

INDICADORES DE EFICIENCIA HÍDRICA Y ENERGÉTICA PARA LA AGRICULTURA DE REGADÍO CHILENA

WATER AND ENERGY EFFICIENCY INDICATORS FOR CHILEAN IRRIGATED AGRICULTURE

José Henrique Nunes Flores¹, Nicolas F. Albornoz Muñoz², Bastián M. Escobar Olivares²

ABSTRACT

This study presents and analyzes key performance indicators for evaluating water and energy efficiency in irrigation systems, with a focus on the Chilean agricultural context. Metrics such as water use efficiency, water productivity, and energy efficiency are highlighted as essential for efficient resource management. The study also explores sustainable technologies, such as pressurized irrigation systems, to optimize water and energy use in agriculture. Additionally, it suggests adapting these indicators to Chile's specific conditions to improve monitoring and resource consumption management, aligning agricultural practices with global sustainability goals. The research emphasizes the importance of integrating energy considerations into irrigation strategies and measuring water use relative to agricultural output. The findings provide a valuable framework for policy development and technological advancements that balance agricultural productivity with environmental responsibility. The study also identifies opportunities to enhance resource conservation, particularly in regions facing water scarcity. In summary, this research lays the foundation for future studies and initiatives aimed at improving the sustainability and resilience of Chilean agriculture, promoting more efficient and adaptive agricultural practices.

Key-Words: Irrigation efficiency; Water productivity; Irrigation systems.

RESUMEN

Este estudio presenta y analiza indicadores clave de desempeño para evaluar la eficiencia hídrica y energética en sistemas de riego, con énfasis en el contexto agrícola chileno. Se destacan métricas como la eficiencia en el uso del agua, la productividad hídrica y la eficiencia energética, fundamentales para la gestión eficiente de los recursos. Además, el estudio explora tecnologías sostenibles, como los sistemas de riego presurizado, para optimizar el uso del agua y la energía en la agricultura. La investigación también sugiere la adaptación de estos indicadores a las condiciones específicas de Chile, con el objetivo de mejorar el monitoreo y la gestión del consumo de recursos, alineando las prácticas agrícolas con los objetivos globales de sostenibilidad. Se resalta la importancia de integrar consideraciones energéticas en las estrategias de riego y de medir el uso del agua en relación con la producción agrícola. Los resultados ofrecen un marco valioso para el desarrollo de políticas públicas y el avance de tecnologías que equilibren la productividad agrícola con la responsabilidad ambiental. La investigación también propone oportunidades para mejorar la conservación de recursos, especialmente en regiones afectadas por la escasez de agua. En resumen, el estudio proporciona una base para futuras investigaciones e iniciativas orientadas a la sostenibilidad y resiliencia de la agricultura chilena, promoviendo prácticas agrícolas más eficientes y adaptativas.

Palabras clave: Eficiencia de riego; Productividad del agua; Sistemas de riego.

¹ Doctor en Recursos Hídricos, Académico de la Escuela de Ciencias Agrícolas y Veterinarias - Universidad Viña del Mar. Autor correspondiente: jose.nunes@uvm.cl; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-5229>; Financiado por Fondos de Investigación 2023 de la Universidad Viña del Mar.

²Estudiante de Agronomía - Escuela de Ciencias Agrícolas y Veterinarias - Universidad Viña del Mar

* Proyecto Financiado por Fondos de Investigación 2023 de la Universidad Viña del Mar (FIIUVM-CTC-2305).

1. INTRODUCCIÓN

Chile enfrenta importantes desafíos debido al cambio climático, particularmente en lo que respecta a la disponibilidad y calidad de sus recursos hídricos y energéticos. La marcada disminución de las precipitaciones, especialmente en las regiones central y norte, ha provocado una grave escasez de agua y sequías prolongadas (Garreaud et al., 2017; Martínez-Retureta et al., 2021; Taucaré et al., 2023), mientras que el aumento de las temperaturas acelera el retroceso de los glaciares, poniendo en riesgo el suministro de agua dulce (Cereceda-Balic et al., 2020). Estas presiones climáticas, combinadas con una creciente demanda por los recursos hídricos (Álamos et al., 2024; Jódar et al., 2023) subrayan la urgente necesidad de estrategias innovadoras para la gestión de recursos. Entre estas estrategias, la implementación de indicadores de eficiencia hídrica y energética surge como una solución clave para monitorear el uso de recursos y fomentar la sostenibilidad (Amin et al., 2023; Villamar-Ayala et al., 2018).

Más allá de abordar los desafíos relacionados con el agua, Chile también debe enfrentar el doble objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la eficiencia energética, particularmente en los sistemas de producción agrícola. Indicadores clave, como el consumo energético por unidad de producto y la proporción de energía renovable utilizada, resultan fundamentales para mejorar la sostenibilidad y mitigar los impactos del cambio climático (Cimmino y Vicidomini, 2024). Según el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026 (Ministerio de Energía de Chile, 2021), incorporar estos indicadores en las prácticas de producción es vital no solo para la preservación ambiental, sino también para el crecimiento económico mediante la optimización de recursos.

El sector agrícola desempeña un papel crucial en este contexto, ya que consume aproximadamente el 82% de la extracción total de agua consuntiva de Chile (Donoso, 2021). Esta alta dependencia del agua se ve agravada por las significativas demandas energéticas, especialmente en los sistemas de riego que operan con motores eléctricos y bombas (Maximov et al., 2019). Aunque la adopción de tecnologías de riego presurizado ha mejorado la eficiencia en el uso del agua, también ha incrementado el consumo energético, particularmente en zonas rurales con acceso limitado a fuentes de energía renovable (Jordan et

al., 2021; Ahmad y Khan, 2016). Este doble desafío de gestionar recursos hídricos y energéticos resalta la necesidad de soluciones integradas que se alineen con las características específicas de la agricultura chilena.

La eficiencia en los sistemas de riego refleja un equilibrio entre el uso de recursos y los resultados obtenidos, donde una mayor eficiencia implica una productividad optimizada con mínimos insumos. En la gestión del agua, la eficiencia se mide por la proporción de agua utilizada efectivamente por los cultivos en comparación con el agua total disponible (Torun y Çakmak, 2024). Por su parte, la eficiencia energética evalúa el rendimiento de los sistemas de bombeo mediante la comparación entre la energía hidráulica generada y la energía consumida (Belaud et al., 2019). Abordar ambas dimensiones es crucial para mejorar la productividad y mitigar los impactos ambientales (Ahmad y Khan, 2016).

La transición de redes tradicionales de canales abiertos a sistemas de riego presurizado ha aumentado significativamente la eficiencia en el uso del agua, reduciendo las pérdidas por evaporación y escorrentía (Abadía et al., 2008; García et al., 2014). En Chile, estos sistemas han mejorado la eficiencia en un 85% para los sistemas de aspersión y hasta un 298% para los sistemas de riego por goteo (Donoso, 2021). Sin embargo, esta transición también ha elevado las demandas energéticas, especialmente en regiones donde la electricidad proviene predominantemente de fuentes no renovables (Marsh et al., 2007; Chang et al., 2022). Este compromiso entre eficiencia hídrica y energética requiere innovaciones que equilibren ambas dimensiones y fomenten la integración de energías renovables.

