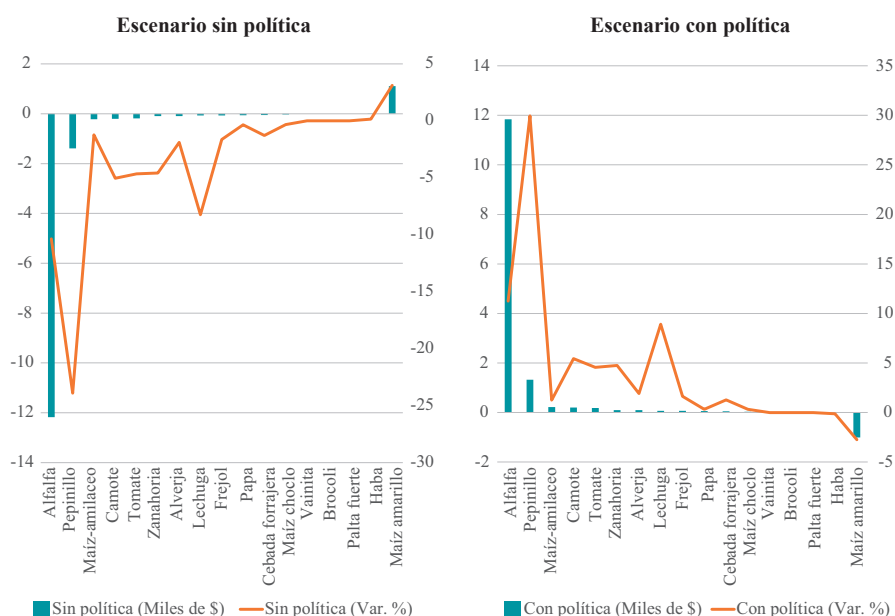
### 3.5. La política aplicada

La política sectorial del gobierno peruano, aplicada a través del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI) ha implementado una serie de medidas en torno al agua destinada a reducir la vulnerabilidad de la agricultura andina frente al cambio climático, las cuales fueron insuficientes (Rolando *et al.*, 2017; Garibaldi *et al.*, 2017; Rose *et al.*, 2019). Se consideró como parte del análisis la simulación de una política, donde se evalúa las consecuencias económicas de una mayor eficiencia en el transporte del agua (pasando de un 60 % a 72 %), consecuencia del mejoramiento en el mantenimiento de los canales para reducir las pérdidas de filtración como política de fortalecimiento de las actividades de operación y mantenimiento de canales en el marco de la política de Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica. La transferencia de agua a través de las comunidades disminuirá en -72,7 %, pasando de 12.484,88 m<sup>3</sup> con cambio climático a 3.408,39 m<sup>3</sup> después de aplicar la política. Asimismo, la superficie de secano disminuye en -3,73 %, mientras que la de riego aumenta en 10,08 %. La nueva asignación de tierras beneficia a la producción agrícola con un aumento de 8,29 % (87,14 miles de toneladas más). La aplicación de la política reducirá las pérdidas económicas de la microcuenca debido al cambio climático, de una reducción de 3,66 % equivalente a 13,52 miles de \$ menos (escenario sin política) a un aumento de 5,18 % equivalente a 18,45 miles de \$ adicional (escenario con política), obteniendo un beneficio neto de ambos escenarios para la microcuenca igual a 4,93 miles de \$ adicional.

El Gráfico 6 muestra que los impactos económicos de la política del agua según actividades, en comparación con el escenario sin política con cambio climático, se revierte la situación de pérdidas económicas, donde se presenta incrementos

en los ingresos de 15,40 %, 14,61 %, 13,46 % y 10,82 % para Moyocorral Baja, Huayllabamba, San Gabriel y Ccanabamba, respectivamente. Los productores de Alfalfa en Moyocorral Baja aumentan sus ingresos en 22,57 % y Huayllabamba en 14,61 %; en maíz amarillo en San Gabriel aumentan en 2,14 %; en el pepinillo en San Gabriel aumentan en 32,82 %. El impacto del cambio climático bajo el escenario sin política en Molinopata (comunidad con mayor superficie bajo riego) es más intenso, siendo la más afectada.

