

Estimación del volumen de agua virtual exportada en productos agrícolas. California como caso de estudio

Estimation of the volume of virtual water exported in agricultural products. California as a case study

Nguyen, D.T.^{a1}, Nolasco, D.^{b1,c}, Baquero, A.^{id}, Rosso, D.^{ia2,b2*}

^aDepartment of Civil and Environmental Engineering, University of California, Irvine, CA 92697-2175, USA.
E-mail: ^{a2}bidui@uci.edu

^bWater-Energy Nexus Center, University of California, Irvine, CA 92697-2175, USA.

^cNOLASCO y Asociados S. A., Congreso 1908, p. 2D, Buenos Aires, Argentina.

^dPrograma de Ingeniería Ambiental. Universidad Militar Nueva Granada. Cajicá, Colombia.

Recibido: 15/04/2020

Aceptado: 29/09/2020

Publicado: 31/10/2020

Citar como: Nguyen, D.T., Nolasco, D., Baquero, A., Rosso, D. 2020. Estimation of the volume of virtual water exported in agricultural products. California as a case study. *Ingeniería del agua*, 24(4), 255-267. <https://doi.org/10.4995/la.2020.13495>

RESUMEN

California es el estado con mayores ingresos por exportación de productos agrícolas en Estados Unidos. En la definición de agua exportada se contabiliza el agua contenida físicamente en los productos agrícolas cultivados y transportados fuera de una frontera geográfica, adicionalmente se incluye la evapotranspiración inducida por el riego del cultivo. Como consecuencia de las condiciones climáticas, el agua evapotranspirada se pierde y no está disponible en el ciclo hidrológico local. En el presente estudio, para la estimación del agua exportada se utilizaron datos de los 50 productos agrícolas más exportados desde California (período 2000-2012). Los resultados muestran que, en promedio, el agua exportada en productos agrícolas corresponde a $2.88 \times 10^{10} \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, lo que equivale al 68.3% del agua utilizada en riego del cultivo. La mayor parte del agua exportada (67.7%) está representada en la evapotranspiración inducida por el riego del cultivo. El agua contenida físicamente en los productos agrícolas exportados se calculó en $2.32 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, esto representa menos del 1% del total anual de agua utilizada en California para riego.

Palabras clave | agua exportada; agua virtual; huella hídrica; riego; estrés hídrico; cambio climático.

ABSTRACT

California is the state with the highest income from export of agricultural products in the United States. The total exported water is defined as the physical water contained in crops transported outside a geographic border plus the water lost as induced evapotranspiration as a result of crop irrigation. As a consequence of environmental conditions, the evapotranspiration water is no longer available inside the local hydrologic cycle. In this research, a data set for California's 50 most exported agricultural commodities (in the period 2000-2012), has been used to quantify exported water. The results show that, on average, the overall exported water in California's agricultural products was $2.88 \times 10^{10} \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$, equivalent to 68.3% of the total water used in agricultural irrigation. The majority of the exported water is in the form of induced evapotranspiration, totaling 67.7% of the annual total water used in irrigation. The physical water content contained in crops was approximately $2.32 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$, representing less than 1% of the total water used in irrigation and of the induced evapotranspiration.

Key words | virtual water, climate change, water stress, agriculture.

INTRODUCCIÓN

A escala global, la mayor parte del agua disponible es usada en la producción agrícola, en consecuencia, resulta ser la agricultura el motor principal del estrés hídrico mundial (Mekonnen y Hoekstra, 2011b, 2020; Mubako et al., 2013). En el estado de California la cantidad de agua usada en el riego de productos agrícolas es mayor que la demanda total de agua urbana (Letey y Birkle, 2003). El sistema de abastecimiento de California suministra agua a 38 millones de personas (California Department of Finance, Demographic Research Unit, 2014) y aporta a una economía de 2.20×10^{12} USD año⁻¹ (International Monetary Fund, 2014). Los registros disponibles para el periodo 1998 a 2010 muestran que la industria agrícola de California utiliza el 80.6% de la oferta hídrica del estado. En un año típico, en California se riegan 3.30×10^6 ha de tierra con aproximadamente 4.20×10^{10} m³ de agua (Nguyen, 2015).

California exporta sus productos agrícolas a más de 156 países alrededor del mundo (Ver Figura 1) obteniendo por este concepto ingresos anuales de USD 18.2×10^9 (California Department of Food and Agriculture, 2013, 2014), lo cual la coloca como la región agrícola de Estados Unidos con mayores ingresos. Los registros históricos muestran una tendencia estable en sus ingresos anuales por exportación de productos agrícolas (Ver Figura 2).

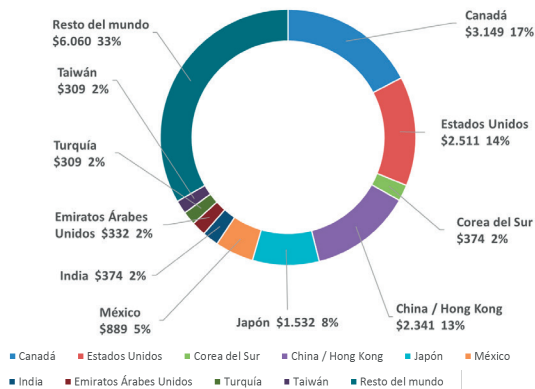


Figura 1 | Destinos de las exportaciones agrícolas de California. A partir de California Department of Food and Agriculture, (2014).

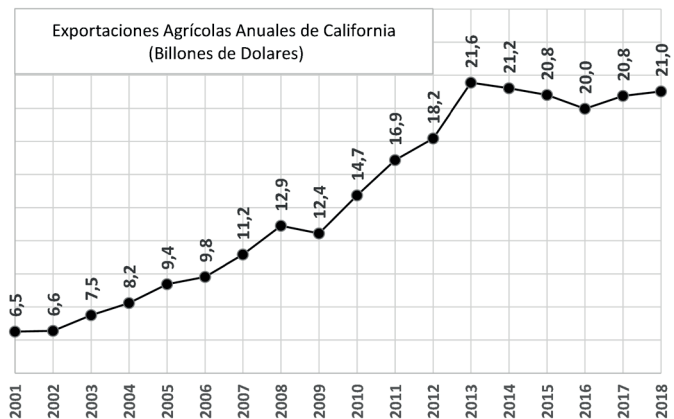


Figura 2 | Ingresos históricos por exportaciones. A partir de California Department of Food and Agriculture, (2014, 2019).