Numerosos estudios han explorado métodos para mejorar el desempeño de los sistemas de riego, centrándose en indicadores de eficiencia hídrica y energética (Calejo et al., 2008; Abadía et al., 2008; Moreno et al., 2010; Rodríguez-Díaz et al., 2012; Puerto et al., 2021). Este estudio se basa en tales investigaciones al realizar una revisión de indicadores de eficiencia hídrica y energética adaptados al contexto chileno. Considerando las características específicas de las explotaciones agrícolas en Chile, incluidas la escala operativa y las condiciones ambientales, esta investigación selecciona y adapta métricas clave que resultan aplicables y relevantes. Los indicadores presentados representan una síntesis de los identificados en la literatura, proporcionando un

marco práctico para evaluar el desempeño de los sistemas de riego a nivel predial en Chile.

Esta investigación contribuye a la creciente necesidad de gestión sostenible de recursos al ofrecer herramientas que orienten a los responsables de políticas y actores clave en el equilibrio del uso de agua y energía. Aborda los desafíos críticos planteados por el cambio climático y la intensificación agrícola, apoyando el desarrollo de prácticas agrícolas resilientes y eficientes en Chile. Para ello, el artículo se organiza en las siguientes secciones: primero, se describe el marco teórico (introducción) y metodológico (materiales y métodos) utilizado en el estudio; posteriormente, se presentan y analizan los resultados obtenidos; y, finalmente, se discuten las implicaciones de los hallazgos, junto con las conclusiones y posibles líneas de investigación futura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Revisión de literatura y recopilación de datos

La revisión de literatura tiene como objetivo identificar indicadores de eficiencia hídrica y energética en sistemas de riego a nivel predial, con un enfoque en las prácticas agrícolas de Chile. Se consultaron bases de datos en línea de alto impacto, como Web of Science, Scopus, ScienceDirect y SciELO, en busca de estudios académicos revisados por pares. El proceso de revisión siguió un procedimiento de selección en tres etapas: primero se realizó una preselección basada en el título y el resumen de los artículos; luego, se llevó a cabo una revisión del texto completo para confirmar su relevancia; finalmente, los estudios seleccionados fueron sometidos a extracción sistemática de datos para su posterior análisis. La extracción de datos se realizó de forma manual, organizando la información relevante en tablas. Los indicadores seleccionados se categorizaron y anotaron en función de su relación con la eficiencia hídrica y energética.

Los criterios de inclusión priorizaron estudios que presentaran datos cuantitativos o cualitativos sobre la eficiencia hídrica y/o energética en sistemas de riego agrícola. Se excluyeron documentos de conferencias, informes de trabajo y publicaciones no revisadas por pares para garantizar el rigor científico. También se omitieron los artículos no disponibles en formato digital. Las palabras clave utilizadas en las búsquedas incluyeron

"indicadores", "unidades de bombeo", "riego" y "evaluación energética", junto con sus equivalentes en inglés ("*index*", "*pumping unit*" y/o "*pumping station*", "*irrigation*", "*energy assessment*"). No se aplicaron restricciones temporales, lo que permitió incluir tanto estudios fundamentales como recientes para proporcionar una perspectiva integral.

2.2. Clasificación y análisis de variables

Las variables requeridas para el cálculo de los indicadores se clasificaron en variables básicas y derivadas, asegurando un enfoque sistemático para la organización y análisis de datos.

Variables Básicas son las obtenidas directamente mediante observación, medición o documentación en el sitio de estudio. Proveen información fundamental para los análisis posteriores.

Variables Básicas Simples son las derivadas de información fácilmente accesible o mediciones básicas.

Variables Básicas Complejas requieren equipos especializados o herramientas avanzadas para su recopilación, a menudo implicando experiencia técnica.

Variables Básicas Externas son los datos contextuales obtenidos de bases de datos regionales o externas, como instituciones gubernamentales o meteorológicas.

Variables Derivadas son las calculadas a partir de variables básicas para proporcionar una comprensión más profunda del desempeño del sistema.

Esta clasificación facilita un enfoque estructurado para la recopilación de datos y asegura una categorización integral de las variables necesarias para el cálculo de los indicadores.

2.3. Adaptación de los indicadores al contexto chileno

Los indicadores seleccionados fueron filtrados y refinados para ajustarse a las condiciones específicas de las explotaciones agrícolas en Chile. Este proceso incluyó una evaluación detallada de la disponibilidad de datos relevantes en el contexto chileno, considerando las limitaciones de información sobre eficiencia hídrica y energética en

los sistemas de riego agrícolas del país. Además, se tuvo en cuenta la capacidad tecnológica de los sistemas de riego existentes, las condiciones ambientales locales, y la escala operativa de las prácticas agrícolas.

Para garantizar que los indicadores fueran relevantes y aplicables, se realizaron comparaciones con estudios internacionales y se evaluó su compatibilidad con las características y necesidades del sector agrícola chileno. Esta adaptación se basa en una revisión de las fuentes locales de información, con el objetivo de asegurar que los indicadores sean prácticos para mejorar la gestión hídrica y energética en el sector.

El proceso completo de adaptación de los indicadores al contexto chileno se presenta a continuación:

- 1) **Revisión Bibliográfica y Extracción de los Indicadores:** Inicialmente, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de los artículos seleccionados, a partir de la cual se extrajeron los indicadores relevantes de cada estudio. Estos indicadores fueron organizados y almacenados en una base de datos de indicadores.
- 2) **Desagregación de los Indicadores en Variables:** Cada indicador extraído fue desagregado en sus variables constituyentes. Las variables fueron identificadas y registradas en la base de datos de variables.
- 3) **Análisis de las Variables:** Para cada variable extraída de la base de datos, se realizó la verificación de su naturaleza.

3.1) ¿La variable es básica?

Si la variable era básica, es decir, no se podía desagregar, se mantuvo en la base de datos de variables, lista para ser utilizada en el estudio. Si la variable era derivada, es decir, estaba formada por otras variables, se desagregó nuevamente en variables básicas. Estas variables básicas fueron luego dirigidas a la base de datos de variables. Este proceso se repitió hasta no quedar ninguna variable derivada en la base de datos.

3.2) ¿Esta variable puede obtenerse en

Chile?

Si la variable estaba disponible en Chile, se mantuvo en la base de datos de variables y se consideró para los indicadores. Si la variable no estaba disponible en Chile, se realizó una nueva pregunta:

3.3) ¿Puede esta variable ser sustituida por otra sin comprometer el objetivo del indicador?

Si la respuesta era afirmativa, la variable fue sustituida por una alternativa que podía obtenerse en Chile y se dirigió a la base de datos de variables. Si la respuesta era negativa, el indicador que contenía esta variable fue descartado, ya que no podía ser utilizado en el estudio debido a la no disponibilidad de la variable o la imposibilidad de sustitución.

- 4) **Evaluación Final de las Variables:** El proceso se repitió para todas las variables asociadas a los indicadores. Al final de todo el proceso, los indicadores que mantenían variables disponibles en Chile o que habían sido sustituidas por alternativas adecuadas fueron considerados para el análisis final. Aquellos indicadores cuyas variables no podían obtenerse o ser sustituidas fueron descartados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Variables básicas

Las variables básicas (Tabla 1) son fundamentales para analizar la eficiencia hídrica y energética en los sistemas de riego. Estas se clasifican en tres categorías: simples, complejas y externas, según el método de adquisición y el nivel de complejidad involucrado.