GRÁFICO 6  
Impactos económicos por escenario



Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 4 consolida las respuestas adaptativas de las comunidades a causa del cambio climático. Por ejemplo, las comunidades Paltaipata, Illanya, Trujipata, Imponeda-Quitasol y Canal B-Pachachaca presentan una reducción de superficie sin cambios en el nivel de ingresos y producción; esto podría ser gracias a la presencia de cultivos tradicionales como la papa, maíz y haba dado que se considera que los Andes son un centro de origen y diversidad para numerosas especies de cultivos (NRC, 1989), incluida la papa y el maíz (Spooner *et al.*, 2007; Spooner *et al.*, 2005; de Haan *et al.*, 2010). En ese sentido, se podría decir que una política de agua enfocada en la gestión de este tipo de cultivos podría ser una alternativa interesante para enfrentar los impactos del cambio climático y compensar las pérdidas de ingresos.

San Gabriel y Moyocorral Baja disminuyen sus ingresos y producción sin cambios en la superficie, donde podría dedicarse esfuerzos a fin de reducir sus impactos en el nivel de producción para mejorar el nivel ingresos, una opción, es la rotación de actividades (Barrios, 2007; Dietze *et al.*, 2019). Ayaorcco, Ccanabamba, Ccarccatera, Sahuanay–Maucacalle–Pantillay–Antabamba y Moyocorral Alta, quienes se ven más afectados en sus ingresos, superficie y producción, es posible que requieran implementar políticas más integradas como ampliación de frontera agrícola, rotación de actividades u otros (IPCC, 2013; Garibaldi *et al.*, 2017; Rose *et al.*, 2019; Ponce *et al.*, 2017; Ponce *et al.*, 2015; Ponce *et al.*, 2014; Varela-Ortega, 2007).

**CUADRO 4**  
**Resultados principales del impacto del cambio climático (%)**

| Comunidad                               | Var. Ingresos | Var. Superficie | Var. Producción |
|---|---------------|-----------------|-----------------|
| Ccorhuani_1                             | -5,7          | -12,28          | -15,72          |
| Llanucancha_                            | -8,5          | 0,00            | -14,62          |
| Marcahuasi                              | -1,0          | -17,09          | -2,62           |
| Ayaorcco                                | -7,9          | -14,03          | -15,61          |
| Asillo                                  | -3,4          | 0,00            | -9,95           |
| Ccanabamba                              | -10,0         | -15,60          | -11,84          |
| Huayllabamba                            | -13,0         | -5,34           | -17,09          |
| Molinopata                              | -3,2          | 0,00            | -5,68           |
| San_Antonio                             | -4,7          | -13,80          | -9,00           |
| Aymas                                   | -5,3          | -5,43           | -15,51          |
| Ccarccatera                             | -8,2          | -18,31          | -11,41          |
| Paltaipata                              | 0,0           | -8,96           | 0,00            |
| Illanya                                 | 0,0           | -8,17           | 0,00            |
| Trujipata                               | 0,0           | -11,04          | 0,00            |
| Imponeda_Quitasol                       | 0,0           | -10,53          | 0,00            |
| Sahuanay_Maucacalle_Pantillay_Antabamba | -9,2          | -11,57          | -15,08          |
| Moyocorral_Alta                         | -7,9          | -9,51           | -16,92          |
| Canal_B_Pachachaca                      | 0,0           | -3,40           | 0,00            |
| Condado_Yuranpata_Curanguyoc            | -5,7          | -9,00           | -14,48          |
| San_Gabriel                             | -12,1         | 0,00            | -15,30          |
| Marcamarca                              | -2,8          | 0,00            | -9,41           |
| Moyocorral_Baja                         | -13,6         | 0,00            | -16,23          |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