A medida que la presión sobre los recursos hídricos se intensifica a nivel mundial hay un creciente interés por entender las interacciones complejas y la forma en la que las actividades humanas los impactan. (Alcamo et al., 2007; Fulton et al., 2012; Gleick y Palaniappan, 2010; Hoekstra y Chapagain, 2011; Postel et al., 1996; Vörösmarty et al., 2000). Diferentes indicadores aplicables a la gestión del agua están disponibles, a continuación, algunos de ellos se definen y contextualizan con relación al concepto del agua exportada físicamente dentro de los productos agrícolas.

Agua Virtual. Se define como el volumen de agua necesario para producir un bien o un servicio (Allan, 1993, 1994). El adjetivo “virtual” se usa porque el agua no está contenida físicamente en el producto (Hoekstra, 2003), por ejemplo, el agua virtual que es utilizada, directa e indirectamente, para producir una taza de café (125 mL) es equivalente a 140 L de agua. Este concepto de “Agua Virtual” fue desarrollado para describir la transferencia de agua asociada a la exportación de productos desde regiones con recursos hídricos abundantes hacia regiones con escasez. Allan (1998, 2003) argumentó que los movimientos internacionales de productos cultivados son equivalentes a la exportación de agua en su forma virtual, así mismo, observó la tendencia de diferentes naciones a ser cada vez más dependientes de otros países para su seguridad hídrica.

Huella Hídrica. Es el volumen de agua dulce utilizado para producir un bien o servicio, medido en toda la cadena de suministro. Es un indicador multidimensional que muestra los volúmenes de agua consumidos en la fuente, así como los volúmenes residuales, según el tipo de contaminación. Todos los componentes de una huella hídrica total se especifican geográfica y temporalmente (Hoekstra, 2011; International Organization for Standardization, 2014). La Huella Hídrica comprende el volumen de agua usado directamente, así como la cantidad de agua empleada indirectamente (p. ej. virtual) en diversas etapas y lugares

asociados a la fabricación de bienes o en la prestación de servicios. La Huella Hídrica es expresada normalmente en términos anualizados. También es habitual hacer referencia a las ciudades, regiones, estados o empresas donde los productos son fabricados o los servicios ofrecidos (Fulton et al., 2014; Schubert, 2011).

Las aplicaciones de la huella hídrica pueden ser identificadas en múltiples estudios, en temas relacionados con: i) Ciclo de vida un producto agrícola, ii) Flujos de agua virtual entre naciones, iii) Estimación de la Huella Hídrica a escala mundial (Chapagain y Hoekstra, 2003; Hoekstra y Chapagain, 2006; Hoekstra y Hung, 2002; Mekonnen y Hoekstra, 2020; Oki y Kanae, 2004; Zimmer y Renault, 2003).

La mayoría de los estudios de los flujos de agua virtual entre naciones se han enfocado en flujos transfronterizos de agua virtual asociada a los productos agrícolas (Chen y Chen, 2013; Dalin et al., 2012; Hanasaki et al., 2010; Hoekstra y Chapagain, 2011; Hoekstra y Hung, 2002; Konar et al., 2011; Mekonnen y Hoekstra, 2011a). Pocos estudios han analizado la huella hídrica a escalas de nivel subnacional o estatal. Algunos estudios desarrollados bajo estas consideraciones han sido identificados en Australia (Lenzen, 2009), China (Guan y Hubacek, 2007; Zhao et al., 2009), India (Verma et al., 2009), y España (Aldaya et al., 2009; Dietzenbacher y Velázquez, 2007). En el caso particular de Estados Unidos, los resultados de los estudios muestran que California importa más de dos veces el agua virtual que exporta y que más del 90% de su Huella Hídrica está asociada con los productos agrícolas (Fulton et al., 2012). Estados como California e Illinois son exportadores netos de agua virtual asociada al comercio de productos agrícolas (Mubako et al., 2013).

Adoptando categorías asociadas al uso doméstico, y a las actividades agrícola e industriales, Hoekstra y Chapagain (2006) evaluaron la huella hídrica virtual de algunos países. Este tipo de estudios ha tenido continuidad y el nivel de detalle en los mismos ha aumentado. Como consecuencia de lo anterior, Mekonnen y Hoekstra (2011a) cuantificaron la huella hídrica de varias naciones, considerando el punto de vista de producción y consumo, los flujos internacionales de agua virtual y el ahorro nacional de agua como resultado del comercio. Al categorizar los recursos hídricos mundiales en componentes verdes (agua lluvia), azules (agua superficial o subterránea) y grises (cambios negativos en la calidad del agua), Mekonnen y Hoekstra (2011a) mostraron que para el período 1996-2005 el agua virtual internacional, asociada al comercio de productos agrícolas e industriales, correspondía a $2.32 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, esto equivale al 26% de la huella hídrica estimada en $9.09 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$.

Ninguno de los estudios previos en huella hídrica a escala global, nacional o subnacional se enfocó en cuantificar el agua física contenida en los productos agrícolas que son exportados. El total de agua exportada en productos agrícolas considera únicamente el agua que es exportada fuera de una frontera geográfica. Este enfoque es diferente al de la huella hídrica, dado que parte del agua usada en cuantificar la huella hídrica permanece dentro de la frontera geográfica y puede ser absorbida o reutilizada de diferentes formas.

Desde el punto de vista hidrológico, el agua contenida físicamente en productos agrícolas exportados se pierde y ya no está disponible localmente en la cuenca hidrográfica de la cual se tomó, esto a menos que la precipitación se produzca dentro de la misma cuenca hidrográfica o en una cuenca conectada con la región de origen del agua, por ejemplo, agua evaporada en California que se precipita posteriormente en Colorado y es retornada a California por medio del Río Colorado.

En el presente estudio se cuantifica la cantidad de agua exportada físicamente en productos agrícolas. Se hace esta distinción teniendo en cuenta que estudios previos se enfocan en cuantificar el agua virtual o la huella hídrica. La hipótesis del presente estudio es que el contenido de agua física presente en los cultivos es un contribuyente menor a la exportación de agua de la agricultura de California. Se presume que la evapotranspiración inducida, asociada con ese producto agrícola, es mucho más representativa. El objetivo de este trabajo es poner a prueba nuestra hipótesis usando a California como caso de estudio. La evaluación asociada con la agricultura considera la cuantificación de: (i) El agua exportada físicamente dentro de los productos agrícolas, así como (ii) La evapotranspiración inducida asociada a los productos agrícolas exportados.