Las variables simples, como las áreas cultivadas y regadas, proporcionan datos esenciales sobre la operación básica del sistema. Por otro lado, las variables complejas, como la potencia eléctrica activa y el caudal bombeado, son necesarias para evaluar el consumo energético y la eficiencia del sistema de riego. Finalmente, las variables externas, como la evapotranspiración de referencia y la precipitación efectiva, contribuyen a una comprensión más integral del entorno y de las condiciones que influyen en la demanda hídrica de los cultivos. En conjunto, estas variables permiten

una evaluación detallada de la eficiencia del sistema de riego, integrando tanto los aspectos operativos como las condiciones ambientales que afectan su desempeño.

El área cultivada (A) y el área regada (AI) se refieren, respectivamente, a la superficie total destinada a la agricultura y la porción de esta que recibe riego. Estos parámetros son esenciales para calcular la eficiencia del riego y del suministro hídrico, ya que establecen una línea base para evaluar el uso del agua (Córcoles et al., 2015).

La carga dinámica total (H) mide la energía necesaria para mover el agua a través del sistema

de riego, mientras que el riego reportado (IR) indica el agua aplicada a los cultivos según el agricultor, un dato crucial para comprender las prácticas de aplicación hídrica (Moradi et al., 2015). La duración de la temporada de riego (ISL) representa el periodo en que se realiza el riego, y la potencia instalada (PI) se refiere a la capacidad nominal del motor del sistema de riego, ambos aspectos fundamentales para evaluar la capacidad operativa del sistema (Basediya et al., 2018). La masa total anual de la producción agrícola (TP) ofrece información clave sobre el rendimiento de los cultivos, necesaria para analizar la productividad y la eficiencia global del sistema (Caldera & Breyer, 2019).

Tabla 1. Variables básicas.

Variable	Símbolo	Método de obtención	Clasificación
Área cultivada	A	Reportada por el agricultor o medida mediante imágenes satelitales	Simple
Área regada	AI	Reportada por el agricultor o medida mediante imágenes satelitales	Simple
Carga dinámica total	H	Medida en campo mediante un manómetro	Simple
Riego reportado	IR	Reportado por el agricultor	Simple
Duración de la temporada de riego	ISL	Reportada por el agricultor	Simple
Potencia instalada	PI	Extraída de la placa del motor	Simple
Masa total anual de producción agrícola	TP	Reportada por el agricultor	Simple
Potencia eléctrica activa	AEP	Medida en campo con un analizador de calidad de energía	Compleja
Caudal bombeado	QP	Medido en campo mediante un caudalímetro	Compleja
Evapotranspiración de referencia	ET0	Datos de estaciones meteorológicas	Externa
Coefficiente del cultivo	kC	Estimado con base en la literatura	Externa
Precipitación efectiva	PE	Datos de estaciones meteorológicas	Externa
Caudal disponible	QD	Documentación del predio	Externa

Las variables complejas, como la potencia eléctrica activa (AEP) y el caudal bombeado (QP), son fundamentales para evaluar la eficiencia energética de los sistemas agrícolas, ya que miden, respectivamente, la energía consumida por el sistema y el volumen de agua suministrado por la bomba (Monteiro et al., 2021). Cabe destacar que AEP y QP son las variables más complejas debido a la necesidad de equipos específicos para su medición. La Comisión Nacional de Riego (CNR) ha solicitado a los agricultores la incorporación de caudalímetros para registrar el volumen total de

agua utilizado anualmente, lo que facilitaría la obtención de QP. Por otro lado, AEP puede determinarse mediante auditorías energéticas que empleen analizadores de calidad de energía. Actualmente, se están desarrollando investigaciones sobre metodologías alternativas para calcular AEP, lo que podría simplificar significativamente su obtención en el futuro. Las variables externas, como la evapotranspiración de referencia (ET0), derivadas de datos meteorológicos, representan la pérdida potencial de agua por evapotranspiración, mientras que el coeficiente del cultivo (kC) ajusta esta tasa a las necesidades específicas de los cultivos (Canales-Ide et

al., 2019). La precipitación efectiva (PE) registra la fracción de la lluvia que contribuye directamente a las necesidades hídricas de los cultivos, y el caudal disponible (QD) refleja los derechos de agua o la oferta hídrica disponible para el riego, aspectos fundamentales para una gestión hídrica eficiente (Elnemr, 2011).

3.2. Variables derivadas

Las variables derivadas, presentadas en la Tabla

Tabla 2. Variables derivadas..

#Eq.	Indicador	Símbolo	Ecuación	Unidad
1	Evapotranspiración del cultivo	ETC	$ETC = ET_0 \cdot kC$	mm
2	Volumen total disponible	TAV	$TAV = QD \cdot ISL$	m ³
3	Suministro total de agua	TWS	$TWS = \left(\sum IR + \sum PE \right)$	mm
4	Potencia hidráulica	PH	$PH = \rho \cdot g \cdot H \cdot QP$	kW

ρ es la densidad del agua ($\rho \approx 1 \text{ g cm}^{-3}$); g es la aceleración de la gravedad ($g \approx 9,81 \text{ m s}^{-2}$).

El volumen total disponible (TAV) y el suministro total de agua (TWS) representan, respectivamente, los recursos hídricos totales accesibles para riego y el agua efectivamente entregada. Estos indicadores son fundamentales para evaluar la disponibilidad y distribución del agua, facilitando una planificación y gestión más eficientes de los recursos de riego. Comprender el TAV y el TWS es especialmente relevante en regiones donde la escasez de agua constituye un desafío para la producción agrícola (Mohammed & Tefera, 2017).

La potencia hidráulica (PH), derivada del flujo bombeado (QP) y la altura dinámica total (H), refleja la energía necesaria para movilizar el agua a través del sistema de riego. Esta variable mide el uso energético del sistema en relación con su capacidad hidráulica y desempeña un papel clave en la evaluación de la eficiencia energética. El monitoreo de PH puede ayudar a identificar oportunidades para reducir el consumo energético y mejorar la sostenibilidad de las prácticas de riego (Flores et al., 2010). En conjunto, estas variables derivadas ofrecen un marco integral para evaluar la eficiencia general de las prácticas de riego y su alineación con los objetivos de uso sostenible de agua y energía. Proporcionan información detallada sobre la demanda hídrica, la disponibilidad de recursos y el consumo energético, empoderando a los actores

2, ofrecen información crítica sobre la eficiencia y el uso de recursos en los sistemas de riego. La evapotranspiración del cultivo (ETc) se calcula combinando la evapotranspiración de referencia (ET₀) con el coeficiente del cultivo (kC), proporcionando una estimación fiable de la demanda hídrica real de los cultivos. Este indicador es esencial para una gestión eficaz del riego, garantizando que los cultivos reciban el agua necesaria para optimizar su crecimiento y rendimiento (Han et al., 2011).

involucrados para tomar decisiones fundamentadas sobre la gestión del riego y la asignación de recursos, contribuyendo, en última instancia, a prácticas agrícolas más sostenibles (Puy et al., 2021).