La presente investigación busca contribuir al análisis de los impactos del cambio climático y la respuesta adaptativa en la agricultura andina y familiar con presencia de cultivos transitorios y permanentes varios de los cuales son originarios como la papa, quinua y maíz, que se producen tanto en sistemas de secano y de riego vinculada a prácticas agrícolas ancestrales donde el modelamiento hidroeconómico permitió aproximar la dimensión de los impactos del cambio climático y los efectos de la aplicación de una política, donde la microcuenca es altamente vulnerable dado que presenta reducciones en el nivel de ingresos, producción y superficie agrícola. Los resultados obtenidos son consistentes con la literatura existente en lo referido a las actividades bajo riego que enfrentan grandes impactos del cambio climático, mientras que algunas actividades de secano no se ven afectadas como los cultivos de papa, maíz y haba. Estos resultados son relevantes para los tomadores de decisiones para el diseño de medidas de adaptación al cambio climático. Al aplicarse una política de agua, se da resultados positivos a nivel en toda la microcuenca dado que se compensa las pérdidas económicas generadas por el cambio climático. La política está orientada a una mayor eficiencia en el uso del agua en los canales; por tal, se recomienda modelar políticas complementarias e integrales para reducir la vulnerabilidad de los agricultores los cuales tomando en cuenta la conservación de las tierras y los cultivos originarios, así como las buenas prácticas ancestrales. Finalmente, es previsible que la población urbana seguirá incrementándose y con ello la demanda de alimentos produciéndose una modificación del espacio territorial, debido a que los agricultores deben tomar decisiones en función de sus resultados económicos; en ese sentido, la presente investigación provee resultados y una aplicación metodológica que contribuya al diseño de políticas adaptativas frente al cambio climático en la zona andina o sistemas agrícolas con características similares además de reducir la agricultura en condiciones de subsistencia.

#### Referencias

- Alexandra, J. (2017). "Risks, Uncertainty and Climate Confusion in the Murray–Darling Basin Reforms". *Water Economics and Policy*, 3(3), 1650038. <https://doi.org/10.1142/S2382624X16500387>
- ANA. (2014). *Inventario de lagunas y glaciares*. Obtenido de: Autoridad Nacional del Agua (ANA): [http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/inventario\\_de\\_lagunas\\_del\\_peru\\_parte1.pdf](http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/inventario_de_lagunas_del_peru_parte1.pdf)
- Arjoon, D., Mohamed, Y., Goor, Q. & Tilmant, A. (2014). "Hydro-economic risk assessment in the eastern Nile Riverbasin". *Water Resources and Economics*, 8, 16-31. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2014.10.004>
- Arnold, J., Srinivasan, R., Muttiah, R. & Williams, J. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development". *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