MATERIAL Y MÉTODOS

El Estado de California (Estados Unidos) fue escogido como referente para este estudio de caso. El período 2000-2012 fue seleccionado debido a que estaban disponibles todos los datos necesarios para la aplicación del modelo matemático propuesto.

Para el desarrollo del presente estudio fueron seleccionados 50 cultivos que constituyen la mayor parte del consumo de agua y de ingresos brutos en este sector para California.

Se utilizaron datos proporcionados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (United States Department of Agriculture, 2012, 2013, 2014), el Departamento de Alimentos y Agricultura de California (California Department of Food and Agriculture, 2013, 2014) y el Centro de Investigación y Formación en riego de la Universidad Estatal Politécnica de California San Luis Obispo (Irrigation Training and Research Center, 2003). Se realizó una recopilación sistemática de datos para cada uno de los 50 cultivos analizados. Los datos recolectados incluyen las necesidades de área asociadas al cultivo, la masa total producida en el cultivo y el porcentaje exportado de la producción agrícola.

Modelo Matemático

Para cuantificar el volumen real de agua contenida en todos los cultivos (W_E) sobre una base anual, se desarrolló la siguiente ecuación:

$$W_E = \sum_{j=1}^n W_j = \sum_{j=1}^n (W_C)_j + (W_{ET})_j \quad (1)$$

Donde $(W_C)_j$ es el agua contenida físicamente ($m^3 \text{ año}^{-1}$) en cada uno de los cultivos analizados y $(W_{ET})_j$ es la evapotranspiración inducida ($m^3 \text{ año}^{-1}$). El contenido físico de agua asociado a cada cultivo $(W_C)_j$ se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$(W_C)_j = (m_C)_j \cdot (h_C)_j \quad (2)$$

Donde $(m_C)_j$ es la masa (kg) y $(h_C)_j$ es el contenido de humedad (%) de cada cultivo (representado como j), obtenido a partir de la Base de Datos de Nutrientes del departamento de Agricultura de Estados Unidos (United States Department of Agriculture, 2013, 2014).

La evapotranspiración inducida $(W_{ET})_j$ se estimó a partir de un cálculo específico para cada cultivo, utilizando los factores de evapotranspiración $(ET_C)_j$ (Irrigation Training and Research Center, 2003) y la superficie total utilizada por cada cultivo $(LU_C)_j$:

$$(W_{ET})_j = (ET_C)_j \cdot (LU_C)_j \quad (3)$$

Adicionalmente, a partir de los datos compilados, tres relaciones adimensionales fueron calculadas:

$$\text{Índice agua contenida } (\chi_j): \quad \chi_j = \frac{(W_C)_j}{(m_C)_j} \quad (4)$$

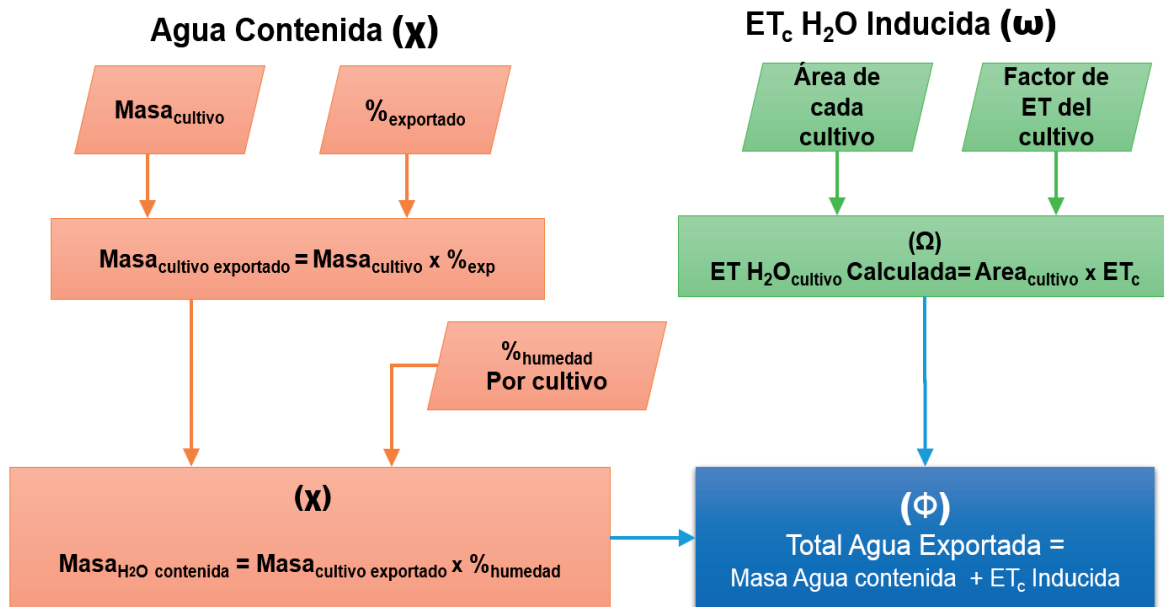
$$\text{Índice de evapotranspiración Inducida } (\omega_j): \quad \omega_j = \frac{(W_{ET})_j}{(m_C)_j} \quad (5)$$

$$\text{Índice de Agua exportado } (\Phi_j): \quad \Phi_j = \chi_j + \omega_j \quad (6)$$

A partir de lo anterior, el total de agua exportada Φ ($m^3 \text{ año}^{-1}$) es igual a:

$$\Phi = \sum_{j=1}^n \Phi_j \quad (7)$$

Una representación del modelo matemático desarrollado se encuentra en la Figura 3.

**Donde:**

X: Agua contenida en los cultivos

Ω: Evapotranspiración de agua inducida por cultivos irrigados

Φ: Agua total exportada ($\Phi = X + \Omega$)

Figura 3 | Modelo matemático propuesto para el cálculo de agua exportada.