3.3. Indicadores de eficiencia hídrica y energética

El análisis de variables básicas y derivadas sienta las bases para comprender la dinámica del uso de agua y energía en los sistemas de riego. Estas variables abarcan aspectos críticos como la disponibilidad de agua, las demandas del cultivo y los requerimientos energéticos para el bombeo y la distribución. Sobre esta base, los indicadores de desempeño (Tabla 3) sintetizan esta información en métricas accionables que permiten evaluar la efectividad global de los sistemas de riego, destacando oportunidades para mejorar la eficiencia hídrica y energética.

La Cantidad de Agua de Riego por Unidad de Área Irrigada (AIWIA) cuantifica el agua de riego aplicada por hectárea, siendo una medida crítica para evaluar si las prácticas de riego cumplen con los requerimientos de los cultivos (Ye et al., 2019). La Cantidad de Agua por Unidad de Área Irrigada (AWIA) considera todas las fuentes de agua (riego y

lluvia), proporcionando información sobre la disponibilidad general de agua (Erguler, 2024). En la literatura se encuentran valores entre 3 y 33909 mil $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ anuales para AIWIA (Çifçi y Değirmenci, 2022; Gençoğlu y Değirmenci, 2019; Torun y Çakmak, 2024) y 15 y 8688 mil $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ anuales para AIWIA (Çifçi y Değirmenci, 2022; Torun y Çakmak, 2024).

El Suministro Relativo de Riego (RIS) es un indicador que evalúa la relación entre el agua de riego aplicada y los requerimientos netos de los cultivos (calculados como la evapotranspiración menos la precipitación efectiva). Este índice proporciona una medida de la suficiencia del riego (Singh & Singh, 2021). Un valor de RIS igual a 1 indica que el suministro de agua coincide exactamente con las necesidades del cultivo. Valores menores a 1 reflejan un déficit hídrico, mientras que valores mayores a 1 indican un suministro excedente de agua (Torun y Çakmak, 2024).

Estudios realizados en Turquía han reportado valores de RIS que varían entre 0.29 y 6.7, dependiendo del cultivo y la región (Cengiz y Uçar, 2021; Çifçi y Değirmenci, 2022; Değirmenci et al., 2003; Taş y Kızıloğlu, 2022; Torun y Çakmak, 2024). En España, Parra et al. (2020) reportaron valores de RIS entre 0.1 y 2 para cultivos de cítricos. Según Torun y Çakmak (2024), valores inferiores a 1 son comunes en áreas con cultivos de alta demanda hídrica y bajo condiciones de sequía. Sin embargo, Parra et al. (2020) señalan que es esperable encontrar valores levemente superiores a 1 en sistemas de riego, mientras que valores menores a 1 son característicos de estrategias de riego deficitario.

De manera similar al RIS, el Suministro Relativo de Agua (RWS) amplía esta perspectiva al incluir todas las fuentes de agua, lo que es crucial para la gestión sostenible del recurso hídrico (Haile et al., 2019). De acuerdo con Parra et al. (2020) valores de RWS iguales o superiores a 1 significan que el cultivo está recibiendo suficiente agua, o incluso más de la requerida, de todas las fuentes para satisfacer la evapotranspiración del cultivo, y por lo tanto, no se esperan reducciones en el rendimiento, y se prevé que el cultivo alcance su máximo potencial productivo. Los mismos autores aún informan que valores por debajo de 1 indican que los huertos están recibiendo menos agua de la necesaria, y se pueden esperar algunas reducciones en el

rendimiento. Para cítricos en España, se encontrarán valores de RWS entre 0 y 1.5 (Parra et al., 2020).

Las métricas de eficiencia, como la Eficiencia del Uso del Agua en los Cultivos (WUEC), evalúan cuán efectivamente se utiliza el agua en la producción de cultivos al comparar la evapotranspiración de los cultivos con el total de agua suministrada, ofreciendo pautas para optimizar las prácticas de riego (Awulachew & Ayana, 2011).

En cuanto a la energía, la Energía Consumida por Unidad de Área Irrigada (ECA) mide la intensidad energética, mientras que la Eficiencia Energética de Bombeo (PEE) evalúa la conversión de la energía eléctrica en potencia hidráulica, ayudando a identificar ineficiencias en el proceso de bombeo (Trout & Manning, 2019; Timon et al., 2015). El Consumo Energético Específico (SEC) rastrea la energía utilizada por metro cúbico de agua bombeada, proporcionando información sobre la eficiencia energética en relación con la entrega de agua, mientras que el Requerimiento Energético Unitario (EU) detalla la demanda de energía al relacionar la energía necesaria para elevar el agua por unidad de altura (Nikoládu et al., 2019; Abdelraouf et al., 2020).

La Capacidad de Suministro de Agua (WSC) compara los requerimientos de agua de los cultivos con el agua total disponible, asegurando que la gestión del agua esté alineada con las demandas de los cultivos (Xie et al., 2020).

La Capacidad Energética (EC) refleja la eficiencia energética del sistema al considerar la potencia hidráulica, la eficiencia de las bombas y la potencia instalada, contribuyendo a las prácticas sostenibles de riego (Sitterson et al., 2023). Estos indicadores no tienen rangos predefinidos en la literatura, pero serían valores próximos a 1 e indicarían que el predio, o el agricultor, ocupa su área, riego, agua y la energía en su totalidad.

Indicadores de productividad, como la Productividad del Agua (WP) y la Productividad Hídrica del Cultivo (WPC), vinculan el rendimiento de los cultivos con el uso del agua, siendo el segundo un indicador específico de la evapotranspiración, lo que resalta la eficiencia en el uso del agua para la producción de cultivos (Karaman et al., 2012; Ambomsa et al., 2020). Finalmente, la Productividad del Agua de Riego (WPI) mide el rendimiento por unidad de agua

de riego aplicada, destacando la efectividad del riego en el aumento de la productividad agrícola (Mushab & Almasraf, 2019).

Es importante señalar que WUEC, WP, WPC y WPI son comúnmente confundidos entre sí. La nomenclatura utilizada en este caso se basa en lo descrito por Fernández et al. (2020), quienes realizaron un estudio evaluando diferentes índices.

En este sentido, no se presentarán valores estándar, ya que estos índices dependen en gran medida del cultivo. La Figura 1 muestra la interrelación entre las variables empleadas para construir los indicadores de eficiencia hídrica y energética, clasificándolas en básicas y derivadas. Además, se detalla la complejidad de cada variable, categorizándolas como simples, complejas o externas, y su relación con los indicadores analizados.

Tabla 4. Indicadores.