- Barrios, E. (2007). "Soil biota, ecosystem services and land productivity". *Ecological Economics*, 64(2), 269-285. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S. & Palutikof, J. (2008). *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra, Suiza: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Bekchanov, M., Sood, A. & Jeuland, M. (2015). *Review of Hydro-Economic Models to Address River Basin Management Problems: Structure, Applications and Research Gaps*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Bekchanov, M., Sood, A., Pinto, A. & Jeuland, M. (2017). "Systematic Review of Water-Economy Modeling Applications". *Water Resources Planning and Management*, 143(8), 0401703. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000793](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000793)
- Blanco, M., Cortignani, R. & Severini, S. (2008). "Evaluating changes in cropping patterns due to the 2003 CAP reform. An ex-post analysis of different PMP approaches considering new activities". Comunicación presentada al *107th EAAE Seminar Modelling of Agricultural and Rural Development Policies*, Sevilla.
- Blanco-Gutiérrez, I., Varela-Ortega, C. & Purkey, D. (2013). "Integrated assessment of policy interventions for promoting sustainable irrigation in semi-arid environments: A hydro-economic modeling approach". *Journal of Environmental Management*, 128, 144-160. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.037>
- Brouwer, R. & Hofkes, M. (2008). "Integrated hydro-economic modelling: Approaches, key issues and future research directions". *Ecological Economics*, 66(1), 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.02.009>
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F. & Tobón, C. (2011). "Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions". *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 20(1), 19-33. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>
- Cai, X. (2008). "Implementation of holistic water resources-economic optimization models for river basin management-reflective experiences". *Environmental Modelling & Software*, 23(1), 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.03.005>
- Cai, X., & Wang, D. (2006). "Calibrating holistic water resources-economic models". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132(6), 414-423. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:6\(414\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:6(414))
- Cai, X., McKinney, D. & Rosegrant, M. (2003). "Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region". *Agricultural Systems*, 76(3), 1043-1066. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00028-8)
- CAN. (2008). *Reconversión Productiva de la Agricultura*. Obtenido de: Programa Seguridad Alimentaria y Desarrollo Regional. Secretaria General de la Comunidad Andina: [http://www.comunidadandina.org/StaticFiles/20116616820libro\\_agricultura.pdf](http://www.comunidadandina.org/StaticFiles/20116616820libro_agricultura.pdf)



- Clay, N. & Zimmerer, K. (2020). "Who is resilient in Africa's Green Revolution? Sustainable intensification and Climate Smart Agriculture in Rwanda". *Land Use Policy*, 97, 104558. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104558>
- Condori, E. (2016). *Evaluación Hidrogeológica de la Microcuenca Mariño – Apurímac*. Obtenido de: Universidad Nacional del Altiplano: <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3225534>
- Cunha, M., Zeferino, J., Simões, N. & Saldarriaga, J. (2016). "Optimal location and sizing of storage units in a drainage system". *Environmental Modelling & Software*, 83, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.05.015>
- D'Agostino, D., Scardigno, A., Lamaddalena, N. & El Chami, D. (2014). "Sensitivity Analysis of Coupled Hydro-Economic Models: Quantifying Climate Change Uncertainty for Decision-Making". *Water Resources Management*, 28, 4303-4318. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0748-2>
- de Haan, S. (2009). *Potato Diversity at Height: Multiple Dimensions of Farmer-driven In-situ Conservation in the Andes*. Obtenido de: Wageningen University: <https://edepot.wur.nl/2715>
- de Haan, S., Núñez, J., Bonierbale, M. & Ghislain, M. (2010). "Multilevel Agrobiodiversity and Conservation of Andean Potatoes in Central Peru". *Mountain Research and Development*, 30(3), 222-231. <http://dx.doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-10-00020.1>
- Dietze, V., Hagemann, N., Jürges, N., Bartke, S. & Fürst, C. (2019). "Farmers consideration of soil ecosystem services in agricultural management - A case study from Saxony, Germany". *Land Use Policy*, 81, 813-824. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.003>
- Dowlatabadi, H. (1995). "Integrated assessment models of climate change: An incomplete overview". *Energy Policy*, 23(4-5), 289-296. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(95\)90155-Z](https://doi.org/10.1016/0301-4215(95)90155-Z)
- Downing, T. (2012). "Views of the frontiers in climate change adaptation economics". *WIREs Climate Change*, 3(2), 161-170. <https://doi.org/10.1002/wcc.157>
- Esteban, E. & Albiac, J. (2012). "El problema de la gestión sostenible de las aguas subterráneas: el caso de los acuíferos de La Mancha, España". *Hydrogeology Journal*, 20, 851-863. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0853-3>
- Esteban, E. & Dinar, A. (2013). "Cooperative Management of Groundwater Resources in the Presence of Environmental Externalities". *Environmental and Resource Economics*, 54, 443-469. <https://doi.org/10.1007/s10640-012-9602-2>
- Esteve, P., Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I. & Downing, T. (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. (2000). *La gestión integrada de la diversidad biológica para la alimentación y agricultura en la FAO*. Obtenido de: FAO - Biodiversidad para la agricultura: <http://www.fao.org/3/i0112s/i0112s.pdf>