RESULTADOS

Para los 50 productos agrícolas analizados (2000-2012) los resultados obtenidos muestran que en California la producción anual promedio fue de 1.57×10^9 toneladas métricas, un 17% de la producción fue exportado a nivel internacional (2.63×10^8 toneladas métricas). El contenido de agua en los productos agrícolas exportados se calculó en 2.32×10^8 m³ año⁻¹, lo cual representa el 0.6% del total anual de agua utilizada en riego para California. Lo anterior en contraste con el agua absorbida por los tejidos de la plantas, estimada típicamente como el 5% del agua empleada en el riego (McElrone et al., 2013).

Una lista detallada de la cantidad de agua exportada anualmente en cada uno de los 50 cultivos se presenta en la Figura 4. El cálculo del agua exportada en cada cultivo (contenido físico de agua, más agua asociada a evapotranspiración inducida) muestra que productos como heno, uvas, almendras, arroz, algodón, trigo, nueces, tomates, naranjas, lechugas, pistachos, ciruelas, brócoli, aguacates, melocotones y nectarinas, son los 15 cultivos que consumen la mayor parte del agua utilizada en el riego.

La evapotranspiración inducida, asociada con el agua empleada en los productos agrícolas exportados, se calculó en 2.85×10^{10} m³ año⁻¹, lo que corresponde al 67.7% del total anual de agua utilizada en el riego de cultivos. El total de agua exportada asociada con los productos exportados se estimó en 2.88×10^{10} m³ año⁻¹, esto es el 68.3% del total del total anual de agua utilizada en el riego de cultivos. Los resultados muestran que la cantidad de agua contenida físicamente en los productos cultivados es significativamente menor que la cantidad de agua exportada en forma de evapotranspiración inducida. El agua físicamente contenida en los productos cultivados sólo representa el 0.81% del agua asociada a la evapotranspiración inducida resultado del riego para el cultivo de los productos exportados.

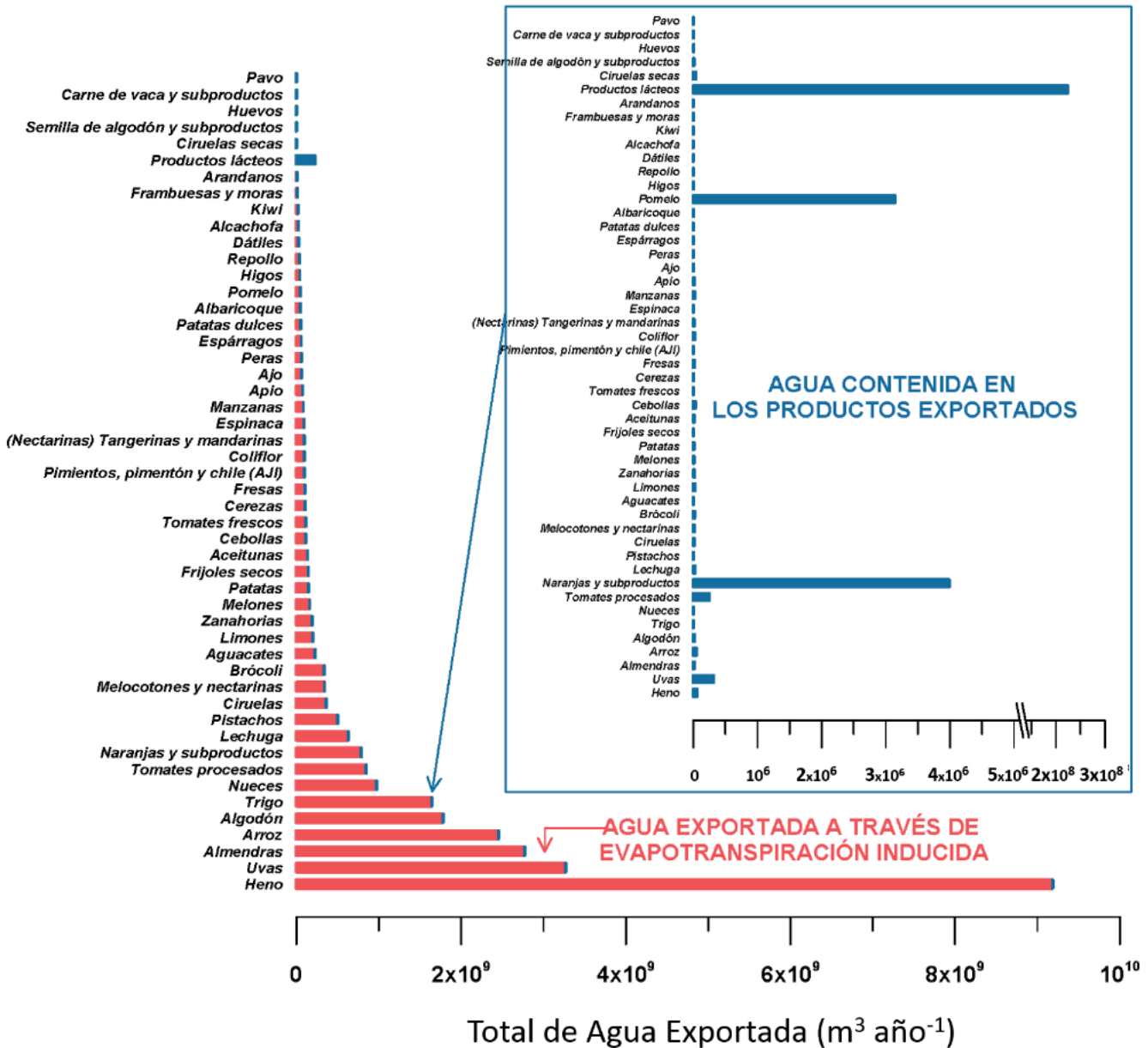


Figura 4 | Total agua exportada, estimado a partir de la masa de agua contenida en los cultivos más la evapotranspiración inducida asociada a los cultivos.

El modelo climático regional para California (Sorooshian et al., 2014) presenta resultados para la evapotranspiración inducida calculada, los resultados obtenidos en el presente estudio mantienen consistencia con el estudio mencionado y validan la representatividad de la metodología aplicada (ajuste al 97%), la comparación de los resultados obtenidos con las metodologías mencionadas se encuentra en la Figura 5. Este hallazgo sugiere que el riego de productos agrícolas tiene un papel significativo en el consumo total de agua utilizada en la producción de cultivos. Los resultados también confirman que el riego agrícola tiene un impacto directo en el incremento de la evapotranspiración superficial tal como lo han reportado diferentes autores (Lo & Famiglietti, 2013; Wei et al., 2013).