#Eq.	Indicador	Símbolo	Ecuación	Unidad
5	Cantidad de agua de riego por unidad de área irrigada	AIWIA	$AIWIA = \frac{\sum IR \cdot AI}{AI}$	m ³ ha ⁻¹
6	Cantidad de agua por unidad de área irrigada	AWIA	$AWIA = \frac{TWS \cdot AI}{AI}$	m ³ ha ⁻¹
7	Suministro relativo de riego	RIS	$RIS = \frac{\sum IR}{\sum ETC - \sum PE}$	mm mm ⁻¹
8	Suministro relativo de agua	RWS	$RWS = \frac{TWS}{\sum ETC}$	mm mm ⁻¹
9	Eficiencia de uso del agua en cultivos	WUEC	$WUEC = \frac{\sum ETC}{TWS}$	mm mm ⁻¹
10	Energía consumida por unidad de área irrigada	ECA	$ECA = \frac{AEP}{AI}$	kWh ha ⁻¹
11	Eficiencia energética de bombeo	PEE	$PEE = \frac{PH}{AEP}$	kW kW ⁻¹ = %
12	Consumo energético específico	SEC	$SEC = \frac{AEP}{QP}$	kWh m ⁻³
13	Requerimiento energético unitario	EU	$EU = \frac{\rho \cdot g}{PEE}$	kWh m ⁻³ m ⁻¹
14	Capacidad de área	AC	$AC = \frac{AI}{A}$	ha ha ⁻¹
15	Capacidad de riego	IC	$IC = \frac{\sum IR \cdot AI}{TAV}$	m ³ m ⁻³
16	Capacidad de suministro de agua	WSC	$WSC = \frac{(\sum ETC - \sum PE) \cdot AI}{TAV}$	m ³ m ⁻³
17	Capacidad energética	EC	$EC = \frac{PH}{PEE} \cdot \frac{1}{PI}$	kW kW ⁻¹
18	Productividad del agua	WP	$WP = \frac{TP}{TWS \cdot AI}$	kg m ⁻³
19	Productividad hídrica del cultivo	WPC	$WPC = \frac{TP}{\sum ETC \cdot AI}$	kg m ⁻³
20	Productividad del agua de riego	WPI	$WPI = \frac{TP}{\sum IR \cdot AI}$	kg m ⁻³

p es la densidad del agua ($\rho \approx 1 \text{ g cm}^{-3}$); g es la aceleración de la gravedad ($g \approx 9,81 \text{ m s}^{-2}$).

En total, para los 16 indicadores presentados (Columna 3 de la Figura 1), se utilizaron 13

variables básicas (Columna 1). Algunas de estas variables fueron aplicadas directamente en los

indicadores, mientras que otras se utilizaron para derivar nuevas variables (Columna 2). Las variables básicas se usaron 56 veces en total, de las cuales la mitad correspondió a variables simples (28), seguidas por variables externas (18) y complejas (10).

Entre las variables básicas más utilizadas destaca AI, que fue empleada 9 veces, siempre de forma directa, impactando en 9 indicadores. También resalta IR, que se utilizó 8 veces: 4 directamente y 4 como parte de la variable derivada TWS. En contraste, las variables básicas menos empleadas son A y PI, cada una usada una sola vez de manera directa, contribuyendo a 2 indicadores en total.

En la columna central, se observa un equilibrio entre el uso directo de las variables básicas y su empleo en la generación de variables derivadas. De las 56 aplicaciones de variables básicas, 26 fueron directas en los indicadores, mientras que 30 se usaron para crear variables derivadas. Sin embargo, estas 30 contribuciones de variables básicas se reducen a 15 cuando las variables derivadas se integran en los indicadores, ya que cada derivada combina dos variables básicas. Por ejemplo, ETC se usó directamente en 5 indicadores, TWS en 4, y TAV en 2.

Cabe señalar que PH aparece como utilizada 4 veces en la construcción de indicadores, aunque en realidad contribuyó a 3 indicadores. Esto se explica porque EC emplea tanto PH como PEE. Sin embargo, PEE, a su vez, se genera a partir de PH, aunque no es considerada una variable derivada, sino un indicador. Por tanto, EC debe interpretarse como un indicador que utiliza PH en dos ocasiones. De manera similar, EU depende exclusivamente de PEE, lo que significa que EU se construye únicamente a partir de otro indicador, sin incorporar variables básicas ni derivadas directamente.

Ninguna de las variables derivadas está compuesta exclusivamente por variables básicas simples. Por ejemplo, TAV y TWS combinan una variable básica simple con una externa, PH incluye una básica simple y una compleja, mientras que ETC se construye exclusivamente con variables externas.

Por último, los indicadores AIWIA y AC son los únicos creados únicamente con variables básicas simples. Todos los demás indicadores incluyen variables básicas complejas, externas o derivadas en su construcción.

Los indicadores ECA, PEE, SEC, EU y EC dependen directamente de la variable AEP, lo que los convierte en indicadores de difícil obtención debido a la necesidad de equipos especializados, como analizadores de calidad de energía, para medir esta variable. Actualmente, se están llevando a cabo estudios que buscan alternativas para calcular estos indicadores de manera indirecta, utilizando métodos más accesibles. Entre estas alternativas se destaca el uso de modelaje matemático basado en variables simples, como los datos eléctricos del conjunto motobomba, lo que podría simplificar significativamente su obtención y fomentar su aplicación en sistemas agrícolas de diversa escala (Flores, 2022).

En este contexto, los indicadores directamente relacionados a energía aún son un desafío significativo en la implementación práctica de estos indicadores en proyectos reales, especialmente en contextos donde el acceso a equipos específicos es limitado. Otro aspecto importante es que, en este estudio, no se consideraron indicadores económicos, ya que el enfoque fue la creación de indicadores simples, con la intención de ser aplicados por entes gubernamentales y facilitar el análisis y la gestión a gran escala.

Los indicadores propuestos en este estudio tienen un gran potencial para ser incorporados en políticas públicas, especialmente en proyectos de riego financiados por la CNR. Considerando la posibilidad de la modelización matemática a nivel de proyecto, estos indicadores podrían ser utilizados como herramientas preliminares para evaluar la viabilidad de los proyectos. Indicadores como AIWIA, AWIA, RIS y RWS proporcionan medidas clave sobre el volumen de agua necesario para el riego, mientras que los indicadores WUEC, WP, WPC y WPI indican la eficiencia en el uso del agua. Por su parte, los indicadores AC, IC, WSC y EC ayudan a evaluar la eficiencia en el uso de los recursos (suelo, agua y energía). Finalmente, indicadores como ECA, PEE, SEC, EU y AC podrían ser utilizados como apoyo para cumplir con los objetivos de neutralidad de carbono en el sector agrícola, promoviendo prácticas más sostenibles y alineadas con los requerimientos medioambientales.