- Field, C., Barros, V., Dokken, D.J., Mach, K. & Mastrandrea, M. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Freeze, R., Massmann, J., Smith, L., Sperling, T. & James, B. (1990). "Hydrogeological Decision Analysis: 1. A Framework". *Groundwater*, 28(5), 738-766. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb01989.x>
- Garibaldi, L., Gemmill-Herren, B., D'Annolfo, R., Graeub, B., Cunningham, S. & Breeze, T. (2017). "Farming Approaches for Greater Biodiversity, Livelihoods, and Food Security". *Trends in Ecology & Evolution*, 31(1), 68-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.001>
- Ghadimi, S. & Ketabchi, H. (2019). "Possibility of cooperative management in groundwater resources using an evolutionary hydro-economic simulation-optimization model". *Journal of Hydrology*, 578, 124094. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124094>
- González, J. & Velasco, R. (2008). "Evaluation of the impact of climatic change on the economic value of land in agricultural systems in Chile". *Chilean Journal of Agricultural Research*, 68(1), 56-68. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392008000100006>
- GORE. (2010). *Caracterización ecológica económica de la microcuenca Mariño. Memoria Estudio Zonificación Económica Ecológica Mariño*. Abancay, Perú: Gobierno Regional de Apurímac.
- Gorelick, S. & Zheng, C. (2015). "Global change and the groundwater management challenge". *Water Resources Research*, 51(5), 3031-3051. <https://doi.org/10.1002/2014WR016825>
- Graveline, N., Majone, B., Van Duinen, R. & Ansink, E. (2014). "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>
- Haghighatafshar, S., Yamanee-Nolin, M., Klinting, A., Roldin, M., Gustafsson, L.-G., Aspegren, H. & Jönsson, K. (2019). "Hydroeconomic optimization of mesoscale blue-green stormwater systems at the city level". *Journal of Hydrology*, 578, 124125. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124125>
- Harou, J. & Lund, J. (2008). "Ending groundwater overdraft in hydrologic-economic systems". *Hydrogeology Journal*, 16, 1039-1055. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0300-7>
- Harou, J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D., Medellín-Azuara, J., Lund, J. & Howitt, R. (2009). "Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects". *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 627-643. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>

- Heckelei, T. (2002). *Calibration and estimation of programming models for agricultural supply analysis*. Obtenido de: University of Bonn: [http://www.ilr.uni-bonn.de/agpo/staff/heckelei/heckelei\\_hab.pdf](http://www.ilr.uni-bonn.de/agpo/staff/heckelei/heckelei_hab.pdf)
- Heckelei, T. & Britz, W. (2005). "Models based on positive mathematical programming: State of the art and further extensions". Comunicación presentada en la *89th European Seminar of the EAAE*, Parma.
- Henry de Frahan, B. (2019). "Towards Econometric Mathematical Programming for Policy Analysis". En Msangi, S. & MacEwan, D. (eds): *Applied Methods for Agriculture and Natural Resource Management* (pp. 11-36). Cham, Suiza: Springer Nature Switzerland.
- Howitt, R. (1995). "Positive mathematical-programming". *American Journal of Agricultural Economics*, 77(2), 329-342. <https://doi.org/10.2307/1243543>
- Howitt, R., MacEwan, D., Medellín-Azuara, J. & Lund, J. (2010). *Economic modeling of agriculture and water in California using the statewide agricultural production model*. Obtenido de: University of California: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=58ab30a064c197c67845fb05b5371f8470598846>
- Huang, J., Wang, W., Cui, X., Wang, D., Liu, W., Liu, X. & Wang, S. (2019). "Environmental risk-based hydroeconomic evaluation for alluvial aquifer management in arid river basin". *Science of the Total Environment*, 711, 134655. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134655>
- Hurd, B.H. (2015). "Concepts and methods for assessing economic impacts from climate change on water resources". En Dinar, A. & Schwabe, K. (Eds.): *Handbook of Water Economics* (pp. 56-68). Cheltenham, Reino Unido: Edward Elgar Publishing.
- INEI. (2018). *IV Censo Nacional Agropecuario 2012*. Obtenido de: Instituto Nacional de Estadística e Informática: <http://censos.inei.gob.pe/cenagro/tabulados/>
- 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*. Cambridge, Reino Unido, and New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, Reino Unido, and New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Jenkins, M., Lund, J., Howitt, R., Draper, A., Msangi, S., Tanaka, S., Ritzema, R. & Marques, G. (2004). "Optimization of California's Water Supply System: Results and Insights". *Journal of water resources planning and management*, 130(4), 271-280. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:4\(271\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:4(271))
- Jiang, Q. & Grafton, R. (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>