Entre 2000 y 2012 California exportó alrededor de 2.63×10^8 toneladas métricas de productos agrícolas y materias primas, el agua contenida en dichos productos agrícolas corresponde aproximadamente a $2.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ agua, cantidad que es equivalente al 0.6% del agua empleada en riego. En el mismo periodo la evapotranspiración inducida por cultivo de los productos agrícolas exportados corresponde a $2.85 \times 10^{10} \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, esta cantidad corresponde al 67.7% del total del agua empleada para riego en California. La evapotranspiración inducida por el cultivo es aproximadamente 120 veces mayor que la cantidad el agua contenida físicamente en los productos cultivados, esto confirma la hipótesis planteada para el presente trabajo: la pérdida de agua a través de la evapotranspiración asociada al riego durante el cultivo es muy superior al agua físicamente exportada en el producto en sí. Ejemplos de los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 6 y 7, los análisis que soportan nuestros hallazgos incluyen la cantidad de productos exportados, el agua contenida físicamente en ellos, así como la evapotranspiración inducida asociada a la cosecha.

El valor total de agua exportada, estimado en el presente estudio, es aproximadamente 26% más alto que el valor previamente reportado ($2.28 \times 10^{10} \text{ m}^3$) por Fulton et al., (2012). La diferencia puede deberse a la referencia temporal de los datos empleados, así como al incremento en la cantidad de productos agrícolas exportados. Fulton et al. (2012) utilizaron datos de California para el periodo 1998-2005 mientras que los datos empleados en el presente estudio corresponden al periodo 2000-2012. Teniendo en cuenta lo anterior los resultados del presente estudio son consistentes con la estimación de la huella hídrica previamente reportada.

DISCUSIÓN

Tendencia observada en el riego agrícola

Ante la creciente presión asociada al estrés hídrico en California se han empezado a explorar aplicaciones novedosas para la reutilización de agua residual tratada. Algunos productores agrícolas, dependiendo del nivel de tratamiento que recibe el agua, utilizan diferentes formas de agua residual tratada. La aplicación más común es el uso de efluentes de tratamientos secundarios en cultivos de forraje y fibra. Sin embargo, cada vez más productores están regando frutas y verduras con efluentes de tratamientos terciarios, donde esta aplicación ha permitido obtener cultivos de alta calidad con altos rendimientos.

En las ciudades de Visalia y Santa Rosa (California) se han desarrollado proyectos para regar con aguas residuales procedentes de tratamientos secundarios más de 2400 hectáreas de tierras de cultivo, incluido un huerto de nogal. Los proyectos fueron diseñados originalmente con el fin de reducir el vertimiento de aguas residuales tratadas, sin embargo, ambas ciudades se han beneficiado de las ventajas del abastecimiento de agua residual tratada (Wong et al., 1999).

En California, la variedad de cultivos y los patrones de siembra han cambiado. Estos cambios son el resultado de las decisiones tomadas por un gran número de individuos, en lugar de acciones intencionales tomadas por los legisladores estatales. Los agricultores de California están migrando a cultivos de frutas y vegetales que mantienen buenos precios de venta para la cosecha y baja demanda de agua, en comparación con cultivos de hierba y granos a los que sustituyen. Estos nuevos cultivos también pueden ser irrigados con tecnologías más precisas y eficientes. En consecuencia, California está aumentando lentamente la productividad del agua en el sector agrícola, aumentando los ingresos y rendimientos de los cultivos por unidad de agua consumida. Estas iniciativas no solo promueven el ahorro de grandes cantidades de agua, sino que tienen el potencial para cambiar radicalmente el sector agrícola de California, haciéndolo aún más productivo y eficiente de lo que es actualmente.

En las últimas dos décadas los agricultores de California han hecho progresos considerables desde el punto de vista de eficiencia en sus sistemas de riego, por ejemplo, implementado riego por goteo con el objeto de incrementar la eficacia de la irrigación y reducir el desperdicio de agua. Las prácticas aquí mencionadas son consistentes con tendencias en el contexto del cumplimiento de objetivos de desarrollo sostenible y la gestión regional de recursos hídricos usados en el sector agrícola (Huang et al., 2020; Zhuo et al., 2019)

Recientes esfuerzos sugieren que los cultivos que no se regaban previamente con sistemas de goteo pueden ser regados con éxito de forma económica. Un ejemplo de la conversión a riego por goteo es el cultivo de pimienta, donde el riego por goteo subsuperficial aumentó considerablemente la producción, disminuyó el consumo de agua y mejoró las utilidades de los agricultores.

Replicabilidad de la metodología

En función de la disponibilidad de datos públicos, en la presente investigación se han examinado 50 de los principales productos agrícolas que exporta California. De acuerdo con el Departamento de Alimentos y Agricultura de California hay 305 cultivos de diferentes productos en la región. Para evaluar los efectos globales de la evapotranspiración por los cultivos producidos comercialmente en California la investigación debe ampliarse a la evaluación del agua exportada en los 255 cultivos restantes. Muchas regiones de California se clasifican como zonas áridas y semiáridas. Estas regiones comparten condiciones climáticas similares a regiones de países como Chile, España, Francia, Italia, Sudáfrica y Australia (United Nations General Assembly, 1994). La metodología aplicada en la presente investigación puede tomarse como referente para el desarrollo de estudios de agua exportada en cultivos aptos para condiciones climáticas similares a las de California.

Energía exportada asociada a los cultivos - Futuros estudios

Un área de investigación poco desarrollada es la relacionada con el efecto de mecanismo de retroalimentación positiva de la energía total exportada de los cultivos como resultado de evapotranspiración inducida. El bombeo de agua subterránea para riego en California consume aproximadamente 1.5×10^4 GWh año⁻¹. El requerimiento de energía para el riego con aguas subterráneas es el mayor contribuyente en el proceso de producción de alimentos (Nguyen, 2015). Los resultados obtenidos muestran que la mayor parte del agua del agua empleada en riego de cultivos es exportada en forma de evapotranspiración inducida, dicha situación justifica las investigaciones orientadas a examinar la energía que se exporta como resultado de la evapotranspiración inducida, más allá de la energía asociada al riego del cultivo. Esta investigación arrojará luces sobre el consumo de energía en la producción de alimentos, incluyendo la energía consumida dentro de un dominio espacial y su exportación a través de la evapotranspiración inducida.