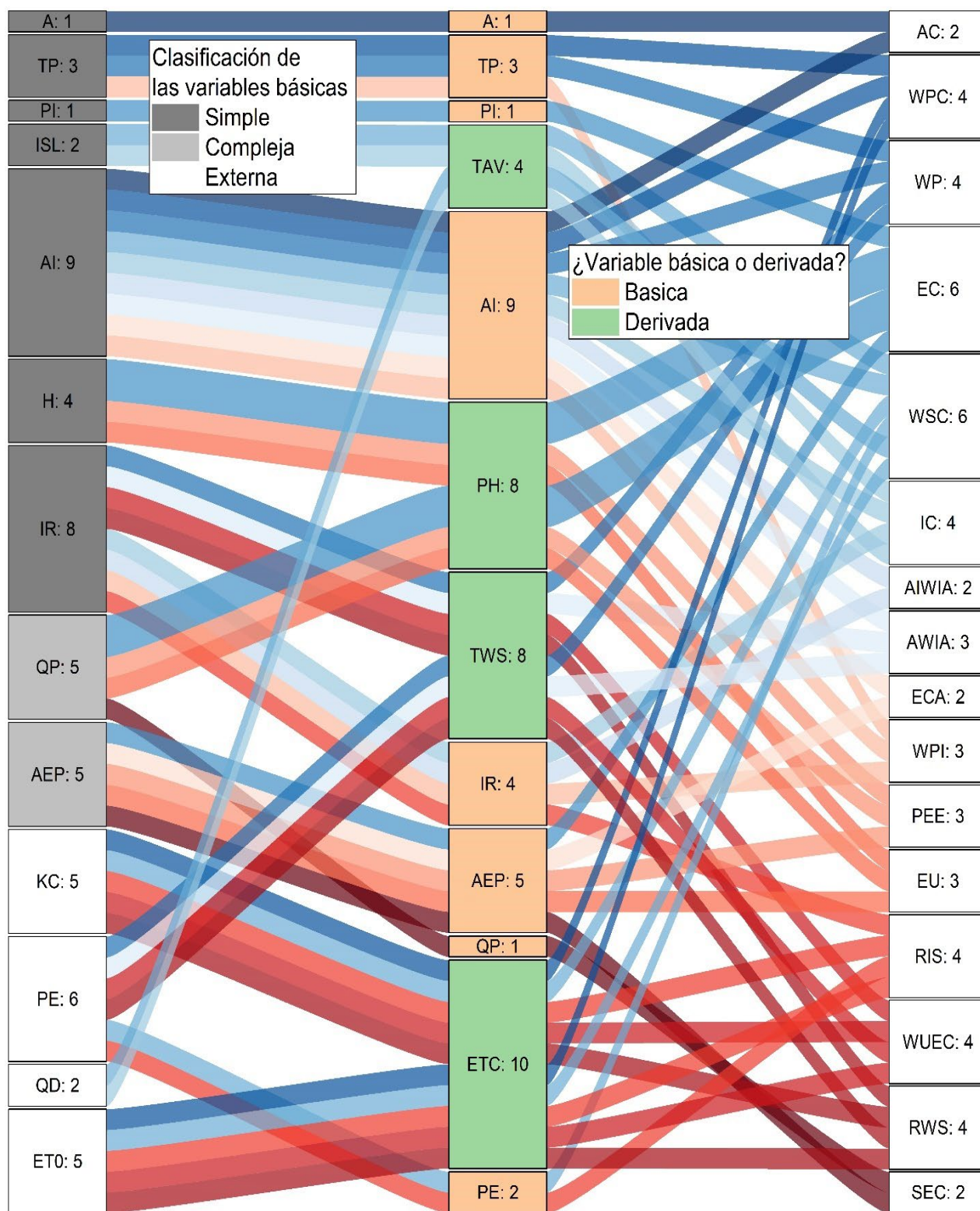


Figura 1. Interrelación entre las variables y los indicadores.

3. CONCLUSIONES

El análisis de las variables básicas, derivadas e indicadores de eficiencia hídrica y energética ha permitido obtener una comprensión de la dinámica de los sistemas de riego y su eficiencia en la utilización de los recursos disponibles. Las variables simples, complejas y externas juegan un papel fundamental en la evaluación de la eficiencia de los sistemas, brindando datos cruciales sobre el consumo de agua y energía, así como las condiciones ambientales que influyen en la demanda hídrica de los cultivos. Las variables derivadas, por su parte, proporcionan un marco integral para gestionar de manera eficiente los recursos, optimizando tanto el uso del agua como la energía.

Los indicadores de eficiencia hídrica, como el Suministro Relativo de Riego (RIS), la Productividad Hídrica del Cultivo (WPC) y la Productividad del Agua de Riego (WPI), son esenciales para evaluar el rendimiento de los sistemas de riego y la efectividad del uso del agua. Estos indicadores revelan oportunidades para mejorar la eficiencia del riego, minimizando tanto el uso innecesario de agua como el impacto ambiental del consumo energético. Además, las métricas de eficiencia energética, como la Energía Consumida por Unidad de Área Irrigada (ECA) y la Eficiencia Energética de Bombeo (PEE), ofrecen información valiosa para reducir el gasto energético en los sistemas de riego, contribuyendo a la sostenibilidad de las prácticas agrícolas.

A futuro, se sugiere continuar con la investigación y el desarrollo de metodologías alternativas para medir y optimizar la eficiencia energética y el uso del agua en los sistemas de riego. Este es un trabajo inicial, y se recomienda la realización de estudios de caso a lo largo del país, con el objetivo de caracterizar los predios agrícolas y, a partir de ello, determinar medidas de ajuste en los indicadores. La identificación y estandarización de indicadores permitirá un mejor entendimiento del proceso productivo y facilitará la implementación de prácticas más eficientes y adaptadas a las condiciones locales. En última instancia, esta investigación establece una base para futuros estudios e iniciativas políticas destinadas a mejorar la resiliencia, la eficiencia y la sostenibilidad de la agricultura chilena.

4. REFERENCIAS

- Abdelwarth, N., Ibrahim, M., El-Mageed, H., & Abdel-Mageed, H. (2022). Evaluating the impact of deficit irrigation scenarios on paddy rice at the Nile northern delta, Egypt. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 13(7), 207-215. <https://doi.org/10.21608/jssae.2022.144045.1081>
- Abadia, R., Rocamora, M. C., Corcoles, J. I., Ruiz-Canales, A., Martinez-Romero, A., & Moreno, M. A. (2010). Comparative analysis of energy efficiency in water users associations. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(S2), 134-142. <https://doi.org/10.5424/sjar/201008S2-1356>
- Abadia, R., Rocamora, C., Ruiz, A., & Puerto, H. (2008). Energy efficiency in irrigation distribution networks I: Theory. *Biosystems Engineering*, 101(1), 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.05.013>
- Ahmad, A. and Khan, S. (2016). Water and energy scarcity for agriculture: Is irrigation modernization the answer? *Irrigation and Drainage*, 66(1), 34-44. <https://doi.org/10.1002/ird.2021>
- Ahmad, M. and Rahman, M. (2023). Analysis of glacier hydrological model components with applications to Chile's Maipo basin. <https://doi.org/10.20944/preprints202306.1979.v1>
- Álamos, N., Alvarez-Garretón, C., Muñoz, A., & González-Reyes, Á. (2024). The influence of human activities on streamflow reductions during the megadrought in central Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(11), 2483-2503. <https://doi.org/10.5194/hess-28-2483-2024>
- Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E., Fong, J., Fonseca, P. (2008) EuP Lot 11 Motors, Final report to the European Commission. Available in: <https://circabc.europa.eu/sd/d/62415be2-3d5a-4b3f-b29a-d1760f4dc11a/Lot11%20Motors%201-8%20final%2028-04-08.pdf>
- Ambomsa, A., Seyoum, T., & Hordofa, T. (2020). Effect of irrigation methods and irrigation levels on yield and water productivity of onion at Awash Melkasa, Ethiopia. *Industrial Engineering*, 4(2), 33. <https://doi.org/10.11648/j.ie.20200402.12>
- Amin, M., Dorra, E., & Hosny, O. (2023). Optimization of urban water consumption in residential buildings. *Sustainability*, 15(10), 7952.