- Jonkman, S., Bočkarjova, M., Kok, M. & Bernardini, P. (2008). "Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands". *Ecological Economics*, 66(1), 77-90. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.022>
- Joyce, B., Mehta, V., Purkey, D., Dale, L. & Hanemann, M. (2011). "Modifying agricultural water management to adapt to climate change in California's Central valley". *Climatic Change*, 109, 299-316. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0335-y>
- Kahsay, T., Arjoon, D., Kuik, O., Brouwer, R., Tilmant, A. & der Zaag, P. (2019). "A hybrid partial and general equilibrium modeling approach to assess the hydro-economic impacts of large dams – The case of the Grand Ethiopian Renaissance Dam in the Eastern Nile River basin". *Environmental Modelling & Software*, 117, 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.03.007>
- Knowling, M., White, J., McDonald, G., Kim, J.-H., Moore, C. & Hemmings, B. (2020). "Disentangling environmental and economic contributions to hydro-economic model output uncertainty: An example in the context of land-use change impact assessment". *Environmental Modelling and Software*, 127, 104653. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104653>
- McKinney, D., Cai, X., Rosegrant, M., Ringler, C. & Scott, C. (1999). *Modeling water resources management at the basin level: Review and future directions. SWIM Paper No. 6*. Obtenido de: International Water Management Institute (IWMI): [http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/SWIM\\_Papers/PDFs/SWIM06.PDF](http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/SWIM_Papers/PDFs/SWIM06.PDF)
- Medellín-Azuara, J., Howitt, R., MacEwan, D. & Lund, J. (2011). "Economic impacts of climate-related changes to California agriculture". *Climatic Change*, 109, 387-405. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0314-3>
- Meinke, H., Howden, S., Struik, P., Nelson, R., Rodriguez, D. & Chapman, S. (2009). "Adaptation science for agriculture and natural resource management—urgency and theoretical basis". *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1), 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.07.007>
- Mérel, P. & Howitt, R. (2014). "Theory and Application of Positive Mathematical Programming in Agriculture and the Environment". *The Annual Review of Resource Economics*, 6, 451-470. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100913-012447>
- MINAGRI. (2015). *Estrategia Nacional de Agricultura Familiar 2015-2021*". Obtenido de: Ministerio de Agricultura y Riego: <https://www.agrorural.gob.pe/wp-content/uploads/2016/02/enaf.pdf>
- MINAM. (2016). *Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Obtenido de: Ministerio del Ambiente: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/tercera-comunicacion-nacional-peru-convencion-marco-las-naciones>