Las futuras investigaciones deben extenderse a todos los cultivos producidos comercialmente en California. Los resultados de esta modelación matemática del presente trabajo se pueden aplicar a la cuantificación de la energía exportada, asociada a la de los consumos de energía por otros sectores de la economía de California. Los resultados de este futuro estudio ayudarán a completar el análisis del consumo de energía en el ciclo de vida de la industria agrícola de California.

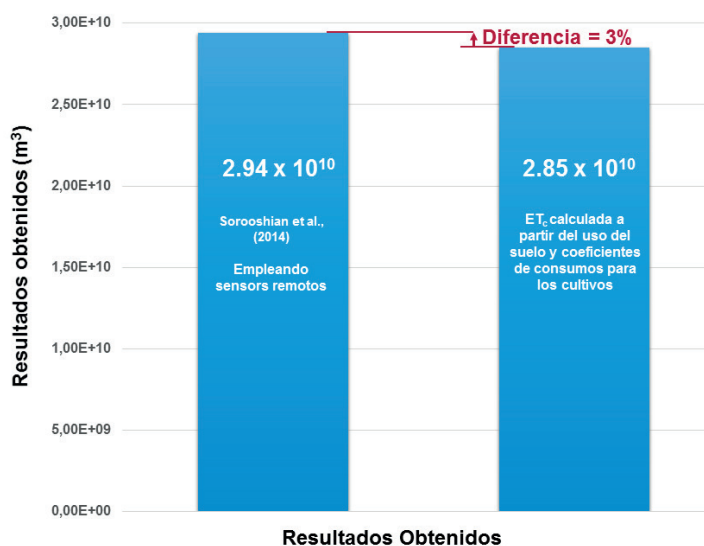
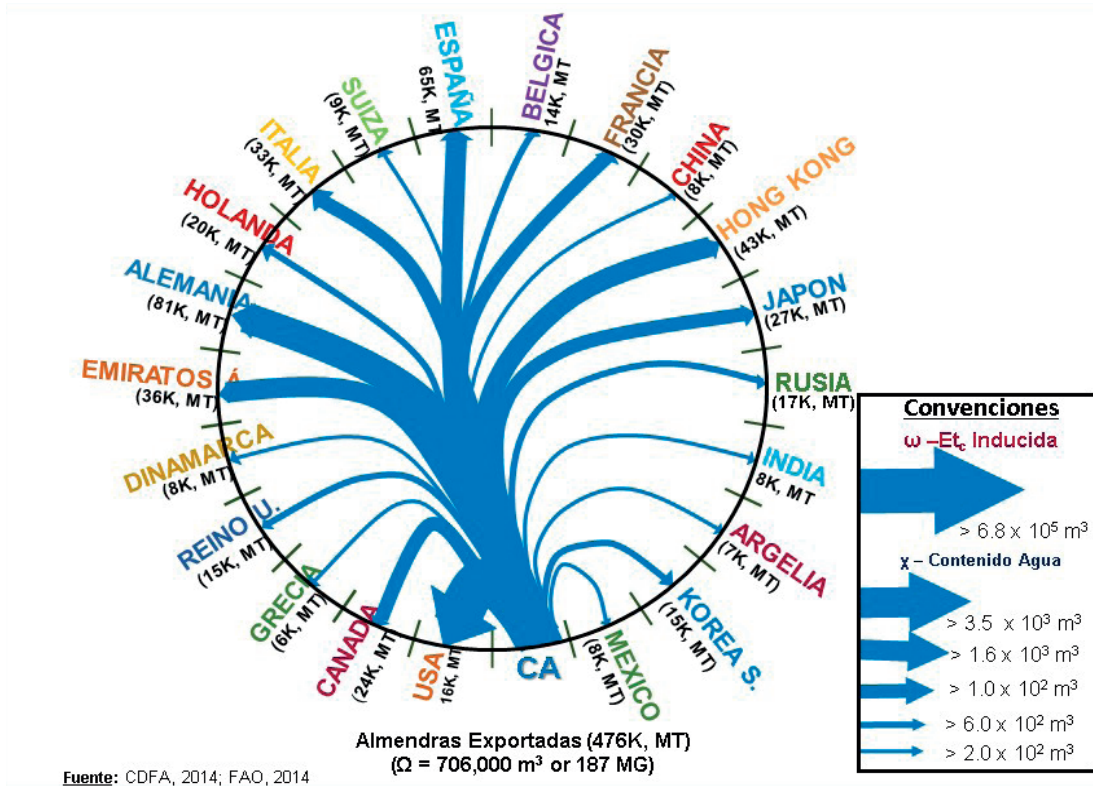
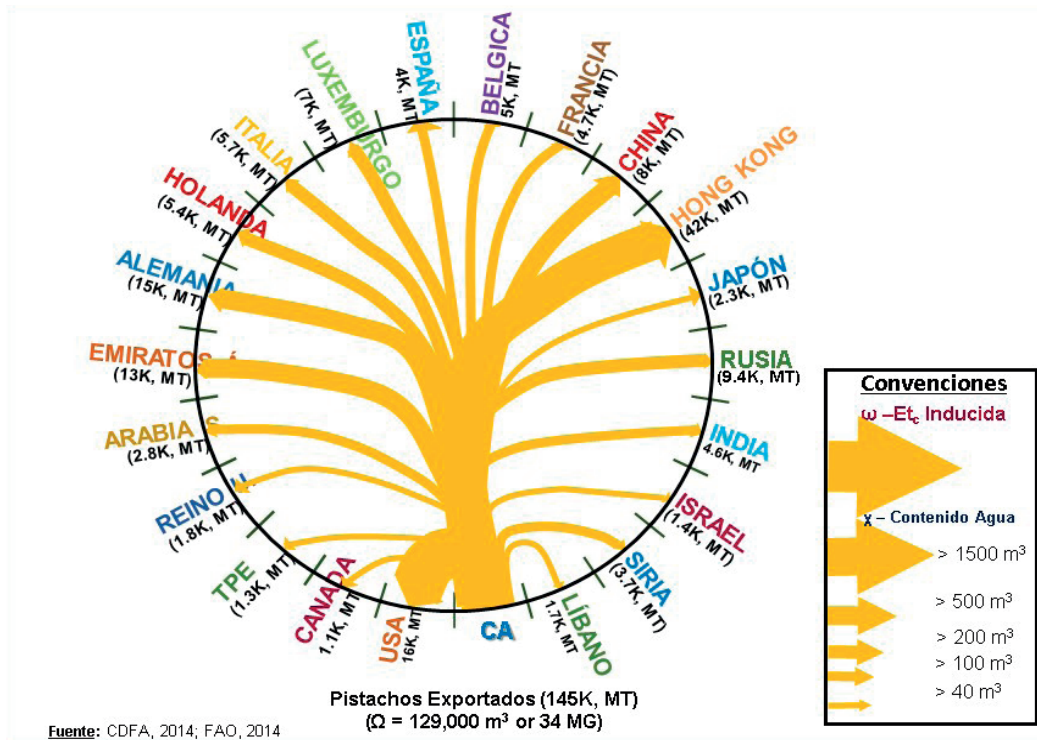