<https://doi.org/10.3390/su15107952>

Awulachew, S. and Ayana, M. (2011). Performance of irrigation: an assessment at different scales in Ethiopia. *Experimental Agriculture*, 47(S1), 57-69.
<https://doi.org/10.1017/s0014479710000955>

Balasubramanya, S., Brozović, N., Fishman, R., Lélé, S., & Wang, J. (2022). Managing irrigation under increasing water scarcity. *Agricultural Economics*, 53(6), 976-984.
<https://doi.org/10.1111/agec.12748>

Basediya, S., Pyasi, S., & Shrivastava, R. (2018). Irrigation planning in canal command area of Samrat Ashok Sagar project-a case study. *International Journal of Agriculture Sciences*, 10(4), 5187. <https://doi.org/10.9735/0975-3710.10.4.5187-5191>

Belaud, G., Mateos, L., Aliod, R., Buisson, M., Faci, E., Gendre, S., Ghinassi, G., Perea, R. G., Lejars, C., Maruejols, F., & Zapata, N. (2019). Irrigation and energy: Issues and challenges. *Irrigation and Drainage*, 69(S1), 177-185.
<https://doi.org/10.1002/ird.2343>

Bruns, S. B., Moneta, A., & Stern, D. I. (2021). Estimating the economy-wide rebound effect using empirically identified structural vector autoregressions. *Energy Economics*, 97, 105158.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105158>

Caldera, U. and Breyer, C. (2019). Assessing the potential for renewable energy powered desalination for the global irrigation sector. *The Science of the Total Environment*, 694, 133598.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133598>

Calejo, M., Lamaddalena, N., Teixeira, J., & Pereira, L. (2008). Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation models. *Agricultural Water Management*, 95(2), 154-162.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.09.011>

Canales-Ide, F., Zubelzu, S., & Rodríguez-Sinobas, L. (2019). Irrigation systems in smart cities coping with water scarcity: the case of Valdebebas, Madrid (Spain). *Journal of Environmental Management*, 247, 187-195.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.062>

Cengiz, A. & Uçar, Y. (2021) Acıpayam Sulama Şebekesi Performansının Değerlendirilmesi. *Türk Bilim Ve Mühendislik Dergisi*, 3(1), 22-29.

Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M., & Vidal, V. (2020). Glacier retreat differences in chilean central andes and their relation with anthropogenic black carbon pollution. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W12-2020, 401-406. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w12-2020-401-2020>

Çifçi, Ş. & Değirmenci, H. (2022) Sulama Performans Göstergeleri ve TOPSİS Yöntemi ile Asi Havzası Sulama Birliklerinin Analizi. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 25(1), 169-180.

Cimmino, L. and Vicidomini, M. (2024). Renewable energy systems 2023. *Applied Sciences*, 14(5), 1918.
<https://doi.org/10.3390/app14051918>

Chang, X., Li, S., Li, N., Wang, S., Li, J., Guo, C., ... & Xu, X. (2022). Marine biomass-derived, hygroscopic and temperature-responsive hydrogel beads for atmospheric water harvesting and solar-powered irrigation. *Journal of Materials Chemistry A*, 10(35), 18170-18184.
<https://doi.org/10.1039/d2ta04919h>

Córcoles, J., Frizzzone, J., Lima, S., Mateos, L., Neale, C., Snyder, R., ... & Souza, F. (2015). Irrigation advisory service and performance indicators in baixo Acaraú irrigation district, Brazil. *Irrigation and Drainage*, 65(1), 61-72. <https://doi.org/10.1002/ird.1941>

Değirmenci, H., Büyükcangaz, H. & Kuşcu, H. (2003) Assessment of irrigation schemes with comparative indicators in the southeastern Anatolia project. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(5), 293-303.

Donoso, G. (2021). Management of Water Resources in Agriculture in Chile and its Challenges. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 48(3), 171-185.
<https://doi:http://dx.doi.org/10.7764/ijanr.v48i3.2328>

Elnemr, M. (2011). Increasing water and energy unit productivity of drip irrigation system with rice straw mulching. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2(10), 1049-1057.
<https://doi.org/10.21608/jssae.2011.56053>

Erguler, D. (2024). Effects of farmyard manure and

biochar treatments on the development and water use of lettuce under the deficit irrigation regime. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 12(2), 274-283. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v12i2.274-283.6662>

Fariás-Barahona, D., Ayala, Á., Bravo, C., Vivero, S., Seehaus, T., Vijay, S., ... & Braun, M. (2020). 60 years of glacier elevation and mass changes in the maipo river basin, central andes of chile. *Remote Sensing*, 12(10), 1658. <https://doi.org/10.3390/rs12101658>

Fernández, J., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V., & Cuevas, M. (2020). Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. *Agricultural Water Management*, 237, 106074. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074>

Flores, C., Holzapfel, E., & Lagos, O. (2010). A dynamic decision support system for farm water management in surface irrigation: model development and application. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-58392010000200011>

Flores, J. H. N. (2022). Modelagem de unidade de bombeamento de irrigacao. Tesis de doctorado – Programa de Pós-Grado en Recursos Hídricos – Universidade Federal de Lavras.

García, I. F., Montesinos, P., Poyato, E. C., & Díaz, J. a. R. (2014). Methodology for Detecting Critical Points in Pressurized Irrigation Networks with Multiple Water Supply Points. *Water Resources Management*, 28(4), 1095–1109. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0538-x>

Garreaud, R., Álvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307-6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>

Gebbru, A., Araya, A., Habtu, S., Georgis, T., Teka, D., & Martorano, L. (2018). Evaluating water productivity of tomato, pepper and swiss

chard under clay pot and furrow irrigation technologies in semi-arid areas of northern ethiopia. *International Journal of Water*, 12(1), 54. <https://doi.org/10.1504/ijw.2018.090188>

Gençoğlu, M. & Değirmenci, H. (2019) Sulama performansının değerlendirilmesi: kırıkhan sulama birliği örneği. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 22(3), 436–443.