- Momeni, M., Zakeri, Z., Esfandiari, M., Behzadian, K., Zahedi, S. & Razavi, V. (2019). "Comparative analysis of agricultural water pricing between Azarbaijan Provinces in Iran and the state of California in the US: A hydro-economic approach". *Agricultural Water Management*, 223, 105724. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105724>
- Moraetis, D., Al Kindi, S.S., Al Saadi, S.K., Al Shaibani, A.A.R.A., Pavlopoulos, K., Scharf, A., Mattern, F., Harrower, M.J. & Pracejus, B. (2020). "Terrace agriculture in a mountainous arid environment – A study of soil quality and regolith provenance: Jabal Akhdar (Oman)". *Geoderma*, Volume 363, 114152. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114152>
- Moriondo, M., Bindi, M., Zbigniew, W., Kundzewicz, S. M., Chorynski, A., Matczak, P., Radziejewski, M., McEvoy, D. & Wreford, A. (2010). "Impact and adaptation opportunities for European agriculture in response to climatic change and variability". *Mitigation Adaptation Straetegie Global Change*, 15, 657-679. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9219-0>
- NRC. (1989). *The Lost Crops of the Incas: Little-known Plants of the Andes with Promise for Worldwide Cultivation*. Washington D.C, Estados Unidos: National Academy Press.
- Ossa-Moreno, J., McIntyre, N., Ali, S., Smart, J. & Rivera, D. (2018). "The Hydro-economics of Mining". *Ecological Economics*, 145, 368-379. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.010>
- ONU. (2019). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*". Obtenido de: Organización de Naciones Unidas: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Papagiannis, F., Gazzola, P., Burak, O. & Pokutsa, I. (2018). "Overhauls in water supply systems in Ukraine: A hydro-economic model of socially responsible planning and cost management". *Journal of Cleaner Production*, 183, 358-369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.156>
- Peña-Haro, S., Pulido-Velazquez, M. & Sahuquillo, A. (2009). "A hydro-economic modelling framework for optimal management of groundwater nitrate pollution from agriculture". *Journal of Hydrology*, 373(1-2), 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.024>
- Ponce, R., 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(4), 404-412. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392014000400005>
- Ponce, R., Blanco, M. & Giupponi, C. (2015). "Welfare Effects of Water Variability in Agriculture. Insights from a Multimarket Model". *Water*, 7(6), 2908-2923. <https://doi.org/10.3390/w7062908>
- Ponce, R., Fernández, F., Stehr, A., Vázquez-Lavín, F. & Godoy-Faúnez, 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>

- ProDesarrollo. (2012). *Proyecto de Gestion Integral de la Microcuenca Mariño Abancay - Anexo 1 Estudio Hidrológico. Estudio Definitivo de los Sistemas de Riego, U.E.* Obtenido de: Pro Desarrollo Apurímac: <https://es.scribd.com/document/412895324/Anexo-1-Estudio-Hidrologico#>
- Pulido-Velázquez, M., Andreu, J., Sahuquillo, A. & Pulido-Velázquez, D. (2008). "Hydroeconomic river basin modelling: The application of a holistic surface-groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain". *Ecological Economics*, 66(1), 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.016>
- Ringler, C., Von Braun, J. & Rosegrant, M. (2004). "Water policy analysis for the Mekong River Basin". *Water International*, 29(1), 30-42. <https://doi.org/10.1080/02508060408691746>
- Rochdane, S., Reichert, B., Messouli, M., Babqiqi, A. & Khebiza, M. (2012). "Climate change impacts on water supply and demand in Rheraya Watershed (Morocco), with potential adaptation strategies". *Water*, 4(1), 28-44. <https://doi.org/10.3390/w4010028>
- Roco, L., Engler, A., Bravo-Ureta, B. & Jara-Rojas, R. (2015). "Farmers' perception of climate change in mediterranean Chile". *Regional Environmental Change*, 15, 867-879. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0669-x>
- Rolando, J., Turin, C., Ramírez, D., Mares, V., Moneris, J. & Quiroz, R. (2017). "Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-Andean Puna as affected by land-use and climate changes". *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236, 221-233. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.010>
- Rose, D., Sutherland, W., Barnes, A., Borthwick, F., Ffoulkes, C., Hall, C., Moorby, J., Nicholas-Davis, P., Twining, S. & Dicks, L. (2019). "Integrated farm management for sustainable agriculture: Lessons for knowledge exchange and policy". *Land Use Policy*, 81, 834-842. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.001>
- Spooner, D., McLean, K., Ramsay, G., Waugh, R. & Bryan, G. (2005). "A single domestication for potato based on multilocus amplified fragment length polymorphism genotyping". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(41), 14694-14699. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507400102>
- Spooner, D., Nuñez, J., Trujillo, G., Herrera, M., Guzmán, F. & Ghislain, M. (2007). "Extensive simple sequence repeat genotyping of potato landraces supports a major reevaluation of their gene pool structure and classification". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(49), 19398-19403. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709796104>
- Tahbaz, M. (2016). "Environmental Challenges in Today's Iran". *Iranian Studies*, 49(6), 943-961. <https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1241624>
- Tang, J., Han, Z., Zhong, S., Ci, E. & Wei, C. (2019). "Changes in the profile characteristics of cultivated soils obtained from reconstructed farming plots undergoing agricultural intensification in a hilly mountainous region in southwest China with regard to anthropogenic pedogenesis". *Catena*, 180, 132-145. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.020>