Figura 5 | Validación del Modelo. Comparación de resultados con los del modelo basado en sensores remotos.



Fuente: CDFA, 2014; FAO, 2014

Figura 6 | Exportación internacional de almendras desde California.



Fuente: CDFA, 2014; FAO, 2014

Figura 7 | Exportación internacional de pistachos desde California.

CONCLUSIONES

La investigación cuantitativa aplicada a las temáticas de agua exportada y huella virtual del agua se encuentra poco desarrollada. Metodologías robustas, aplicables a la cuantificación del agua exportada y de los valores empleados como referencia deben ser desarrolladas y difundidas. El presente trabajo muestra la importancia de incluir la evapotranspiración inducida y el contenido físico de agua en productos agrícolas exportados, en los análisis que se adelanten como insumo para la planeación y formulación de políticas públicas para la gestión de recursos hídricos.

Los resultados obtenidos a partir de la presente investigación deben ser considerados como estimaciones. Sin embargo, los mismos resaltan la necesidad de considerar el uso eficiente del agua en el riego agrícola y minimizar las pérdidas asociadas a la evapotranspiración.

Los recursos hídricos de California están siendo exportados fuera de sus fronteras en magnitudes muy superiores a las del agua consumida por los habitantes del estado. Si dicha tendencia continúa, el estado podría ser susceptible a restricciones en el abastecimiento de agua. Este hecho sugiere que California tiene el potencial de afectar negativamente el ambiente local como consecuencia de la exportación de cantidades de agua superiores a las que pueden estar disponibles naturalmente en su ciclo hidrológico.

La cuantificación de agua exportada a través de la agricultura es clave para el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático y para aumentar la resiliencia de los recursos hídricos. Se espera que la metodología y conclusiones presentadas en este estudio sean útiles para los administradores responsables de formulación de políticas, planificadores, investigadores, educadores y para todos aquellos relacionados con el manejo de los recursos hídricos.

REFERENCIAS

- Alcamo, J., Flörke, M., Märker, M. 2007. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 247-275. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.2.247>
- Aldaya, M.M., Martínez-Santos, P., Llamas, M.R. 2009. Incorporating the Water Footprint and Virtual Water into Policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. *Water Resources Management*, 24(5), 941-958. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9480-8>
- Allan, J.A. 1993. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. In *Priorities for Water Resources Allocation and Management*. ODA.
- Allan, J.A. 1994. Overall perspectives on countries and regions. In *Water in the Arab World: Perspectives and Prognoses*. Harvard University Press.
- Allan, J.A. 1998. Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. *Ground Water*, 36(4), 545-546. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>
- Allan, J.A. 2003. Virtual Water—The Water, Food, and Trade Nexus. Useful Concept or Misleading Metaphor? *Water International*, 28(1), 106-113. <https://doi.org/10.1080/02508060.2003.9724812>
- California Department of Finance, Demographic Research Unit. 2014. *E-1 Population Estimates for Cities, Counties, and the State*. January 1, 2015 and 2016. <http://www.dof.ca.gov/research/demographic/reports/estimates/e-1/view.php>
- California Department of Food and Agriculture. 2013. *California Agricultural Production Statistics*. CDFA > STATISTICS. <https://www.cdfa.ca.gov/Statistics/>
- California Department of Food and Agriculture. 2014. *California Agricultural Production Statistics*. <https://www.cdfa.ca.gov/Statistics/>
- California Department of Food and Agriculture. 2019. *California Agricultural Exports 2018-2019*. <https://www.cdfa.ca.gov/Statistics/>
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y. 2003. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products. In *Value of Water, Research Report No. 13* (UNESCO-IHE). <http://waterfootprint.org/media/downloads/Report13.pdf>