Haile, G., Gebremicael, T., Kifle, M., & Gebremedhin, T. (2019). Effects of irrigation scheduling and different irrigation methods on onion and water productivity in tigray, northern ethiopia.. <https://doi.org/10.1101/790105>

Han, S., Hu, H., Yang, D., & Liu, Q. (2011). Irrigation impact on annual water balance of the oases in tarim basin, northwest china. *Hydrological Processes*, 25(2), 167-174. <https://doi.org/10.1002/hyp.7830>

Jódar, J., Urrutia, J., Herrera, C., Custodio, E., Martos-Rosillo, S., & Lambán, L. (2023). The catastrophic effects of groundwater intensive exploitation and Megadrought on aquifers in Central Chile: Global change impact projections in water resources based on groundwater balance modeling. *The Science of the Total Environment*, 914, 169651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169651>

Jägermeyr, J., Gerten, D., Heinke, J., Schaphoff, S., Kummu, M., & Lucht, W. (2015). Water savings potentials of irrigation systems: global simulation of processes and linkages. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(7), 3073-3091. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3073-2015>

Jordan, C., Donoso, G., & Speelman, S. (2021). Irrigation subsidy policy in Chile: lessons from the allocation, uneven distribution and water resources implications. *International Journal of Water Resources Development*, 39(1), 133–154. <https://doi.org/10.1080/07900627.2021.1965964>

Karaman, S., Yilmaz, İ., & Çelikyurt, M. (2012). Assessment of the performance of participatory irrigation management in Antalya, Turkey. *Water Policy*, 15(2), 269-280. <https://doi.org/10.2166/wp.2012.133>

Lozano Parra, J., Pulido Fernández, M., & Garrido Velarde, J. (2021). The Availability of Water in Chile: A Regional View from a Geographical Perspective. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.92169

- Marsh, B., Dowgert, M., Hutmacher, R., & Phene, C. (2007). Low-pressure drip system in reduced tillage cotton., 1, 73-80. <https://doi.org/10.2495/wrm070081>
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Abreu, N. J., Stehr, A., Duran-Llaser, I., Rodríguez-López, L., Sauvage, S., & Sánchez-Pérez, J. (2021). Estimation of the climate change impact on the hydrological balance in basins of South-Central Chile. *Water*, 13(6), 794. <https://doi.org/10.3390/w13060794>
- Maximov, S., Harrison, G., & Friedrich, D. (2019). Long term impact of grid level energy storage on renewable energy penetration and emissions in the Chilean electric system. *Energies*, 12(6), 1070. <https://doi.org/10.3390/en12061070>
- Melián-Navarro, A. and Ruiz-Canales, A. (2020). Evaluation in carbon dioxide equivalent and CHG emissions for water and energy management in water users associations. A case study in the Southeast of Spain. *Water*, 12(12), 3536. <https://doi.org/10.3390/w12123536>
- Ministerio de Energía de Chile (2021). Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026. Available in: https://energia.gob.cl/sites/default/files/eficiencia-energetica_16-nov.pdf
- Mohammed, M. and Tefera, A. (2017). Effect of reference conveyance parameter usage on real time canal performance: the case of fentale irrigation scheme in Ethiopia. *Computational Water Energy and Environmental Engineering*, 06(01), 79-88. <https://doi.org/10.4236/cweee.2017.61006>
- Monteiro, L., Cristina, R., & Covas, D. (2021). Water and energy efficiency assessment in urban green spaces. *Energies*, 14(17), 5490. <https://doi.org/10.3390/en14175490>
- Moradi, R., Moghaddam, P., & Mansoori, H. (2015). Energy use and economical analysis of seedy watermelon production for different irrigation systems in Iran. *Energy Reports*, 1, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2014.10.002>
- Moreno, M., Álvarez, J., Córcoles, J., Martínez, A., & Tarjuelo, J. (2010). Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency. *Irrigation Science*, 28(5), 445-460. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0206-8>
- Mushab, F. and Almasraf, S. (2019). Improvement of economic water productivity of cucumber by using soil water retention technology under subsurface trickle irrigation system. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 26(3), 68-72. <https://doi.org/10.33261/jaaru.2019.26.3.008>
- Νικολάου, Γ., Neocleous, D., Katsoulas, N., & Kittas, C. (2019). Irrigation of greenhouse crops. *Horticulturae*, 5(1), 7. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5010007>
- Parra, L., Botella-Campos, M., Puerto, H., Roig-Merino, B., & Lloret, J. (2020). Evaluating Irrigation Efficiency with Performance Indicators: A Case Study of Citrus in the East of Spain. *Agronomy*, 10(9), 1359. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091359>
- Perez-Silva, R. and Castillo, M. (2023) Taking advantage of water scarcity? Concentration of agricultural land and the politics behind water governance in Chile. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1143254. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1143254>
- Puerto, H., Mora, M., Merino, B., Abadia-Sanchez, R., Zapata, J., Suay, R., ... & Rocamora, C. (2021). Orchard level assessment of irrigation performance and water productivity of an irrigation community in eastern Spain. *Agronomy*, 11(9), 1829. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091829>
- Puy, A., Borgonovo, E., Piano, S., Levin, S., & Saltelli, A. (2021). Irrigated areas drive irrigation water withdrawals. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24508-8>
- Rodríguez-Díaz, J. A., Urrestarazu, L. P., Poyato, E. C., & Montesinos, P. (2012). Modernizing Water Distribution Networks: Lessons from the Bembézar MD Irrigation District, Spain. *Outlook on Agriculture*, 41(4), 229-236. <https://doi.org/10.5367/oa.2012.0105>
- Singh, O. and Singh, P. (2021). Effects of drip and alternate furrow method of irrigation on cotton yield and physical water productivity: a case study from farmers' field of Bhavnagar district of Gujarat, India. *Journal of Applied and Natural Science*, 13(2), 677-685. <https://doi.org/10.31018/jans.v13i2.2696>

Sitterson, J., Andales, A., Mooney, D., Capurro, M., & Brummer, J. (2023). Developing a crop water production function for alfalfa under deficit irrigation: a case study in eastern Colorado. *Agriculture*, 13(4), 831. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040831>

Taucare, M., Viguiet, B., Figueroa, R., & Daniele, L. (2023). The alarming state of Central Chile's groundwater resources: A paradigmatic case of a lasting overexploitation. *The Science of the Total Environment*, 906, 167723. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167723>

Taş, C. S., & Kızıloğlu, F. M. (2022). Erzincan Altınada sulama şebekesinin performansının değerlendirilmesi. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 10(11), 2224–2231. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i11.2224-2231.5514>

Timon, F., Alhassan, I., Maunde, M., & Simon, N. (2015). Irrigation water productivity of rice under various irrigation schedules and tillage practices in northern Guinea savanna region of Nigeria. *Trends Journal of Sciences Research*, 2(3), 110–116. <https://doi.org/10.31586/agriculture.0203.05>

Torun, E., & Çakmak, B. (2024). Evaluation of water efficiency in agriculture: The case of the Konya closed basin. *Irrigation and Drainage*, 73(4), 1470–1482. <https://doi.org/10.1002/ird.2972>

Trout, T. and Manning, D. (2019). An economic and biophysical model of deficit irrigation. *Agronomy Journal*, 111(6), 3182–3193. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0209>

Villamar-Ayala, C., Vera-Puerto, I., Rivera, D., & Hoz, F. (2018). Reuse and recycling of livestock and municipal wastewater in Chilean agriculture: a preliminary assessment. *Water*, 10(6), 817. <https://doi.org/10.3390/w10060817>

Xie, Y., Wang, S., Luo, C., Sun, M., Wang, Y., Yang, J., ... & Wang, Q. (2020). Using plastic mulching improves greenhouse-grown pakchoi (*brassica rapa* subsp. *chinensis*) growth and water use efficiency under irrigation scheduling based on soil water content. *Agronomy*, 10(9), 1257. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091257>

Ye, S., Han, J., & Liu, T. (2019). Determination of optimum irrigation strategies and effect of drip irrigation system on growth and water use efficiency of pear jujube in loess hilly region of northern shaanxi. *Plos One*, 14(8), e0221925. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221925>