- Tarolli, P. & Straffelini, E. (2020). "Agriculture in Hilly and Mountainous Landscapes: Threats, Monitoring and Sustainable Management". *Geography and Sustainability*, 1(1), 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2020.03.003>
- Torres, M., Maneta, M., Howitt, R., Vosti, S., Wallender, W., Bassoi, L. & Rodrigues, L. (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>
- Tsur, Y., Roe, T., Dinar, A. & Doukkali, M. (2004). *Pricing Irrigation Water: Principles and Cases from Developing Countries*. Washington D.C., Estados Unidos: Resources for the Future.
- Van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. & Rose, S. (2011). "The representative concentration pathways: An overview". *Climatic Change*, 109, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Varela-Ortega, C. (2007). "Policy-driven determinants of irrigation development and environmental sustainability: A case study in Spain". En Molle, F. & Berkoff, J. (Eds.): *Irrigation water pricing policy in context: exploring the gap between theory and practice* (pp. 328-346). Oxfordshire, Reino Unido, Cambridge, Estados Unidos: CAB International.
- Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., Esteve, P., Bharwani, S., Fronzek, S. & Downing, T. (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>
- Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., Swartz, H. & Downing, T. (2011). "Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties: A hydro-economic modeling framework". *Global Environmental Change*, 21(2), 604-619. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.12.001>
- Vavilov, N. (1992). *Origin and Geography of Cultivated Plants*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Ventrella, D., Charfeddine, M., Moriondo, M., Rinaldi, M. & Bindi, M. (2012). "Agronomic adaptation strategies under climate change for winter durum wheat and tomato in southern Italy: Irrigation and nitrogen fertilization". *Regional Environmental Change*, 12, 407-419. <https://doi.org/10.1007/s10113-011-0256-3>
- Volk, M., Hirschfeld, J., Dehhardt, A., Schmidt, G., Bohn, C., Liersch, S. & Gassman, P. (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>
- Weyant, J. (1985). "General economic equilibrium as a unifying concept in energy-economic modeling". *Management Science*, 31(5), 548-563. <https://www.jstor.org/stable/2631775>

- 
- Wheeler, T. & Von Braun, J. (2013). "Climate change impacts on global food security". *Science*, 341(6145), 508-513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>
- Young, R. (2005). *Determining the economic value of water: Concepts and methods*. Washington D.C., Estados Unidos: Resources for the Future.
- Zischg, J., Zeisl, P., Winkler, D., Rauch, W. & Sitzenfrei, R. (2018). "On the sensitivity of geospatial low impact development locations to the centralized sewer network". *Water Science & Technology*, 77(7), 1851-1860. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.060>