- Chen, Z.-M., Chen, G.Q. 2013. Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade. *Ecological Indicators*, 28, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.07.024>
- Dalin, C., Konar, M., Hanasaki, N., Rinaldo, A., Rodriguez-Iturbe, I. 2012. Evolution of the global virtual water trade network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(16), 5989-5994. <https://doi.org/10.1073/pnas.1203176109>
- Dietzenbacher, E., Velázquez, E. 2007. Analysing Andalusian Virtual Water Trade in an Input-Output Framework. *Regional Studies*, 41(2), 185-196. <https://doi.org/10.1080/00343400600929077>
- Fulton, J., Cooley, H., Gleick, P. 2012. *California's water footprint*. http://pacinst.org/app/uploads/2013/02/ca_ftprint_full_report3.pdf
- Fulton, Julian, Cooley, H., Gleick, P. H. 2014. Water Footprint Outcomes and Policy Relevance Change with Scale Considered: Evidence from California. *Water Resources Management*, 28(11), 3637-3649. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0692-1>
- Gleick, P.H., Palaniappan, M. 2010. Peak water limits to freshwater withdrawal and use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(25), 11155-11162. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004812107>
- Guan, D., Hubacek, K. 2007. Assessment of regional trade and virtual water flows in China. *Ecological Economics*, 61(1), 159-170. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.02.022>
- Hanasaki, N., Inuzuka, T., Kanae, S., Oki, T. 2010. An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model. *Journal of Hydrology*, 384(3-4), 232-244. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.028>
- Hoekstra, A.Y. 2003. *Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade*. <http://waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf>
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K. 2006. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35-48. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9039-x>
- Hoekstra, A.Y. (Ed.). 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K. 2011. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources* (1 edition). Wiley-Blackwell.
- Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q. 2002. *Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report Series No. 11*. UNESCO-IHE. <https://www.utwente.nl/ctw/wem/organisatie/medewerkers/hoekstra/reports/report11.pdf>
- Huang, G., Hoekstra, A.Y., Krol, M.S., Jägermeyr, J., Galindo, A., Yu, C., Wang, R. 2020. Water-saving agriculture can deliver deep water cuts for China. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104578. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104578>
- International Monetary Fund. (2014, April). *World Economic Outlook Database 2014*. <http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2014/01/weodata/index.aspx>
- International Organization for Standardization. 2014. *ISO 14046:2014 Environmental management—Water footprint—Principles, requirements and guidelines*. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:es>
- Irrigation Training and Research Center. 2003. ETc Table for Irrigation Scheduling and Desing. In *California Crop and Soil Evapotranspiration*. www.itrc.org/reports/pdf/californiacrop.pdf
- Konar, M., Dalin, C., Suweis, S., Hanasaki, N., Rinaldo, A., Rodriguez-Iturbe, I. 2011. Water for food: The global virtual water trade network. *Water Resources Research*, 47(5), W05520. <https://doi.org/10.1029/2010WR010307>
- Lenzen, M. 2009. Understanding virtual water flows: A multiregion input-output case study of Victoria. *Water Resources Research*, 45(9), W09416. <https://doi.org/10.1029/2008WR007649>

- Letey, J., Birkle, D. 2003. The Amount of Water We Eat. In *California WaterPlan, A Framework for action* (University of California Water Resources Center, Vol. 4). http://www.water.ca.gov/pubs/planning/california_water_plan_2005_update_bulletin_160-05_vol4complete.pdf
- Lo, M.-H., Famiglietti, J.S. 2013. Irrigation in California's Central Valley strengthens the southwestern U.S. water cycle. *Geophysical Research Letters*, 40(2), 301-306. <https://doi.org/10.1002/grl.50108>
- McElrone, A., Choat, B., Gambetta, G., Brodersen, C. 2013. Water uptake and transport in vascular plants. *ResearchGate*, 4. https://www.researchgate.net/publication/289110328_Water_uptake_and_transport_in_vascular_plants
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2011a. *National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption. Value of Water Research Report Series No. 50* (UNESCO-IHE). https://www.researchgate.net/publication/254859488_National_water_footprint_accounts_The_green_blue_and_grey_water_footprint_of_production_and_consumption
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2011b. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(5), 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2020. Sustainability of the blue water footprint of crops. *Advances in Water Resources*, 143, 103679. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103679>
- Mubako, S., Lahiri, S., Lant, C. 2013. Input-output analysis of virtual water transfers: Case study of California and Illinois. *Ecological Economics*, 93, 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.005>
- Nguyen, T.D. 2015. *Energy analysis of crop irrigation: Role of water reclamation and water exportation* [University of California, Irvine]. <https://escholarship.org/uc/item/82c981m3>
- Oki, T., Kanae, S. 2004. Virtual water trade and world water resources. *Water Science and Technology*, 49(7), 203-209. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0456>
- Postel, S.L., Daily, G.C., Ehrlich, P.R. 1996. Human Appropriation of Renewable Fresh Water. *Science*, 271(5250), 785-788. <https://doi.org/10.1126/science.271.5250.785>
- Schubert, H. 2011. *The Virtual Water and the Water Footprint Concepts*. Achatech. National Academy of Science and Engineering. Germany. <https://en.acatech.de/publication/the-virtual-water-and-the-water-footprint-concepts/>
- Sorooshian, S., AghaKouchak, A., Li, J. 2014. Influence of irrigation on land hydrological processes over California. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(23), 2014JD022232. <https://doi.org/10.1002/2014JD022232>
- United Nations General Assembly. 1994. *Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Droughts and/or Desertification, Particularly in Africa*. <http://legal.un.org/avl/ha/uncdd/uncdd.html>
- United States Department of Agriculture. 2012. *California Agricultural Statistics. 2012 Crop Year*. https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_State/California/Publications/California_Ag_Statistics/Reports/2012cas-all.pdf
- United States Department of Agriculture. 2013. *California Agricultural Statistics. 2013 Crop Year*. https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_State/California/Publications/California_Ag_Statistics/2013cas-all.pdf
- United States Department of Agriculture. 2014. *NDL/FNIC Food Composition Database Home Page*. <https://ndb.nal.usda.gov/>
- Verma, S., Kampman, D.A., van der Zaag, P., Hoekstra, A.Y. 2009. Going against the flow: A critical analysis of inter-state virtual water trade in the context of India's National River Linking Program. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 34(4-5), 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.05.002>
- Vörösmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., Lammers, R.B. 2000. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, 289(5477), 284-288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>

Wei, J., Dirmeyer, P.A., Wisser, D., Bosilovich, M.G., Mocko, D.M. 2013. Where Does the Irrigation Water Go? An Estimate of the Contribution of Irrigation to Precipitation Using MERRA. *Journal of Hydrometeorology*, 14(1), 275-289. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-079.1>

Wong, A.K., Owens-Viani, L., Steding, A., Gleick, P.H., Haasz, D., Wilkinson, R., Fidell, M., Gomez, S. 1999. *Sustainable use of water: California success stories*. Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security. USA. http://pacinst.org/app/uploads/2013/04/ca_water_success_stories1.pdf

Zhao, X., Chen, B., Yang, Z.F. 2009. National water footprint in an input–output framework –A case study of China 2002. *Ecological Modelling*, 220(2), 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.09.016>

Zhuo, L., Liu, Y., Yang, H., Hoekstra, A. Y., Liu, W., Cao, X., Wang, M., Wu, P. 2019. Water for maize for pigs for pork: An analysis of inter-provincial trade in China. *Water Research*, 166, 115074. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115074>

Zimmer, D., Renault, D. 2003. Virtual water in food production and global trade: Review of methodological issues and preliminary results. In *Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. <http://waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf>