



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA EN LA CUENCA LERMA-CHAPALA

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

Presenta:

CÉSAR BOTELLO AGUILLÓN



Bajo la supervisión de:

DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ, DIRECTOR

DRA. DORA M. SANGERMAN JARQUÍN, CODIRECTORA



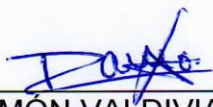
Chapingo, Estado de México, octubre de 2022.

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA EN LA CUENCA LERMA-CHAPALA

Tesis realizada por **César Botello Aguillón** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

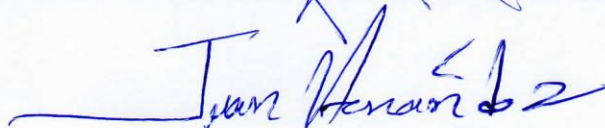
DIRECTOR:


DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ

CODIRECTORA:


DRA. DORA MARÍA DE JESÚS SANGERMAN JARQUÍN

ASESOR:


DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTIZ

ASESOR:


DR. FRANCISCO GERARDO GUTIÉRREZ GARCÍA

LECTOR EXTERNO:


DR. FERMÍN SANDOVAL ROMERO

CONTENIDO

CONTENIDO	iii
LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
ANEXOS	vi
ABREVIATURAS USADAS	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
DATOS BIOGRÁFICOS	ix
RESUMEN GENERAL	x
GENERAL ABSTRACT	xi

1 INTRODUCCIÓN GENERAL1

1.1 Antecedentes	1
------------------------	---

1.2 Problema de investigación	3
-------------------------------------	---

1.3 Justificación	4
-------------------------	---

1.4 Objetivos.....	5
--------------------	---

1.4.1 General	5
---------------------	---

1.4.2 Particulares	5
--------------------------	---

1.5 Hipótesis	6
---------------------	---

1.5.1 General	6
---------------------	---

1.5.2 Particulares	6
--------------------------	---

1.6 Estructura del documento.....	6
-----------------------------------	---

2 REVISIÓN DE LITERATURA.....8

2.1 Problemática de los recursos hídricos.....	8
--	---

2.2 La valoración de los recursos con programación matemática	13
---	----

2.3 La evaluación de la huella hídrica en la agricultura.....	18
2.4 Literatura citada.....	24
3 LA REASIGNACIÓN DEL AGUA EN LA AGRICULTURA EN CONDICIONES DE SEQUÍA COMO MAXIMIZADOR DE EFICIENCIA ECONÓMICA	38
3.1 Resumen	38
3.2 Abstract.....	39
3.3 Introduction	40
3.4 Materials and methods.....	42
3.5 Results and discussion.....	46
3.6 Conclusions	49
3.7 Acknowledgements	50
3.8 Referencias	51
4 ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA AGRÍCOLA DEL DR 011, ALTO RÍO LERMA.....	54
4.1 Resumen	54
Abstract	55
4.2 Introducción.....	55
4.3 Materiales y métodos.....	59
4.4 Resultados y discusión.....	64

4.5 Conclusiones.....	69
4.6 Literatura citada.....	70
5 Conclusiones generales	76
6 ANEXOS	77

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3-1. Crops established in the M02: Salvatierra and M05: Cortázar modules in the 2016-2017 period.....	44
Cuadro 3-2. Resources restriction for the lineal programming model.	45
Cuadro 3-3. Shadow prices of gravity-fed and land per irrigation module (MN\$ dam ⁻³).	46
Cuadro 3-4. Net income of the M02 and M05 irrigation modules in different availability and water market scenarios (millions MN\$).	49
Cuadro 4-1. Ubicación geográfica de los módulos de riego del DR 011, Alto Río Lerma.	61
Cuadro 4-2. Precio sombra del agua superficial para riego en el DR011.	63
Cuadro 4-3. Huella hídrica por componente de cada cultivo del DR 011.	64
Cuadro 4-4. Huella hídrica promedio de los cultivos del año agrícola 2020-2021 en el DR 011.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Posibles identidades donde se puede obtener la huella hídrica.	22
Figura 3-1. Water volume for gravity-fed irrigation used per module and each availability scenario.....	48
Figura 4-1. Ubicación del Distrito de Riego 011.	60
Figura 4-2. Metodología para el cálculo de la HH.	62
Figura 4-3. Huella hídrica total de los cultivos del año agrícola 2020-2021 en el DR 011 y su superficie de siembra.	67
Figura 4-4. Valor de la HH azul por tonelada de cultivos del M02 y M05.	68
Figura 4-5. HH azul de cultivos por módulo del DR 011.....	69

ANEXOS

Anexo 1. Información de Módulo 02 Salvatierra (Capítulo 3).	77
Anexo 2. Información de Módulo 05 Cortázar (Capítulo 3).....	79
Anexo 3. Información de producción por módulo de riego modalidad “riego por gravedad” (Capítulo 4).	81

ABREVIATURAS USADAS

CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DR	Distrito de Riego
DR011	Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
ICWE	Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ha	Hectárea(s)
t	Tonelada(s)
m ³	Metros cúbicos
dam ³	Decámetros cúbicos (1000 m ³)
mm	Milímetros
AV	Agua virtual
HH	Huella (s) hídrica (s)
PM	Programación matemática
PL	Programación lineal
O-I	Ciclo agrícola otoño-invierno
P-V	Ciclo agrícola primavera-verano

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el financiamiento otorgado para la realización de este doctorado.

Al personal de la jefatura del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma de la Comisión Nacional del Agua por la información proporcionada para la elaboración de la presente tesis.

A mi comité asesor, por su guía, paciencia y amistad durante esta etapa de académica.

A los profesores del programa del Doctorado en economía agrícola, por contribuir en mi formación.

A Lidia, mis padres, hermanos y familiares, por su apoyo constante durante todo este tiempo.

A mis amigos, cercanos y más cercanos, por ser parte importante durante esta etapa académica.

En especial al Ph.D. Francisco Gavi Reyes† por su ejemplo, orientación y apoyo para principiar en la investigación científica.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	César Botello Aguillón
Fecha de nacimiento	21 de febrero de 1991
Lugar de nacimiento	Querétaro, México
CURP	BOAC910221HQTGGS01
Profesión	M.C. en Hidrociencias

Desarrollo académico

Licenciatura	Ingeniería en Irrigación
Cédula profesional	9881081
Maestría	Maestría en Ciencias en Hidrociencias
Cédula profesional	11679101

RESUMEN GENERAL

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA EN LA CUENCA LERMA-CHAPALA¹

El agua puede ser considerada un recurso económico; al ser un recurso limitado e indispensable para casi todas las actividades humanas, tiene un valor económico, conocer su valor ofrece información valiosa en la gestión de la oferta y la demanda del recurso. La estimación de la huella hídrica (HH) de la agricultura permite identificar los cultivos que utilizan agua eficientemente. La investigación contiene dos artículos; el primer artículo incluye la construcción de un modelo de PL para conocer la asignación del agua entre los diferentes cultivos, así como su precio sombra sujeto a la disponibilidad de recursos (agua y tierra) en distintos escenarios de escasez (15, 30 y 50% menos que un año típico), en el segundo, se estimó la HH de la producción agrícola usando la metodología propuesta por Hoekstra *et al.* (2011). Se encontró que la existencia de un mercado de agua permite que los volúmenes de agua puedan reasignarse de un módulo de riego a otro obteniendo un mayor beneficio (diferencia de 7.6%, 7.4% y 11.7%) respecto a los mismos escenarios sin mercado de agua, con respecto a la HH se encontró que los cultivos de maíz, sorgo, alfalfa y trigo tienen alto peso en términos de HH, participando respectivamente con 19.3%, 15.5%, 14.4% y 11.3%, y con una representación respectiva de 47.4%, 12.89%, 7.46% y 23.5% de la producción total del DR 011. Los resultados de la investigación son una base para generar una política de mercado de las transmisiones agua, así como la implementación de la evaluación de la huella hídrica, para reasignar el agua de los cultivos de bajo valor a cultivos de mayor valor y promover el aumento en la eficiencia del uso de los recursos hídricos.

Palabras clave: mercados de agua; eficiencia; optimización; huella hídrica; uso del agua en la agricultura.

Tesis de Doctorado en Ciencias, Programa de Doctorado en Economía Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: César Botello Aguillón

Director de Tesis: Dr. Ramón Valdivia Alcalá

GENERAL ABSTRACT

ECONOMIC VALUATION OF WATER IN THE LERMA-CHAPALA BASIN

Water can be considered as an economic resource; being a limited and indispensable resource for almost all human activities, it has an economic value, knowing its value offers valuable information in the management of supply and demand for the resource. The estimation of the water footprint (WF) of agriculture allows identifying the crops that use water efficiently. The research contains two articles; the first article includes the construction of an LP model to know the allocation of water among the different crops, as well as its shadow price subject to the availability of resources (water and land) in different scarcity scenarios (15, 30 and 50% less than a typical year), in the second one, the WF of agricultural production was estimated using the methodology proposed by Hoekstra et al. (2011). It was found that the existence of a water market allows water volumes to be reassigned from one irrigation module to another obtaining a greater benefit (difference of 7.6%, 7.4% and 11.7%) compared to the same scenarios without a water market. , with respect to WF, it was found that corn, sorghum, alfalfa and wheat crops have a high weight in terms of WF, participating respectively with 19.3%, 15.5%, 14.4% and 11.3%, and with a respective representation of 47.4% , 12.89%, 7.46% and 23.5% of the total production of ID 011. The results of the investigation are a basis for generating a market policy for water transmissions, as well as the implementation of the evaluation of the water footprint, to reallocate water from low-value crops to higher-value crops and promote increased efficiency in the use of water resources.

Keywords: water markets; efficiency; optimization; water footprint; water use in agriculture.

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: César Botello Aguillón

Advisor: Dr. Ramón Valdivia Alcalá

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Aunque los problemas relacionados con la escasez del agua se han registrado desde hace décadas, en los últimos años derivado del crecimiento poblacional y de las actividades económicas asociadas a este proceso, lo han puesto de manifiesto de manera contundente. Esta situación se ha agravado prácticamente en todo el mundo, por la contaminación de los mantos acuíferos y su sobreexplotación, así como por la manifestación de fenómenos climatológicos extremos debido al cambio climático.

1.1 Antecedentes

El agua ha sido uno de los pilares fundamentales en el desarrollo de cualquier civilización, hace muchos años, se consideraba el agua como un recurso inagotable, lo que ocasionó que, durante mucho tiempo, al percibirse como un recurso abundante, se actuaba como si este recurso no tuviera valor y no se priorizara en su conservación.

Las consecuencias de un uso inadecuado y desmedido del agua dulce han sido debatidas por décadas; sin embargo, aún no se han solucionado y estas van en aumento, en la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (ICWE) (WMO, 1992) tuvo lugar en Dublín (Irlanda) del 26 al 31 de enero de 1992 y donde participaron 114 países, se aportó gran parte de la información sobre los problemas del agua dulce y se hizo hincapié en que la salud y el bienestar humanos, la seguridad alimentaria, el desarrollo económico y los ecosistemas estaban en peligro, si los recursos de aguas y tierras no se manejaban con más eficiencia en el futuro (FAO, 1993).

La ICWE se resumió en cuatro principios, los primeros tres fueron rápidamente consensuados, y finalmente después de un amplio debate, el cuarto principio concluye en que el agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico. Desarrollos teóricos han demostrado que el agua tiene una serie de

características sociales, económicas, culturales, etc., que lo hacen un recurso especial, pero que al igual que otros insumos para la producción tiene valor económico (WMO, 1992).

El concepto de agua virtual fue introducido por Allan (1993, 1994). Cerca de una década más tarde, obtuvo el reconocimiento mundial de la importancia de este concepto para lograr la seguridad hídrica regional y mundial, poco antes de que el concepto de huella hídrica fuera introducido en una reunión internacional de expertos sobre comercio de agua virtual en el año 2002. Hoekstra y Hung (2003) enunciaron la idea de la huella hídrica para saber acerca de esta cantidad total de sustancia de agua virtual de todos los productos consumidos por una persona o por un país. Presentaron la huella hídrica como un marcador de uso del agua que está detrás de cada producto, consumida por un individuo o un país y la aseguraron como un buen sistema de seguimiento de un país para conocer sus recursos hídricos (Muthu, 2019).

En la actualidad se conocen tres aspectos principales que caracterizan la escasez del agua: la falta física de agua disponible para satisfacer la demanda; el nivel de desarrollo de las infraestructuras que controlan el almacenamiento, distribución y acceso y la capacidad institucional para aportar los servicios de agua requeridos (FAO, 2013). También se sabe que hay muchos métodos para valorar el agua y su aportación a los diferentes procesos productivos. Cada uno tiene un contexto específico de aplicación y ciertas ventajas y limitaciones.

La valoración del agua se puede clasificar de acuerdo con las técnicas cuantitativas empleadas; éstas son: las técnicas inductivas y las técnicas deductivas. Las últimas son las más utilizadas para valorar el agua en las buenas manifestaciones de los productores: se basan en el método residual general, estos modelos pueden ser un simple costo de cultivo agrícola y un presupuesto de retorno neto para un cultivo o pueden extenderse a modelos de programación matemática que describen la asignación óptima del agua de la finca (o del distrito de riego) y otros recursos (tierra, capital, mano de obra y otros insumos de la unidad de producción) entre varios cultivos potenciales, y

derivan el aporte de agua, el rendimiento de los cultivos y el retorno neto al agua como parte de la solución (Young y Loomis, 2014).

Para atacar el problema de escasez hídrica, existen dos métodos; el primero es fortalecer las estrategias de suministro, el segundo es mejorar la gestión de la demanda, incluso lo ideal es la combinación de ambos planes (Griffin, 2016). En la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible con la participación de 193 naciones, se menciona que la escasez hídrica afecta a los países menos desarrollados en el mundo, influye en la hambruna y en una mala alimentación, también se estima que para 2050, es probable que al menos la cuarta parte de la población viva en un país afectado por una escasez severa de agua dulce (CEPAL, 2019).

1.2 Problema de investigación

Los sistemas agroalimentarios, al depender en gran medida de los procesos climáticos, biológicos, físicos y químicos, se enfrentan a múltiples impactos y tensiones potenciales, las consecuencias pueden ser muy adversas. La amplificación de la vulnerabilidad de los sistemas agroalimentarios a múltiples impactos y tensiones socava las capacidades de los actores para prevenir, anticipar, absorber, adaptar y transformar, por ejemplo, la sequía, pueden reducir el suministro de alimentos. La FAO (2021) ha estudiado la sequía, sus causas y efectos, el impacto de un choque como una sequía severa puede mitigarse mediante inversiones preventivas y anticipatorias en riego; sin embargo, la sequía aún puede tener efectos devastadores si las aguas superficiales o subterráneas ya están sobreexplotadas.

La CONAGUA (2020), menciona que existen zonas donde la competencia por el agua entre la industria, servicios y la agricultura ha ido en aumento, principalmente, se sabe que la agricultura es la actividad que más agua demanda para su desarrollo, consumiendo cerca de 70% del total de agua dulce disponible pero no tiene la mayor eficiencia económica, lo que ha permitido justificar la presión de la industria, además en las áreas donde se

desarrolla existe gran concentración al igual que zonas pobladas y que van en aumento: “la combinación de factores, como crecimiento de la población, aumento de la urbanización, extracción de agua para uso agrícola, sequías y deterioro de la calidad del agua, implica una mayor presión sobre los recursos hídricos en todo el mundo” (Borrego *et al.*, 2018).

El distrito de riego 011 (DR 011) Alto Río Lerma en el estado de Guanajuato, cuya ubicación en el corredor industrial del bajío, hace que los sectores económicos compitan por el agua de manera evidente, provocando afectaciones en los rendimientos de la producción agrícola a causa de la disminución de volúmenes disponibles de agua. Se requiere por tanto conocer la productividad del agua en los diferentes cultivos y las posibilidades de reasignar el recurso entre módulos de riego con la finalidad de aumentar la eficiencia en su uso; además de estimar la HH en los principales cultivos para buscar mejoras en su utilización.

1.3 Justificación

Gracias a los avances científicos y tecnológicos en el tema del agua, hay una mejor comprensión de los procesos que determinan la disponibilidad a lo largo del ciclo del agua. También, se ha profundizado en las implicaciones institucionales que regulan los intercambios entre los sistemas ecológico y socioeconómico, y los precursores de la aparente escasez de agua.

En la agricultura, aumentar la eficiencia económica con la reasignación del agua a cultivos de mayor valor es una salida que garantiza a los usuarios aumentar sus ganancias. Young y Loomis (2014), mencionan que para usos del agua donde se involucra la toma de decisión del gobierno es necesario estimar los precios sombra para guiar la asignación eficiente del agua. La programación lineal se ha utilizado en una amplia variedad de aplicaciones de análisis de decisiones como un medio de ayuda a personas y organizaciones en su decisión final (Kaiser y Messer, 2011).

Existen ventajas y limitaciones en la utilización de los enfoques de huella hídrica (HH) y agua virtual. Entre las ventajas se encuentra el hecho de permitir dar sentido a la idea de transversalidad requerida en la implementación de la política hídrica del país. En segundo lugar, es posible identificar un régimen de prioridad para el diseño de incentivos basados en los diferentes tipos HH para el desarrollo de la infraestructura correspondiente. En tercer lugar, la facilidad de la articulación de estrategias comerciales en el sector externo que reducen la presión sobre los recursos hídricos locales (Pérez *et al.*, 2016).

La eficiente distribución y comercialización de insumos agropecuarios es fundamental para el desarrollo económico, esto incluye el agua. El caso de la comercialización del agua tiene consideraciones que la hacen diferente a otros insumos, estas consideraciones incluyen las características que tienen los derechos de agua. Cuando los derechos de agua son totalmente transferibles y los contratos entre actores involucrados son respetados por la ley, es factible una gran variedad de instrumentos de mercado para comerciar el recurso, siempre y cuando los agentes estén motivados por las diferencias en sus valores marginales del agua (Griffin, 2016).

1.4 Objetivos

Los objetivos se dividen en un objetivo general y objetivos particulares.

1.4.1 General

Valuar económicamente los recursos hídricos utilizados en la agricultura de Celaya para mejorar la gestión de la demanda y su distribución entre sus varios usos.

1.4.2 Particulares

Identificar la productividad del agua en los módulos de riego del DR 011 con diferentes características que sirva de referencia para fijar cuotas y precios del agua en las transmisiones de derechos aplicadas dentro del mismo distrito.

Evaluar un esquema de un mercado de agua para las transmisiones de derechos de agua rodada entre los productores de los módulos de riego del DR011 que permita incrementar la eficiencia económica del uso del agua.

Estimar la huella hídrica de la producción agrícola del DR011 para proponer medidas que contribuyan a mejorar la eficiencia del uso del agua en el DR.

1.5 Hipótesis

Del mismo modo que los objetivos se dividen en una hipótesis general y particulares y cada una corresponde a un objetivo.

1.5.1 General

La valoración económica de los recursos hídricos en la agricultura de Celaya ejerce un papel preponderante en la gestión de la demanda y en una mejor distribución entre sus varios usos.

1.5.2 Particulares

La productividad del agua sirve para fijar cuotas y precios del agua en las transmisiones de derechos de agua.

Los mercados de agua permiten transferir agua entre usuarios, incluidos los de cultivos de bajo valor a cultivos de mayor valor, así como de cultivos con mayor uso de agua a aquellos con menor uso.

La estimación de la huella hídrica de la producción agrícola permite la identificación de cultivos que pueden reducir su huella hídrica en favor de aumentar la eficiencia del uso del agua.

1.6 Estructura del documento

Esta parte final del presente capítulo 1, que abarca la introducción general, describe brevemente cada uno de los siguientes capítulos de la tesis.

El capítulo 2 contiene la revisión de literatura de los temas principales que se abordan en el documento e incluye la revisión de trabajos relacionados con los capítulos 3 y 4.

En el capítulo 3 se presenta un primer artículo científico, donde se construye un modelo de programación lineal que simula un mercado de agua entre dos módulos de riego del DR 011, con la finalidad de evaluar un mercado de agua en escenarios de escasez.

El capítulo 4 contiene un manuscrito que se guía con la metodología propuesta por Hoekstra *et al.* (2011) para obtener una estimación de la huella hídrica de la producción agrícola en el DR 011 con la finalidad de identificar los cultivos que pueden reducir su huella hídrica para hacer un uso eficiente de los recursos hídricos.

Por último, en el capítulo 5 se redactaron las conclusiones a las que se llegaron con la elaboración del presente documento.

.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

Este capítulo se utilizó para el desarrollo de tres temas que comparten relación con los próximos dos; el primero detalla la problemática de los recursos hídricos, a pesar de que por décadas se ha presentado un panorama de escasez y gobernanza del agua, una demanda ambiental por parte del ser humano ha incrementado la presión del cuidado de este recurso.

El segundo tema habla sobre la valoración de los recursos, específicamente con las técnicas de programación matemática y es adecuado abordarlo de esa manera para darnos una idea del uso que se ha dado a la PM para hacer modelos de optimización que ayudan en la gestión de los recursos hídricos, el último tema tiene que ver con la HH en la agricultura, donde se aborda desde una pequeña reseña de cómo se desarrolló el concepto hasta su aplicación en la agricultura.

2.1 Problemática de los recursos hídricos

En el planeta, la actual y futura problemática general del agua, es similar a la problemática que se ha presentado desde varias décadas atrás, a pesar de ello pueden existir algunas diferencias. Lo anterior es necesario tenerlo en cuenta para manufacturar las respuestas predecibles y los tipos de análisis que ayudan a desarrollar metodologías que atenderán la problemática futura.

Al figurar como capas, a los recursos naturales, la población y al cambio climático, se crea un escenario donde se acentúa la brecha entre oferta y demanda de los recursos hídricos en los sectores doméstico, agrícola e industrial, impactando de forma negativa al medio ambiente (Arreguín *et al.*, 2020).

Los elementos centrales que permiten observar la competencia entre los sectores son: La estimación de un incremento de 2 500 millones de habitantes de población urbana para el año 2050 (ONU, 2018); predicción de un aumento del 10% en la extracción de agua para la producción de alimentos en el mismo

año (FAO, 2011) y el posible impacto del cambio climático en la reducción del rendimiento de los cultivos mundiales en 30% para 2080 (ONU, 2019).

El crecimiento continuo de la población seguirá durante las próximas décadas; es decir, habrá un aumento continuo en la demanda, a su vez, resultará en una mayor escasez de agua con el tiempo. Algunas demandas de agua crecerán más rápido que otras y las consecuencias serán un deseo público por la redistribución del suministro disponible, un interés continuo en nuevos desarrollos hídricos y una mayor evolución de la política del agua (Griffin, 2016).

El agua es sinónimo de avance económico y desarrollo, ya que es esencial para el desarrollo socioeconómico, ecosistemas saludables y la supervivencia humana (CONAGUA, 2015), cuando una población se vuelve más próspera debido a las mejoras en salud, naturaleza, urbanización, energía, industria, alimentación y equidad, del mismo modo su demanda total de agua aumenta.

El mejoramiento del medio ambiente o prevención de su deterioro ha ido en aumento en las últimas décadas y se espera que siga creciendo, esto en gran medida debido a que se ha dado mayor valor a que grandes cantidades de agua permanezcan en un solo lugar, ya sea en la superficie o debajo de ella, y que permanezcan relativamente libres de contaminación (Young y Loomis, 2014).

El suministro de agua no está aumentando; en realidad, se está reduciendo en zonas semiáridas y vulnerables (ONU, 2020), causando una menor cantidad de precipitaciones y un aumento de la evapotranspiración, afectando a las ciudades, a la generación de energía hidroeléctrica y a la agricultura, por causas seculares de contaminación y el calentamiento global (Wada, *et al.*, 2016).

El incremento del efecto invernadero ocasionado por el calentamiento global puede aumentar la demanda de agua, debido a que se espera que un clima de mayor energía provoque más evapotranspiración, a su vez mayores

precipitaciones por lo que se prevé que aumenten las demandas de almacenamiento de embalses y control de inundaciones, sin embargo, los mejores sitios de represas están ocupados (Griffin, 2016).

Arreguín *et al.*, (2020), afirman que “con el objetivo de mejorar la gestión integral del agua en la cuarta Revolución Industrial, México está obligado a invertir los recursos necesarios en investigación y desarrollo tecnológico”, es necesario la innovación tecnológica para el modelado de presas, de tal modo que se monitoreen las variables de control de una forma correcta en el presente y en el futuro; es decir, el desarrollo debe tener una forma diferente a la que tuvo en el pasado, aprovechando las nuevas opciones disponibles.

La infraestructura en lo referente a presas en nuestro país se está depreciando, el auge en la construcción de presas en México abarcó 50 años, a partir de 1950 y sobre todo en las décadas de 1950 y 1960 (Domínguez, 2019) y no estaban diseñadas para una vida útil tan larga, por lo que la mayoría de las presas de esa época cuentan con un gran deterioro y severos niveles de sedimentación que merman su capacidad de almacenamiento con el que fueron diseñadas.

La energía hidroeléctrica aporta alrededor del 85 % de la electricidad renovable mundial (de Souza *et al.*, 2018) y la demanda aumentará en más de una cuarta parte hasta 2040 (Valdés, 2020), a medida que suban los precios de otros tipos de energía relacionada a los combustibles fósiles no renovables, debido a su vez, por la creciente escasez de estos mismos tipos de energía, aun así, la construcción y el reemplazo de infraestructura requiere de grandes cantidades de capital, lo que implica que las estrategias de mejora del suministro de agua sean demasiado costosas.

El emplazamiento de las mejoras en la infraestructura hídrica de nuestro país se debe en gran medida a una limitada política hídrica, que detiene su desarrollo por las tensiones derivadas con la población respecto a los incrementos en las tarifas que surgirían por el servicio (Martínez *et al.*, 2021b), pero hay un costo

eventual que se debe enfrentar, de modo que una perspectiva actual, es una gobernanza hídrica urgente.

Otro problema importante, derivado de la falta de adecuadas políticas públicas hídricas, es la salud pública relacionada con la calidad y la seguridad del agua potable (Cañez, 2022) que, debido a la presión de los recursos hídricos en el país, una de las prioridades a nivel nacional debe ser el garantizar que a las aguas residuales generadas por las diferentes actividades económicas, se les dé un tratamiento efectivo en su totalidad (Vidal, 2019), para garantizar que la población tenga acceso de una forma segura de disponer de agua potable y que se garantice la gestión integral de los recursos hídricos.

La suma de los problemas que hacen difícil la gestión del agua, con el tiempo agudizarán los problemas sociales del agua, convirtiéndolos cada vez de mayor interés para los tomadores de decisiones. Las variables en el ciclo hidrológico varían en el tiempo y espacio (Sheffield *et al.*, 2018), por lo cual se dificulta predecir en que región o años se tendrán problemas con la escasez del agua, sin embargo, se espera que ocurra con mayor frecuencia e intensidad en regiones que actualmente ya han presentado problemas hídricos y surja en lugares que aún no los conocen (Griffin, 2016).

La creciente escasez del agua impulsará mejores instituciones, principalmente porque tiene diversos usos; cantidades básicas para beber, cocinar, limpiar e higienizarse para mantener el bienestar humano, necesidades para bienes y servicios, como la producción de alimentos y artículos industriales, el transporte, las comunicaciones y la eliminación de desechos y deseos como usos en la recreación, ocio y lujo (Gleick, 2003), además el agua ayuda al mantenimiento del medio ambiente, quien ayuda a sostener toda la vida en la Tierra (Panceri, 2021), de tal modo que debemos preocuparnos por proveer agua para tal propósito.

El artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (2021), declara que “toda persona tiene derecho al acceso, disposición y

saneamiento de agua para consumo personal y doméstico” (CPEUM, 2021) y que el estado debe garantizar este derecho, sin embargo, no está bien definido si es a costa de las demandas ambientales, por ejemplo, Moscoso y Salazar (2019), resaltan el hecho de que el abordaje del agua en la cuestión ambiental es de carácter político y eminentemente económico, pues es necesario que se asuman acciones concretas para mantener el posicionamiento de defensor y protector del medio ambiente.

Tietenberg (2003), expresa que la economía es antropocéntrica, por lo que, si algunas personas tienen demandas ambientales, éstas son tomadas en cuenta del mismo modo que son tomadas otras demandas que se derivan de necesidades humanas. A nivel mundial la protección del medio ambiente ha evolucionado, transitando desde un enfoque antropocéntrico a una orientación a la sostenibilidad (Vidal y Asuaga, 2021), de tal modo, que estas demandas ambientales de agua deben compararse con las demandas humanas directas para identificar opciones de suministro eficientes.

La variedad de demandas del agua por el ser humano se convierte en un problema sobre el nivel de importancia de los usos del agua por la falta de mecanismos de toma de decisiones (Tagle y Caldera, 2019), principalmente por el debate de posturas que tienen que ver si, el agua, debe ser tomada como un bien económico o como un derecho humano, además la planificación del agua debe establecerse en los ámbitos local, estatal, cuenca hidrológica, región hidrológica-administrativa y nacional.

Por tanto, es necesario el uso de instrumentos económicos que pretenden satisfacer las necesidades de agua mediante la reasignación de los recursos existentes entre los usuarios, por ejemplo, la valoración económica, que en las últimas décadas se ha convertido en una importante herramienta para los procesos de toma de decisiones (Laurans *et al.*, 2013; Ripka de Almeida *et al.*, 2018; Tinch, 2019).

Otro concepto importante que nos sirve para establecer un manejo eficiente del agua y el establecimiento de objetivos es la huella hídrica (Hoekstra, 2017; Aivazidou *et al.*, 2018), el cual calcula el consumo de agua necesaria utilizada de cualquier producto o servicio a lo largo de toda la cadena de producción, haciendo referencia al tipo de agua (azul, verde y gris), cuando y en donde se utiliza.

2.2 La valoración de los recursos con programación matemática

Para la valoración de los recursos hídricos en la agricultura, se utilizan para ello distintos métodos. Con el propósito de presentar una idea clara del tema que se aborda en el tercer capítulo del presente documento, a continuación, se expone el desarrollo del estado del conocimiento, respecto a la valoración económica con programación matemática (PM).

El desarrollo de la programación matemática desde sus orígenes a principios del siglo XVII, XVIII y XIX (Camero *et al.*, 2016), en su relación con la investigación de operaciones, su aparición a través de las diferentes formas (Programación lineal, no lineal, dinámica, entera) en el siglo pasado (Chakraborty *et al.*, 2020) y hasta como la se conoce hoy en día, con el apoyo de los softwares actuales, es muy basta, a fin de acotar la profundización del tema, se abordará principalmente el uso de la PM, especialmente el tipo de programación lineal, como herramienta para la valoración económica.

La programación matemática en la agricultura tuvo su origen en los intentos de modelar la economía de la producción agrícola, incluyendo su dimensión espacial. El formato de programación matemática, a veces conocido como análisis de procesos o análisis de actividades, es particularmente adecuado para la agricultura. Agricultores, agrónomos y otros especialistas agrícolas que comparten una forma común de pensar acerca de los insumos y productos agrícolas en términos del ciclo de cultivo anual y los coeficientes de insumo-producto por cualquier unidad de tierra encontraron en esta herramienta un auxiliar muy potente (Norton y Hazell, 1986).

Los modelos de PM son un tipo de modelo de optimización, donde existe un conjunto de variables de decisión sometidas a un conjunto de restricciones que deben maximizar las ganancias o minimizar los costos representados por una función objetivo (Norton y Hazell, 1986; Pérez, 2019). Existen distintos tipos de programación dentro la PM, por ejemplo; programación lineal, programación lineal entera mixta, programación cuadrática, programación no lineal, entre otras y se distinguen por el carácter de las funciones que intervienen (lineales o no lineales) y de las variables (reales/continuas o enteras/discretas) (Ramos *et al.*, 2010).

Los modelos de programación lineal y cuadrática son más utilizados que todos los otros tipos y abarcan cualquier tipo de actividad humana como finanzas (Mussafi y Ismail, 2021), economía de la energía (Aji *et al.*, 2018; McLarty *et al.*, 2019), economía ambiental (Bekchanov y Mirzabaev, 2018), toma de decisiones (Garg, 2018; Van Dooren, 2018), ingeniería química (Okoro *et al.*, 2020), ingeniería forestal (Utkin *et al.*, 2020), agronomía (Pineda y Torres, 2017; Quintana *et al.*, 2021), etc.

En economía del agua, los modelos de PM frecuentemente se utilizan para cuantificar los beneficios de los cambios en la asignación o calidad del agua para la producción agrícola (Florencio *et al.*, 2002; Rubiños *et al.*, 2007; Ren *et al.*, 2017) o industrial (Wong *et al.*, 2020; Kung y Wu, 2021), considerando objetivos administrativos, económicos y ecológicos., con el fin de maximizar ingresos netos, sujetos a la restricción de la disponibilidad de recursos o acuerdos institucionales.

La PM se ha adaptado a la valoración del agua de riego en las últimas décadas, además, el uso principal de los modelos de PM en la valoración del agua se encuentra en la agricultura (Young y Loomis, 2014) y tiene una relación inmediata con algunos de los temas más discutidos en la literatura; la asignación de recursos hídricos, el cambio climático, la calidad del agua y el riego agrícola (Archibald y Marshall, 2018) encontrando una correlación entre la

ubicación de los autores y las regiones que enfrentan problemas particulares con la gestión de los recursos hídricos.

La programación lineal (PL) es un enfoque de resolución de problemas ampliamente utilizado en métodos cuantitativos, consiste en determinar el valor óptimo de una función lineal sujeta a un conjunto de restricciones lineales, estas técnicas se han convertido en herramientas poderosas que a menudo se utilizan para mejorar la toma de decisiones gerenciales (Kaiser y Messer, 2011).

En la construcción de un modelo de PL hay cuatro supuestos a considerarse; la proporcionalidad, la aditividad, la divisibilidad y la certeza de todos los parámetros. Los supuestos de proporcionalidad y aditividad garantizan que todas las ecuaciones en un programa sean lineales (Kaiser y Messer, 2011). Si bien las suposiciones de divisibilidad y certeza pueden ser poco realistas para algunas aplicaciones, la PL sigue siendo la ayuda más utilizada entre los tomadores de decisiones debido a que en muchos casos, los problemas ambientales y de recursos naturales involucran aspectos que los modelos lineales, en el mejor de los casos, pueden ser aproximaciones razonablemente buenas para el mundo real.

En cuyo caso la empresa, cuenca o distrito de riego a modelar, no experimente rendimientos constantes a escala, o si sus actividades no son independientes, la programación no lineal PNL puede ser más apropiada porque puede manejar la relajación de los dos primeros supuestos y del mismo modo, la PNL se ha empleado para asignar eficientemente agua de riego a distintos cultivos (Tang *et al.*, 2019), calcular precios sombra para evaluar un mercado de agua (Rodríguez *et al.*, 2019), diseñar redes óptimas de agua agrícolas (Núñez *et al.*, 2018), entre otras aplicaciones que giran en torno a los recursos hídricos.

A nivel cuenca basándose en la programación lineal, Ahmad *et al.* (2018), demostraron que un modelo para la asignación óptima de los recursos hídricos entre los sectores que compiten por la demanda de agua, proporciona una motivación para el ahorro de agua y alivió el conflicto entre la demanda y el

suministro de agua al introducir juntos los conceptos de índice de satisfacción y beneficios económicos.

Un modelo de PL de enteros mixtos de dos etapas para la gestión del agua agrícola, que considera los requisitos de agua ecológica, permite que los tomadores de decisiones pueden obtener soluciones óptimas de acuerdo con sus propias preferencias y actitudes de aversión al riesgo manteniendo ecosistemas saludables (Zhang y Guo, 2018).

Como el mayor usuario de agua del mundo, la agricultura de riego se verá cada vez más orillada a usar menos agua de la que idealmente usaría. Los modelos de programación lineal multiobjetivo de intervalo en un distrito de riego dentro de una cuenca hacen posible encontrar vínculos efectivos entre la promoción de ingresos, producción y el ahorro de agua, y ofrece conocimientos sobre las compensaciones para la gestión del agua de riego en condiciones de incertidumbre (Li *et al.*, 2018).

En las mismas condiciones, Zhou *et al.* (2019) demuestran que, con un enfoque de programación lineal robusto, es factible obtener decisiones de gestión fiables y sólidas que son inmunes a la incertidumbre atribuible a las perturbaciones de los datos del modelo, sin violar restricciones, como las restricciones de suministro de recursos naturales, restricciones de capacidad de carga ambiental y restricciones de control de contaminación ambiental.

Debido que los agricultores toman en cuenta la limitación de agua, es posible que deban ajustar sus patrones de cultivo. El uso de la PL para determinar el precio sombra del agua de riego y calcular tarifas para el riego pueden indicar el patrón óptimo de cultivos que maximice las ganancias de los agricultores e indicar si el precio que se paga por el agua en una región puede considerarse una transferencia justificada de la sociedad por tratarse de un recurso tan valioso para la vida humana (Ramírez *et al.*, 2019).

En distritos de riego, donde en general no se opera con un óptimo económico, con ayuda de un modelo de PL que optimice los recursos disponibles para la producción y que cumpla con las restricciones impuestas (agua y tierra), se obtiene un patrón de cultivos que puede incrementar la superficie a sembrar (Torres *et al.*, 2020), así como permitir el incremento del ingreso neto total de los distritos (Pineda *et al.*, 2019).

En la agricultura, aumentar la eficiencia económica con la reasignación del agua a cultivos de mayor valor hace posible a los usuarios aumentar sus ganancias (Martínez *et al.*, 2021a). El criterio económico que se cumple en la reasignación del agua en los cultivos en un modelo de programación matemática cumple con la condición de optimización económica de ingreso marginal igual al costo marginal (Norton y Hazell, 1986; Beattie y Taylor, 1985). Young y Loomis (2014) mencionan que para usos del agua donde se involucra la toma de decisión del gobierno es necesario estimar los precios sombra para guiar la asignación eficiente del agua.

El uso de las transmisiones de agua son un instrumento que permite la asignación del recurso hídrico hacia actividades más rentables, incluso dentro del mismo sector y acuífero. Las transmisiones de derechos “representan el mejor camino que existe para llegar a la asignación óptima del agua a las actividades en donde la productividad marginal es mayor y, por tanto, donde el beneficio obtenido por su uso también es el máximo” (Sosa *et al.*, 2018).

El análisis de los datos de precio disponibles sobre transacciones en el comercio de agua de una región es valioso para comprender la política del agua y puede aportar ideas para otras regiones que tengan dificultades con las necesidades de agua agrícolas, urbanas y ambientales frente a suministros cada vez más variables (Colby y Isaaks, 2018).

Con un modelo de PM positiva calibrado que permita la exportación e importación de agua entre módulos de riego dentro de un distrito de riego, es posible evaluar la posibilidad de crear un mercado de agua, como una política

que compense por los impactos económicos de una posible sequía (Rodríguez *et al.*, 2019).

En este apartado se puede observar que la aplicación de la PM en torno de la gestión de los recursos hídricos es un área de investigación importante. Cualquier tipo de modelo en la PM es tan bueno como buenos sean los datos y cercanos a la realidad que se pretende representar, los avances computacionales son una ayuda que permite trabajar cualquier tipo de modelo para satisfacer las demandas competitivas del agua en la gestión de los recursos hídricos en la agricultura y entre los diferentes usos del agua.

La valoración de los recursos hídricos es un tema importante sobre la gestión de los recursos hídricos. El uso práctico de los modelos desarrollados es útil para encontrar recomendaciones para enfrentar los desafíos actuales y futuros de la escasez de agua y despertar el interés del gobierno y las autoridades tomadores de decisiones para que se implementen políticas públicas que aminoren los impactos negativos a dicho problema.

2.3 La evaluación de la huella hídrica en la agricultura

En la búsqueda de indicadores que ayuden a medir el impacto ambiental de las actividades humanas en el medio ambiente y los recursos naturales se han construido algunos que resultan de gran utilidad para amortiguar dicho impacto como la huella ecológica, propuesta por Rees y Wackernagel (1998), mencionando que, “es una medida de la carga que una determinada población impone a la naturaleza. Representa el área de tierra necesaria para sostener los niveles actuales de consumo de recursos y descarga de desechos por parte de esa población”.

El concepto de huella de carbono nació como parte de la huella ecológica, como un indicador de nuestro impacto en la tierra a principios del siglo XXI, “es una medida de la cantidad total exclusiva de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que es directa o indirectamente causados por una actividad o es

acumulado a lo largo de las etapas de vida de un producto” (Wiedmann y Minx, 2011).

La huella hídrica (HH), es un concepto que fue introducido casi una década después del concepto de agua virtual (Allan, 1993;1994), en conferencias de expertos del comercio de agua virtual por Hoekstra y Hung (2003), estos dos conceptos están estrechamente relacionados (Chapagain y Hoekstra, 2004). “Es un indicador de la apropiación de agua dulce ($m^3/año$) desarrollada como análoga de la huella ecológica, que es, a su vez, un indicador del uso del espacio biológicamente productivo (en ha.)” (Hoekstra, 2009),

El agua virtual (AV) se define como “el volumen de agua necesario para producir un producto o servicio, además de agua física que puede contener, también incluye la cantidad de agua que se ha requerido para generar dicho producto o servicio” (Oltra y Jiménez, 2018), mientras que la definición de “HH es el volumen de agua necesario para la producción de los bienes y servicios que consumen los habitantes dentro de un área geográfica, una cuenca hidrográfica o un país” (Dan *et al.*, 2018).

Analizando las consecuencias de los flujos internacionales de agua virtual se encuentra la necesidad de acercarse más al concepto de huella hídrica ya que el agua virtual hace referencia únicamente al volumen de agua incorporada en el producto, mientras que la huella hídrica hace referencia también a qué tipo de agua, cuándo y dónde se utiliza (Chapagain *et al.*, 2006).

Desde la presentación del concepto, como indicador del uso del agua para la producción de bienes y servicios, se afirmó que “la huella hídrica total de una nación promete convertirse en un indicador útil de la demanda de una nación sobre los recursos hídricos mundiales” (Hoekstra, 2003), a pesar de que algunos investigadores argumentaban que no tenía sentido analizar el uso indirecto del agua, porque la gestión de los recursos hídricos tiene que ver con la asignación a los usos reales del agua, fue considerado un concepto innovador que podría contribuir a resolver la escasez de agua (Hoekstra, 2017).

Las críticas sobre el uso de algunas métricas del concepto de HH, relacionadas especialmente con el uso del agua, siguen siendo observadas, por ejemplo, Wichelns (2017), menciona que “las medidas volumétricas de HH solo pueden dar una estimación del consumo de agua por unidad de producción”, mientras otros autores piensan que el análisis de la HH además de considerar el volumen de agua utilizado también debiera tomar en cuenta los impactos ambientales ocasionados por la explotación de los recursos hídricos” (Sturla *et al.*, 2022).

La importación de productos con alta demanda de agua hace posible el ahorro de los recursos hídricos de los países importadores. Un país exportador de cualquier producto no incluye los costos del agua involucrados para su producción, ni tampoco el costo de los efectos negativos en la biodiversidad local ocasionados por la extracción del recurso hídrico, subvalorando los recursos hídricos. “El ahorro de agua a nivel nacional a través de la importación de un producto puede implicar un ahorro de agua a nivel global si el flujo es de sitios de alta a sitios de baja productividad hídrica” (Chapagain *et al.*, 2006).

En 2014, ISO publicó un estándar de evaluación e informes relacionado con la HH de productos, procesos y organizaciones basado en LCA (Life Cycle Analysis), que desafortunadamente, es inconsistente con el estándar de HH (Hoekstra, 2016), de tal modo que los investigadores que defiende la metodología de HH también han recibido críticas de la comunidad LCA por no tener en cuenta adecuadamente las diferencias en el impacto ambiental potencial del uso del agua dadas las diferencias regionales en la escasez de agua.

La HH es un indicador multidimensional que mide tanto el consumo de agua como la contaminación del agua. El indicador del consumo se divide en HH azul, que se refiere al agua subterránea o superficial y en HH verde que se refiere al agua de lluvia. El indicador para cuantificar la contaminación del agua suele ser llamado HH gris y es una medida de cuánta agua se necesita para asimilar las sustancias contaminantes de las actividades humanas para que

pueda ser considerada dentro de las normas locales como agua limpia (Hoekstra *et al.*, 2017).

El análisis de la HH se ha ampliado para pasar del uso del agua al uso escaso del agua, ha evolucionado y ha sido promotor de diferentes estudios prácticos en diversas áreas de nuestra vida diaria; para producir nuestra comida (Sawalhah *et al.*, 2021; Lares *et al.*, 2021), en procesos industriales (Gu *et al.*, 2015; Gerbens *et al.*, 2018) y generación de energía (Bhardwaj, 2011; Ding *et al.*, 2018), así como la que se ensucia y contamina a través de esos mismos procesos (Song *et al.*, 2019; Chini *et al.*, 2020), en gran medida por el desarrollo del manual de evaluación de HH (Hoekstra *et al.*, 2011).

Los objetivos que pueden tener los estudios de HH pueden ser distintos y ser aplicados en diferentes contextos. Antes de iniciar un estudio de esta naturaleza es necesario definir el alcance de este y especificar en cual entidad se tiene interés de desarrollar la evaluación de la HH (Figura 2-1). Es importante conocer el nivel de detalle que se busca, para conocer las actividades necesarias para alcanzar los objetivos que sean planteados.

Los planteamientos al momento de hacer el análisis de la sostenibilidad de la HH son diversos y complejos, nos encontramos con las diferentes dimensiones (ambiental, social y económica), el nivel de los impactos (primarios o secundarios), incluso que la HH tiene diferentes colores (azul, verde y gris). “El análisis de sostenibilidad consiste en realizar una comparación entre la HH humana y lo que la tierra puede soportar de manera sostenible” (Hoekstra *et al.*, 2011). Es necesario relacionar el tamaño de la HH con los recursos disponibles de agua dulce, del mismo modo que se tiene que comparar a la huella ecológica con el espacio biológicamente productivo disponible.



Fuente: Elaboración propia de los autores con información del manual de Hoekstra *et al.* (2011).

Figura 2-1. Posibles identidades donde se puede obtener la huella hídrica.

Se puede considerar que existe un creciente intercambio con otros campos de investigación con la integración de las nociones de HH y AV en los estudios regulares de gestión del agua e integración en una investigación ambiental y económica más amplia. Se ha mejorado el uso de las herramientas para el cálculo de la evapotranspiración, se ha diferenciado entre la ET verde y azul, además se desarrollaron pautas de HH gris, lo que ha brindado ayuda práctica adicional para evaluar la HH gris para una variedad de productos químicos (Hoekstra, 2017).

Existen estudios de huella hídrica en diversos procesos o productos que se caracterizan por tener impacto sobre los recursos hídricos de los países donde se inicia la cadena productiva, como el consumo mundial de algodón (Chapagain *et al.*, 2005), el uso del agua en la contaminación en las cadenas de suministro de las industrias (Hoekstra, 2015), mejorar la sostenibilidad y proteger los ecosistemas que dependen de ella (Mekonnen y Gerbens, 2020).

Un tema principal es considerar la HH en la producción agrícola, considerando que la agricultura es el sector que mayor demanda de agua tiene.

En la importación, los productos agrícolas son responsables de la mayor parte de la huella con un 67%, los productos industriales son responsables del 31% y el uso doméstico del agua representa alrededor de 2% (Van Oel *et al.*, 2009). En particular, en la huella hídrica global, la fracción de huella mayor es la verde (78%), confirmando la importancia del agua verde en la producción mundial de alimentos (Mekonnen y Hoekstra, 2011).

El consumo de un país implica el uso de recursos hídricos en otras partes del mundo, con impactos significativos en regiones con escasez de agua, lo que hace necesario un estudio general de los orígenes y destinos del agua que consumimos. Estableciendo vínculos una vez superpuestos las HH localizadas, se puede ayudar al diálogo entre consumidores, productores, intermediarios y gobiernos sobre cómo asumir y compartir responsabilidades para reducir las HH donde sea necesario (Hoekstra y Mekonnen, 2012).

Mekonnen y Hoekstra (2020), encuentran que 70% de la porción insostenible de la HH azul global se debe a la producción de cinco cultivos: trigo (27%), arroz (17%), algodón (10%), caña de azúcar (8%) y forraje (7%). Si se reducen los valores de referencia de HH, aumenta el ahorro global de agua relacionado con la mejora de la productividad del agua en la producción de cultivos (Mekonnen y Hoekstra, 2014).

Garay *et al.* (2022), en un estudio en la cuenca Papaloapan en México, estimaron la HH de 12 ingenios azucareros siguiendo la metodología de Haro *et al.* (2014); Allen *et al.* (2006); FAO (2006), detectaron que la HH es mayor en comparación a otros cultivos, destacando que se tienen grandes evapotranspiraciones y bajos rendimientos. Se concluye que en la cuenca existe una deseconomía a escala porque en los ingenios azucareros de mayor superficie tienen menor control de los procesos de producción, lo cual merma su rendimiento siendo posible intervenir mejorando las labores culturales para

buscar el incremento de la productividad agrícola y disminuir el indicador de HH de la caña de azúcar.

La HH aborda el tema de grandes desafíos ambientales relacionados con el agua, se puede aplicar en muchas disciplinas o subconjuntos de estas, desde el desarrollo hasta estudios de políticas. El concepto de HH resuena con actores clave a lo largo de la interfaz ciencia-política-acción para comprender, enmarcar y responder mejor a las crisis del agua que se avecinan (Hogeboom, 2020).

Los avances en HH mejoraran las contribuciones de los actores en la gobernanza del agua orientada a criterios de sostenibilidad ambiental, equidad social, eficiencia económica y seguridad del suministro (Hoekstra, 2017). Es útil analizar la dimensión internacional y geopolítica de la asignación de recursos hídricos.

Los estudios de HH son importantes en los sistemas agroalimentarios, además proponen establecer puntos de referencia de HH por producto, definen cuotas justas de HH por comunidad y en combinación con el comercio de agua virtual y la valoración económica, ayudarán a evitar el uso insostenible del agua (Mekonnen y Gerbens, 2020). Se puede observar que existen pocos trabajos que investiguen de manera holística a la HH, ni en sus componentes, ni para una producción agrícola muy diversa. Probablemente el resultado de poca información con usos de insumos como fertilizantes y pesticidas en la agricultura, es sinónimo a la escasez de trabajos que involucren datos de HH gris. (Sidhu *et al.*, 2021).

2.4 Literatura citada

Ahmad, I., Zhang, F., Liu, J., Anjum, M. N., Zaman, M., Tayyab, M., ... and Farid, H. U. (2018). A linear bi-level multi-objective program for optimal allocation of water resources. *PLoS One*, 13(2), e0192294. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0192294>

Aivazidou, E., Tsolakis, N., Vlachos, D. and Iakovou, E. (2018). A water footprint management framework for supply chains under green market behaviour. *Journal of Cleaner Production*, 197, 592-606. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.171>

Aji, S. S., Kim, Y. S., Ahn, K. Y. and Lee, Y. D. (2018). Life-cycle cost minimization of gas turbine power cycles for distributed power generation using sequential quadratic programming method. *Energies*, 11(12), 3511. <https://doi.org/10.3390/en11123511>

Allan, J. A. (1993). Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. *Priorities for water resources allocation and management*, 13(4), 26.

Allan, J. A. (1994). *Overall perspectives on countries and regions*. Rogers, P. and Lydon, P. *Water in the Arab World: perspectives and prognoses*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 65-100.

Archibald, T. W. and Marshall, S. E. (2018). Review of mathematical programming applications in water resource management under uncertainty. *Environmental Modeling & Assessment*, 23(6), 753-777. <https://doi.org/10.1007/s10666-018-9628-0>

Arreguín, F. I., López, M. y Cervantes, C. E. (2020). *Los retos del agua en México/Water challenges in Mexico*. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(2), 341-371. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-10>

Bekchanov, M. and Mirzabaev, A. (2018). Circular economy of composting in Sri Lanka: Opportunities and challenges for reducing waste related pollution and improving soil health. *Journal of Cleaner Production*, 202, 1107-1119. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.186>

Beattie. B. R. and Taylor C. R. (1985). *The Economics of Production*. John Wiley & sons.

Bhardwaj, A. K., Zenone, T., Jasrotia, P., Robertson, G. P., Chen, J. and Hamilton, S. K. (2011). Water and energy footprints of bioenergy crop

production on marginal lands. *Gcb Bioenergy*, 3(3), 208-222.
<https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01074.x>

Borrego, M. M., Riesgo, L. and Berbel, J. (2018). Methodology and Criteria for the Allocation of Reused Water in Agriculture. *In Multicriteria Analysis in Agriculture* (pp. 185-198). Springer, Cham. http://doi.org/10.1007/978-3-319-76929-5_8

Camero, Y., Martinez, L. y Perez, V. B. (2016). El desarrollo de la Matemática y su relación con la tecnología y la sociedad. Caso típico. *Universidad y Sociedad*. 8(1) pp.97-105.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202016000100015

Cáñez, A. (2022). Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México: diagnóstico y desafíos de política pública. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(1), 184-245. <https://orcid.org/0000-0002-2473-5648>

Chakraborty, A., Chandru, V. and Rao, M. R. (2020). A linear programming primer: from Fourier to Karmarkar. *Annals of Operations Research*, 287(2), 593-616. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03186-2>

Chapagain, A. K. and Hoekstra, A. Y. 2004. Water footprints of nations. Unesco-IHE Institute for Water Education. 1(16), 11-75.
<https://waterfootprint.org/en/resources/publications/value-water-research-report-series-unesco-ihe/>

Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y. and Savenije, H. H. (2006). Water saving through international trade of agricultural products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(3), 455-468. <https://doi.org/10.5194/hess-10-455-2006>

Chapagain, A., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G., and Gautam, R. (2005). *The water footprint of cotton consumption*. Unesco-IHE Institute for Water Education. 18(18), 9-36. <https://waterfootprint.org/en/resources/publications/value-water-research-report-series-unesco-ihe/>

Chini, C. M., Logan, L. H. and Stillwell, A. S. (2020). Grey water footprints of US thermoelectric power plants from 2010–2016. *Advances in Water Resources*, 145, 103733. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103733>

Colby, B. and Isaaks, R. (2018). Water trading: Innovations, modeling prices, data concerns. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 165(1), 76-88. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2018.03295.x>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2019). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40155>

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2015) Cuidemos y valoremos el agua que mueve a México. Cd. De México: CONAGUA. http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/carrera_agua_2015.pdf

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2020) *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Temporal Tecnificado, Año agrícola 2019-2020* https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EADTT_2019_2020.pdf

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (CPEUM). (2021). Artículo 4º, 28 de mayo de 2021. *Diario Oficial de la Federación*. México. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>

Dan, W., Hubacek, K., Shan, Y., Gerbens-Leenes, W. and Liu, J. (2021). "A Review of Water Stress and Water Footprint Accounting". *Water* 2(13), pp. 201. <https://doi.org/10.3390/w13020201>

de Souza Dias, V., Pereira da Luz, M., Medero, G. M. and Tarley Ferreira Nascimento, D. (2018). An overview of hydropower reservoirs in Brazil: Current situation, future perspectives and impacts of climate change. *Water*, 10(5), 592. <https://doi.org/10.3390/w10050592>

- Ding, N., Liu, J., Yang, J. and Lu, B. (2018). Water footprints of energy sources in China: exploring options to improve water efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1021-1031. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.273>
- Domínguez, J. (2019). *La construcción de presas en México. Evolución, situación actual y nuevos enfoques para dar viabilidad a la infraestructura hídrica. Gestión y política pública*, 28(1), 3-37. <https://doi.org/10.29265/gypp.v28i1.551>
- Florencio, V., Valdivia, R. y A. Scott, C. (2002). Productividad del agua en el distrito de riego 011, Alto Rio Lerma. *Agrociencia*. 36(4), 483–493.
- Garay, Á. S., Valdivia, R., Hernández, J. y Sandoval, F. (2022). Estimación de la huella hídrica de la producción de caña de azúcar para los ingenios de la cuenca del Papaloapan. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(1), 103-113. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2581>
- Garg, H. (2018). A linear programming method based on an improved score function for interval-valued Pythagorean fuzzy numbers and its application to decision-making. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 26(01), 67-80. <https://doi.org/10.1142/S0218488518500046>
- Gerbens, P. W., Hoekstra, A. Y. and Bosman, R. (2018). The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. *Water resources and industry*, 19, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2017.11.002>
- Gleick, P. H. (2003). Water use. *Annual review of environment and resources*, 28(1), 275-314.
- Griffin, R. C. (2016). *Water resource economics: The analysis of scarcity, policies, and projects*. MIT press.
- Gu, Y., Xu, J., Keller, A. A., Yuan, D., Li, Y., Zhang, B., ... and Li, F. (2015). Calculation of water footprint of the iron and steel industry: a case study in Eastern China. *Journal of Cleaner Production*, 92, 274-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.094>

- Hogeboom, R. J. (2020). The Water Footprint Concept and Water's Grand Environmental Challenges. *One earth*, 2(3), 218-222. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.010>
- Hoekstra, A.Y. (2017). Water Footprint Assessment: Evolvment of a New Research Field. *Water Resour Manage* 31, 3061–3081.: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K. and Van Oel, P. R. (2017). Advancing water footprint assessment research: Challenges in monitoring progress towards sustainable development goal 6. *Water*, 9(6), 438. <https://doi.org/10.3390/w9060438>
- Hoekstra, A. Y. (2016). A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecological indicators*, 66, 564-573. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.026>
- Hoekstra, A. Y. (2015). The water footprint of industry. In *Assessing and measuring environmental impact and sustainability* (pp. 221-254). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799968-5.00007-5>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Mekonnen, M. M. and Aldaya, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. *Routledge*. <https://doi.org/10.4324/9781849775526>
- Hoekstra, A. Y. and Hung, P. Q. (2003, February). Virtual water trade. In *Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade* (Vol. 12, pp. 1-244).
- Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual water: An introduction. *Virtual water trade*, 13, 108.
- Hoekstra, A. Y. (2009). Human appropriation of natural capital: Acomparision of ecological footprint and wáter footprint anañysis, *Ecological Economics*, 68(7). Pp 1963-1974. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.021>

- Hoekstra, A. Y. and Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(9), 3232-3237. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>
- Kaiser, H. M. and Messer, K. D. (2011). *Mathematical programming for agricultural, environmental and resource economics*. John Wiley and Sons, Inc.
- Kung, C. C. and Wu, T. (2021). Influence of water allocation on bioenergy production under climate change: A stochastic mathematical programming approach. *Energy*, 231, 120955. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120955>
- Lares, M., Housni, F. E. and Aguilera, V. G. (2021). A quantitative estimation of the water footprint of the Mexican diet, corrected for washing and cooking water. *Food Security*, 13(4), 849-874. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01160-0>
- Laurans, Y., Rankovic, A., Billé, R., Pirard, R. and Mermet, L. (2013). Use of ecosystem services economic valuation for decision making: questioning a literature blindspot. *Journal of environmental management*, 119, 208-219. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.008>
- Li, M., Fu, Q., P. Singh, V. and Liu, D. (2018). An interval multi-objective programming model for irrigation water allocation under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 196, 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.016>
- McLarty, D., Panossian, N., Jabbari, F. and Traverso, A. (2019). Dynamic economic dispatch using complementary quadratic programming. *Energy*, 166, 755-764. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.087>
- Marre, J. B., Thébaud, O., Pascoe, S., Jennings, S., Boncoeur, J. and Cogan, L. (2016). Is economic valuation of ecosystem services useful to decision-makers? Lessons learned from Australian coastal and marine management. *Journal of Environmental Management*, 178, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.014>
- Martínez, D., Mora, J. S., Exebio, A. A., Arana, O. A. y Arjona-Suárez, Enrique. (2021a). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan,

Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 39, e544.
<https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.544>

Martínez, A., Domínguez, E. y Altamirano-Santiago, M. (2021b) *La gobernanza hídrica como un desafío nacional. El agua en el contexto post-pandemia. El caso de Lerma, estado de México, México. Revista De Investigaciones Universidad Del Quindío*, 33(2), 174–186.
<https://doi.org/10.33975/riuq.vol33n2.768>

Mekonnen, M. M. and Gerbens, W. (2020). The water footprint of global food production. *Water*, 12(10), 2696. <https://doi.org/10.3390/w12102696>

Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>

Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological indicators*, 46, 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.013>

Mekonnen, M. M. and 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>

Moscoso, M. A. and Salazar, C. C. (2019). “Cuestión ambiental”: Entre las demandas sociales y la fragmentación de las respuestas estatales. *Revista de Ciencias Sociales* (Cr), 4(166), 115-128. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15362628010>

Mussafi, N. S. M. and Ismail, Z. (2021). Optimum risk-adjusted islamic stock portfolio using the quadratic programming model: an empirical study in Indonesia. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 8(5), 839-850. <https://doi.org/10.13106/jafeb.2021.vol8.no5.0839>

Muthu, S. S. (2019). *Environmental Water Footprints (Agricultural and Consumer Products)*. Springer. <http://doi.org/10.1007/978-981-13-2508-3>

Norton, R. D. and Hazell, P. B. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. Macmillan.

Núñez, J. M., Hernández, O. M., Ponce, J. M., Cervantes, M. E. and Rubio-Castro, E. (2018). Optimal design of sustainable agricultural water networks. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(1), 440-457. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03901>

Okoro, E. E., Otuekpo, J. E., Ekeinde, E. B. and Dosunmu, A. (2020). Rate and equilibrium based modeling with the sequential quadratic programming optimization method for glycol dehydration of produced natural gas. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 37(4), 745-756. <https://doi.org/10.1007/s43153-020-00064-4>

Oltra, M. A. y Jiménez, F. (2018). *La huella hídrica en el sector agrario de la Vega Baja*. En: Melgarejo, J.; Abadía, R. (eds.). *Agroalimentación, agua y sostenibilidad*. Orihuela: Ayuntamiento; Alicante: Universidad, 2018. ISBN 978-84-1302-014-3, pp. 91-99. <http://hdl.handle.net/10045/83930>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2018). *World urbanization prospects: The 2018 revision. Key facts*. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2019). *Climate change and poverty. Report of the Special Rapporteur on extreme poverty and human rights*. <https://www.ohchr.org/EN/Issues/Poverty/Pages/AnnualReports.aspx>

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2020). *Agua y Cambio Climático*. Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1993). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Las políticas de recursos hídricos y la agricultura*. Food & Agriculture Org. <https://www.fao.org/3/t0800s/t0800s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *The state of the world's land and water resources for food and*

agriculture: Managing systems at risk. Rome, Italy/London, UK: FAO/Earthscan.
<https://www.fao.org/docrep/017/i1688e/i1688e.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). *Afrontar la escasez de agua: Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria* (Informe sobre temas hídricos). Food & Agriculture Org. <https://www.fao.org/3/i3015s/i3015s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). *The State of Food and Agriculture 2021*. Food & Agriculture Org..
<http://www.fao.org/3/cb4476en/cb4476en.pdf>

Panceri, J. (2021). *Sustentabilidad: Economía, desarrollo y medioambiente*. Editorial Biblos.

Pérez, R. H., Constantino, R. M. and Davila, H. R. (Eds.). (2016). *Water, Food and Welfare: Water Footprint as a Complementary Approach to Water Management in Mexico* (Vol. 23). Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-28824-6>

Pérez Peña, R. (2019). *Introducción a los Modelos de Optimización*. Sello Editorial UniPiloto. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6637>

Pineda, D. E. S. y Torres, N. L. R. (2017). Diseño de un modelo de programación lineal para la planeación de producción en un cultivo de fresa, según factores costo/beneficio y capacidades productivas en un periodo temporal definido. *Ingenierías USBMed*, 8(1), 7-11.
<https://doi.org/10.21500/20275846.2564>

Quintana, N., Kaur, G., Singh, G., Gholson, D., Delhom, C., Krutz, L. J. and Hegde, S. (2021). Positive Mathematical Programming to Model Regional or Basin-Wide Implications of Producer Adoption of Practices Emerging from Plot-Based Research. *Agronomy*, 11(11), 2204.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11112204>

Ramírez, B. A., González, A., Valdivia, R., Salas, J. M. y García, J. A. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera.

Revista mexicana de ciencias agrícolas, 10(3), 539-550.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>

Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J. y Linares, P. (2010). Modelos matemáticos de optimización. *Publicación Técnica*, 1.

Ren, C., Guo, P., Tan, Q. and Zhang, L. (2017). A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 164, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.185>

Rodríguez, J. M., Medellín, J., Valdivia, R., Arana, O. A. and García-Sánchez, R. C. (2019). Insights from a Calibrated Optimization Model for Irrigated Agriculture under Drought in an Irrigation District on the Central Mexican High Plains. *Water*, 11(4), 858. <https://doi.org/10.3390/w11040858>

Rubiños, J.E., Martínez, M. A., Palacios, E. Hernández, E. y Valdivia, R. (2007). Valor económico del agua y análisis de las transmisiones de derechos de agua en distritos de riego en México. *Terra Latinoamericana*, 25(1), 43-49. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311513006>

Ripka, A., da Silva, C. L., y Hernández, A. (2018). Métodos de valoración económica ambiental: instrumentos para el desarrollo de políticas ambientales. *Revista Universidad y Sociedad*, 10(4), 246-255. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S221836202018000400246&lng=es&nrm=iso

Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat, A. and Verbist, K. (2018). Satellite remote sensing for water resources management: Potential for supporting sustainable development in data-poor regions. *Water Resources Research*, 54(12), 9724-9758. <https://doi.org/10.1029/2017WR022437>

Sawalhah, M. N., Geli, H. M., Holechek, J. L., Cibils, A. F., Spiegel, S. and Gifford, C. (2021). Water Footprint of Rangeland Beef Production in New Mexico. *Water*, 13(14), 1950. <https://doi.org/10.3390/w13141950>

- Sidhu, B. S., Sharda, R. and Singh, S. (2021). Water footprint of crop production: A review. *Indian J. Ecol*, 48(2), 358-366.
- Song, G., Dai, C., Tan, Q. and Zhang, S. (2019). Agricultural water management model based on grey water footprints under uncertainty and its application. *Sustainability*, 11(20), 5567. <https://doi.org/10.3390/su11205567>
- Sosa, L.E., Valdivia, R, Hernández, J., Contreras, J.M. y Monroy, R. (2019). Análisis de las transmisiones de derechos de agua para el periodo 2006-2016 en Celaya, Guanajuato. En *Estudios recientes sobre economía ambiental y agrícola en México*, (347-364). Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Sturla, G., Ciulla, L. and Rocchi, B. (2022). Italy'S Volumetric, Scarce and Social-Scarce Water Footprint: A Multiregional World Input-Output Analysis. SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4187571>
- Tagle, D. y Caldera, A. R. (2019). Normatividad, gestión pública del agua y ambientalismo de mercado en México: un análisis desde los proyectos políticos (2012-2018). *Tecnología y ciencias del agua*, 10(2), 1-34. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-02-01>
- Tang, Y., Zhang, F., Wang, S., Zhang, X., Guo, S. and Guo, P. (2019). A distributed interval nonlinear multiobjective programming approach for optimal irrigation water management in an arid area. *Agricultural Water Management*, 220, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.052>
- Tietenberg, T., (2003), *Environmental and Natural Resource Economics* – 6th edition, Addison Wesley, United States of America
- Tinch, R., Beaumont, N., Sunderland, T., Ozdemiroglu, E., Barton, D., Bowe, C., ... and Ziv, G. (2019). Economic valuation of ecosystem goods and services: a review for decision makers. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 8(4), 359-378. <https://doi.org/10.1080/21606544.2019.1623083>
- Torres, S. L., Tijerina, L., Ibáñez, L. A. y Bautista, M. (2020). Optimización de recursos en la producción de forrajes distrito de riego 028 Tulancingo. *Revista*

mexicana de ciencias agrícolas, 11(SPE24), 153-163.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2366>

Valdés, R. E. (2020). La última frontera de las energías renovables. *Qanat*. 10 pp.9-11. <http://www3.ciccp.es/wp-content/uploads/2020/12/Revista-Qanat-10-low.pdf#page=9>

Van Dooren, C. (2018). A review of the use of linear programming to optimize diets, nutritiously, economically and environmentally. *Frontiers in nutrition*, 5, 48.
<https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00048>

Van Oel, P. R., Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. (2009). The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*, 69(1), 82-92.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.07.014>

Vidal, M. (2019). Tratamiento de aguas residuales en México: problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables. *RINDERESU*, 3(1-2), 41-58.

Vidal, A. y Asuaga, C. (2021). Gestión ambiental en las organizaciones: una revisión de la literatura. *Revista Del Instituto Internacional De Costos*, (18), 84–122. <https://intercostos.org/ojs/index.php/riic/article/view/33>

Wackernagel, M. and Rees, W. (1998). *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth* (Vol. 9). New society publishers.

Wada, Y., Florke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., et al. (2016). Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 9(1), 175–222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>

Wichelns, D. (2017). “Volumetric water footprints, applied in a global context, do not provide insight regarding water scarcity or water quality degradation”. *Ecological Indicators*. 74, 420-426. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.008>

Wiedmann, T. & Minx, J. (2008). A Definition of 'Carbon Footprint'. In: C. C.

Pertsova, *Ecological*

Wong, C. Y., Foo, D. C. and Sin, L. T. (2020). Design and optimisation of water recovery system for a polylactide production process. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 4(2), 149-161. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00118-7>

World Meteorological Organization (WMO). (1992). *Conferencia internacional sobre el agua y el medio ambiente: cuestiones de desarrollo para el siglo 21*, 26-31 enero de 1992, Dublin, Irlanda: la declaracion de Dublin e informe de la conferencia. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.

Young, R. A. and Loomis, J. B. (2014). *Determining the economic value of water: concepts and methods*. Routledge.

Zhang, C. and Guo, P. (2018). An inexact CVaR two-stage mixed-integer linear programming approach for agricultural water management under uncertainty considering ecological water requirement. *Ecological Indicators*, 92, 342-353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.018>

Zhou, Y., Yang, B., Han, J. and Huang, Y. (2019). Robust linear programming and its application to water and environmental decision-making under uncertainty. *Sustainability*, 11(1), 33. <https://doi.org/10.3390/su11010033>

Zhuo, L., Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. (2016). Consumptive water footprint and virtual water trade scenarios for China—With a focus on crop production, consumption and trade. *Environment international*, 94, 211-223. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.019>

3 LA REASIGNACIÓN DEL AGUA EN LA AGRICULTURA EN CONDICIONES DE SEQUÍA COMO MAXIMIZADOR DE EFICIENCIA ECONÓMICA

Botello-Aguillón, César¹; Valdivia-Alcalá, Ramón¹; Hernández-Ortiz, Juan¹;
Sangerman-Jarquín, Dora M.²; Gutiérrez-García, Francisco G. ¹

¹Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Edo. de México,
México. C. P. 56230.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias.
Coatlinchan, Texcoco, Edo. de México, México. C. P. 56250.

Artículo publicado en el Año 15, Vol. 15, Núm. 10 del año 2022 en la Revista
Agro Productividad. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i8.2191>

3.1 Resumen

Objetivo: Analizar el esquema de un mercado de agua para las transmisiones de derechos que permita incrementar la eficiencia económica del uso del agua en el Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma.

Diseño/metodología/aproximación: Con ayuda de programación lineal, se construyó un primer modelo para encontrar los precios sombra y en tres escenarios de escasez hídrica (15, 30 y 50% de reducción del recurso agua) y comparar con las cuotas de riego que actualmente se pagan en el Distrito de Riego 011, con un segundo modelo se estableció un esquema de mercado de agua, con los mismos escenarios de escasez (15, 30 y 50%) para comparar el beneficio neto que los productores obtienen fuera y dentro de un mercado de transferencia de derechos de agua.

Resultados: Se encontró que el precio sombra del agua es en promedio de \$3.9 m⁻³ MN, mayor a la cuota de riego actualmente pagada (\$0.15 m⁻³ MN), y que se transmite el 25.8, 29.1 y 36.1% del agua, con un incremento en el

beneficio neto del 7.6, 7.4 y 11.7%, respectivamente en cada escenario de escasez hídrico (15, 30 y 50%).

Limitaciones del estudio/implicaciones: La aplicación de la investigación se llevó a cabo con información de dos de los 11 módulos de riego que tiene el Distrito de Riego 011, los cuales son los más representativos, en extensión y variedad de cultivos.

Hallazgos/conclusiones: La existencia de un mercado de agua confirma ventajas en el aumento del beneficio neto de los productores del Distrito de Riego 011 en condiciones de sequía.

Palabras Clave: Escasez, mercado de agua, optimización, productividad.

THE REALLOCATION OF WATER IN AGRICULTURE IN DROUGHT CONDITIONS AS A MAXIMIZER OF ECONOMIC EFFICIENCY

3.2 Abstract

Objective: Analyze the scheme of a water market for the transfer of rights that allows increasing the economic efficiency of water use in the Irrigation District 011, Alto Río Lerma.

Design/methodology/approach: With the help of linear programming, a first model was built to find shadow prices and in three water scarcity scenarios (15, 30 and 50% reduction of water resources) and compare with the irrigation fees currently paid in the District of Irrigation 011, with a second model a water market scheme was established, with the same scarcity scenarios (15, 30 and 50%) to compare the net benefit that producers obtain outside and within a market for the transfer of rights of water.

Results: It was found that the shadow price of water is on average \$ 3.9 m⁻³ MN, higher than the irrigation quota currently paid (\$ 0.15 m⁻³ MN), and that 25.8, 29.1 and 36.1% of the water is transmitted, with an increase in net profit of

7.6, 7.4 and 11.7%, respectively in each scenario of water scarcity (15, 30 and 50%).

Limitations on study/implications: The application of the research was carried out with information from two of the 11 irrigation modules that Irrigation District 011 has, which are the most representative, in extension and variety of crops.

Findings/conclusions: The existence of a water market confirms advantages in increasing the net profit of the producers of Irrigation District 011 in drought conditions.

Keywords: Optimization, productivity, scarcity, water market

3.3 Introduction

For a long time, when water seemed to be abundant, people behaved as if this resource had no value. The fourth principle of the International Conference on Water and the Environment established that “water has an economic value in all its competing uses and should be recognized as an economic good” (ONU, 1992). Theoretical development has proved that water has a series of social, economic, and cultural characteristics. Therefore, water is a special resource; however —like other production resources—, it has an economic value (Hanemann, 2006).

There are many methods to measure the value of water and its contribution to the different productive processes. Giving an appropriate value to water can become a useful tool to reallocate it to more efficient uses (Young and Loomis, 2014).

In agriculture, increasing the economic efficiency through the reallocation of water to crops with higher value is a way to guarantee that the users can increase their profits. In a mathematical programming model, the economic criteria behind the water reallocation to crops complies with the equivalence between the marginal revenue and the marginal cost (Hazell and Norton, 1986;

Beattie and Taylor, 1985). In those cases where the government is involved in the decision-making process regarding the use of water, shadow prices must be estimated, in order to guide the efficient allocation of water (Young and Loomis, 2014).

In its normative and positive forms, mathematical programming shows the importance of its use in the decision-making process about water allocation in agriculture (Filippi *et al.*, 2017; Ren *et al.*, 2017; Ahmad *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Zhang and Guo, 2018).

The application of mathematical programming in agriculture allows to reallocate farm and regional resources, taking into account a wide range of situations, such as price variations and availability, new and more profitable production activities, and market or institutional limitations, among others (Hazell and Norton, 1986).

In Irrigation District 011 (ID 011), the agricultural production yield has been impacted by the reduction of the volume in the whole basin. Several studies that tackle the valuation of water within ID 011 have proposed some methodologies to estimate the value of water, mainly in water scarcity scenarios (Florencio-Cruz *et al.*, 2002; Rubiños-Panta *et al.*, 2007; Rodríguez-Flores *et al.*, 2019; Pineda-Espejel, 2019). Overall, these researches focus on the analysis of water optimization aspects between the different crops and the estimation of marginal productivity. Rubiños-Panta *et al.* (2007) and Rodríguez-Flores *et al.* (2019) have analyzed the water right transfer and the water reallocation between the irrigation modules of ID 011.

The existence of water transfer is well known, not only within agricultural activities, but also towards the industry and the services in the area of interest (Sosa-Márquez *et al.*, 2019). Additionally, the agricultural sector is the main water consumer in Mexico and worldwide (FAO-WWC, 2015) and, therefore, looking for short-term alternatives —such as the opportunity to develop a water market within the ID 011— remains an important task. Consequently, the aim of this study was to understand water productivity in two irrigation modules of the

ID 011, using them as reference to compare the irrigation fees and to analyze the water market scheme for water right transfer between the producers of the said irrigation modules, which can enable an increase in the economic efficiency of water use.

3.4 Materials and methods

The research was carried out in the Irrigation District 011 - Alto Río Lerma, in southern Guanajuato, Mexico. It is located between 19° 55' and 21° 52' N and 99° 39' and 102° 05' W, at an altitude of 1,722 m. It is part of the Lerma-Chapala drainage basin, where 30% of the industrial production and 12.5% of the agricultural production of the country take place; in addition, 75% of the water of this area is used for agriculture and livestock raising (Fernández-Durán and Lloret, 2016).

Data were gathered from the M02: Salvatierra and M05: Cortázar agricultural production modules. These modules share the same source for the gravity-fed irrigation model and have a higher water demand (29% of the available total); they include representative regional crops. The data used for this study were: yield, average rural price, production costs, sown area, and water volume used. This information was provided by the Head of the Irrigation District 011 - Alto Río Lerma and the Limited Liability Company of the ID 011.

Using this information, a lineal programming model was developed. This model was used to establish both the maximum profit based on the availability of the fixed resources of the farm and crop definition that sets the pattern of the crops that have been sown in ID 011. We used a base model with the real crop pattern for the 2016-2017 agricultural period and the total water volume available that year.

The 2016-2017 information was used because that was a typical year: the water volume remained constant in the dams that supply the ID 011, reaching a historical level. Faced with water scarcity, producers only sow during one cycle

(autumn-winter/spring-summer). Several scenarios were developed using different water scarcity levels (15, 30, and 50% water reduction) to carry out agricultural activities.

The mathematical representation of the model can be expressed as follows (Kaiser and Messer, 2011):

Objective function:

$$\text{Maximize } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \text{ for all } i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$x_j \leq \beta x_j^{\text{year base}} \quad (3)$$

$$Y \quad x_j \geq 0, \quad \text{for all } j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Where:

x_j = is the j -th activity of the producer, the number of hectares to be sown with a given crop; c_j = is the net profit margin forecast (also known as net prices) of the j -th unit of the activity (pesos per hectare); a_{ij} = quantity of the i -th resource (water, land) required to produce a unit of the j -th activity; m is the number of resources, therefore $i=1, \dots, m$; b_i = is the amount of the i -th available resource (water, land); β = allowable percentage of the j -th activity of the producer, dimensionless.

For the development of the empirical model, the crops established in the M02: Salvatierra and M05: Cortázar modules were used—including barley, maize, sorghum, and wheat. They represent 83.1% of the cultivated area and 77.3% of the water delivered to the modules (Cuadro 3-1).

Cuadro 3-1. Crops established in the M02: Salvatierra and M05: Cortázar modules in the 2016-2017 period.

Crop	Area (ha)	Volume of water (dam ³)	Crop	Area (ha)	Volume of water (dam ³)
Garlic (<i>Allium sativum</i>)	46.4	275.6	Strawberry (<i>Fragaria ananassa</i>)	78.7	508.2
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	1378.1	17421.2	Beans (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1179.5	14996.7
Fodder oats (<i>Avena sativa</i>)	81.8	760.0	Bean(<i>Phaseolus vulgaris</i>)	30.4	138.9
Broccoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>)	743.2	5653.7	Chickpea (<i>Cicer arietinum</i>)	378.2	1778.6
Peanut (<i>Arachis hypogaea</i>)	143.6	721.6	Guava (<i>Psidium guajava</i>)	7.5	41.6
Zucchini (<i>Cucurbita pepo</i>)	50.9	457.8	Tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>)	10.1	40.5
Sweet potato (<i>Ipomoea batatas</i>)	87.9	833.6	Cabbage (<i>Lactuca sativa</i>)	927.1	5546.1
Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	8466.9	65900.3	Corn (<i>Zea mays</i>)	178.9	2265.5
White onion (<i>Allium cepa</i>)	235.7	2868.1	Grain corn (<i>Zea mays</i>)	19331.9	102696.6
Chayote squash (<i>Sechium edule</i>)	2.8	30.3	Sorghum (<i>Sorghum bicolor</i>)	5887.5	21014.7
Coriander (<i>Coriandrum sativum</i>)	2.1	51.8	Green tomatoes (<i>Physalis philadelphica</i>)	818.7	10242.6
Cauliflower (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>botrytis</i>)	154.7	1113.8	Wheat (<i>Triticum durum</i>)	6903.3	71033.4
Asparagus (<i>Asparagus officinalis</i>)	484.5	2592.7	Carrot (<i>Daucus carota</i>)	734.4	7951.3

Source: Table developed by the authors using information of the Office of the Head of ID 011 and the Limited Liability Company of the ID 011.

The net prices were calculated as the difference between the gross income (yield multiplied by the average rural price) and the production cost per sown

hectare —not including water costs, which are precisely the value that we are looking for.

Water volume and available area vary according to the agricultural cycle and the irrigation method. Water and land restrictions were taken into account. The former amounted to 337,007 dam³ (i.e., the water volume used by M02: Salvatierra and M05: Cortázar modules during the 2016-2017 period). The latter matches the sowing area of each module (Cuadro 3-2).

Cuadro 3-2. Resources restriction for the lineal programming model.

Type of irrigation	Cycle	M02: Salvatierra		M05: Cortázar	
	Resource	Land (ha)	Water (dam ³)	Land (ha)	Water (dam ³)
Surface	Fall-Winter	12092.3	50955.1	11930.7	73949.4
	Spring-Summer		46282.9		5979.9
	Perennials		10927.6		161.8
	Second crops		18045.8		32159.6
Pumping	Fall-Winter	4075.9	22418.8	7184.0	34658.9
	Spring-Summer		11840.9		346.3
	Perennials		4894.5		4609.9
	Second crops		5915.5		13859.9
	TOTAL	16168.2	171281.3	19114.7	165725.8

Source: Table developed by the authors using information of the Office of the Head of ID 011 and the Limited Liability Company of the ID 011.

Subsequently, a second model was developed. This model enabled —within the same water scarcity scenarios (15, 30, and 50% water reduction)— the existence of a water market scheme between the producers of the two irrigation modules. This model was based on chapter V of the Ley de Aguas Nacionales (DOF, 2020), which allows the transfer of concession arrangements for the exploitation or use of national waters between economic agents and sectors.

The lineal programming models were processed using the LINDO 6.1 (Lineal Interactive Discrete Optimization) software. The results were processed with a three-part analysis: the first part covers the shadow prices; the second includes the water volume allocated to the modules; and the third shows the net income of the irrigation modules.

3.5 Results and discussion

Using the resource optimization model —supported by the availability water restriction—, the shadow prices of gravity-fed and land were initially obtained (Cuadro 3-3).

Cuadro 3-3. Shadow prices of gravity-fed and land per irrigation module (MN\$ dam⁻³).

Availability	100%		85%		70%		50%	
Resource	M02	M05	M02	M05	M02	M05	M02	M05
Water								
F-W	1284	1371	1284	1371	3484	1371	4246	1371
S-S	2084	3872	2084	3872	2084	3872	2631	3872
Perennial	1964	12771	1964	12771	1964	12771	1964	12771
Second crops	4222	3640	4222	3640	4222	3640	4222	3640
Land								
June	0	9987	0	0	0	0	0	0
July	0	9953	0	17027	0	12687	0	3507

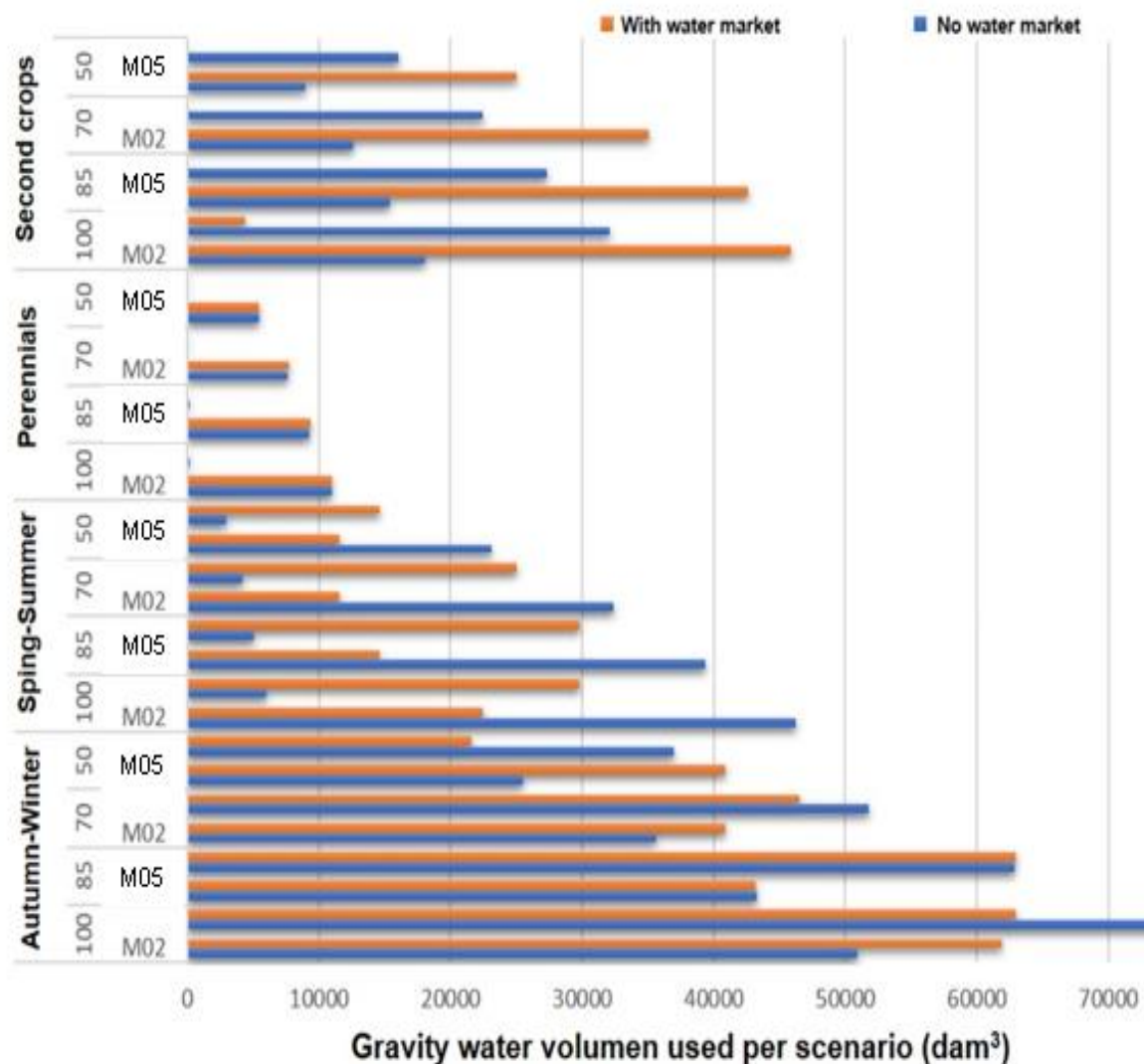
Source: Table developed by the authors using information of the outputs of the MPL of the LINDO 6.1.

When shadow prices reach a zero value, it does not mean that the resource has ran out completely and, therefore, it is free of charge. This was the overall case of the shadow prices of the land resource. The results showed that the water shadow price of the base model was MN\$3.9 m⁻³; this price is much higher than the price paid by the users (MN\$0.15 m⁻³). A similar relation was found by Martínez-Luna *et al.* (2021), who recorded a MN\$1.44 m⁻³ shadow price for the Irrigation District 100, in Alfajayucan, Hidalgo, Mexico. That price is higher than the irrigation fees paid by the producers (MN\$0.02 m⁻³). Ramírez-Barraza *et al.*

(2019) carried out a study in the Comarca Lagunera and recorded a MN\$0.91 shadow price; this price is higher than the price paid by the producers of the study area.

The existence of a water market in ID 011 allows the reallocation of water volume to other modules. Figura 3-1 shows the water transfer between agricultural cycles in M02 and M05 modules. Additionally, it enables a comparison with the established volumes, when the district lacks a water market.

In view of a potential water market, water was used in the agricultural cycles in which the highest shadow prices are obtained. This behavior shows that — within the irrigation modules of a district—the resource was bought and sold in those places where high profit crops are sown or water demand is lower. Rodríguez-Flores *et al.* (2019) recorded a different situation in their study. They evaluated a formal water market for all the ID 011, where the four modules with highest overall shadow prices imported the resource.



Source: Table developed by the authors using information of the outputs of the MPL of the LINDO 6.1.

Figura 3-1. Water volume for gravity-fed irrigation used per module and each availability scenario.

The main aim of this water market projection is to prove the economic effect that it can have on the ID 011 users. In addition, along with an optimal crop pattern, it can increase their net profit. Cuadro 3-4 shows the results of the M02 and M05 modules net income. A water market can indeed favor the total net income in all scarcity scenarios.

Cuadro 3-4. Net income of the M02 and M05 irrigation modules in different availability and water market scenarios (millions MN\$).

Net income in millions of Mexican pesos						
No water markets				With water markets		
Water availability	85%	70%	50%	85%	70%	50%
M02: SALVATIERRA						
Spring-Summer	187.31	171.28	129.05	187.18	184.19	184.19
Fall-Winter	195.91	181.44	159.6	137.07	126.73	126.73
Perennials	17.95	14.73	10.43	18.08	14.81	10.46
Second crops	64.76	53.33	38.09	180.04	148.25	105.86
M05: CORTÁZAR						
Spring-Summer	88.57	73.36	53.09	88.7	66.21	31.97
Fall-Winter	29.14	25.67	21.04	124.99	106.46	66
Perennials	1.76	1.45	1.03	0.88	0.88	0.88
Second crops	99.87	82.32	58.91	0.49	0.49	0.49
<i>Total:</i>	<i>685.27</i>	<i>603.58</i>	<i>471.24</i>	<i>737.43</i>	<i>648.02</i>	<i>526.58</i>

Source: Table developed by the authors using information of the MPL of the LINDO 6.1

3.6 Conclusions

The irrigation fees paid within ID 011 do not represent the actual value of water. An adjustment in the fee prices could benefit ID 011. Such benefits would include better management or improvements to the current hydro-agricultural infrastructure that would enable a higher irrigation efficiency for the distribution of water to the local users.

Further crop pattern analysis must be carried out in ID 011. Additionally, crops with better characteristics (i.e., profitable, low investment, existing market, etc.) must be taken into account as an option for future agricultural years. Crops such as alfalfa, oats, maize, and sorghum should not be sown as a result of their low profitability and/or water demand.

Water commercialization is an efficient mechanism in the economy of the hydric resources. It should spark an interest in water governance for lost markets. This situation could be the result of legal restrictions related to the commercialization of water rights. It can improve the efficient use of water in agriculture, supplying the forecasted water demands, resulting from population growth.

The results of this research lay the foundations for the generation of a market policy for right water transfer in ID 011. This policy should motivate both buyers and sellers to evaluate water use strategies related to scarcity water values. In addition, we must be aware of the costs of the infrastructure involved in the water market development.

3.7 Acknowledgements

The authors would like to thank the authorities of the Irrigation District 011 - Alto Río Lerma for the information they provided for this research.

3.8 Referencias

Ahmad, I., Zhang, F., Liu, J., Anjum, M. N., Zaman, M., Tayyab, M., ... & Farid, H. U. (2018). A linear bi-level multi-objective program for optimal allocation of water resources. *PLoS One*, 13(2), e0192294.. Doi: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0192294>

Beattie. B. R. & Taylor C. R. (1985). The Economics of Production. *John Wiley & sons*.

FAO & WWC (2015) *Towards a water and food secure future: Critical perspectives for policy-makers* (1st Ed.) Rome: Food and agriculture organization of the united nations.

Fernández-Durán, J. J., & Lloret, A. (2016). Consumo de agua y producto interno bruto en la cuenca Lerma-Chapala. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 129-138. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400129&lng=es&tlng=es

Filippi, C., Mansini, R., & Stevanato, E. (2017). Mixed integer linear programming models for optimal crop selection. *Computers & Operations Research*, 81, 26-39. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.12.004>

Florencio-Cruz, V., Valdivia-Alcalá, R., & A. Scott, C. (2002). Productividad del agua en el distrito de riego 011, Alto Rio Lerma. *Agrociencia*, 36(4), 483–493.

Hanemann, W.M. (2006). The economic conception of water. In: Rogers, P.P., Llamas, M.R. and Martinez-Cortina, L. (Eds.). *Water Crisis: Myth or Reality?* Taylor & Francis, New York, 61-91.

Kaiser, H. M., & Messer, K. D. (2011). *Mathematical programming for agricultural, environmental and resource economics*. John Wiley and Sons, Inc.

Ley de aguas nacionales (2020). Diario Oficial de la Federación. (el 6 de enero de 2020). México, México: *Cámara de diputados del h. Congreso de la unión*. Consultada en http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_060120.pdf

Li, M., Fu, Q., P. Singh, V., & Liu, D. (2018). An interval multi-objective programming model for irrigation water allocation under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 196, 24-36. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.016>

Martínez-Luna, Domingo, Mora-Flores, José S., Exebio-García, Adolfo A., Arana-Coronado, Oscar A., & Arjona-Suárez, Enrique. (2021). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 39, e544. Doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.544>

Norton, R. D., & Hazell, P. B. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. Macmillan.

Organización de las Naciones Unidas (ONU) (1992). «Declaración de Dublín Sobre el Agua y el Desarrollo Sostenible», *Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente*. Dublín, ONU.

Pineda Espejel, M., Valdivia Alcalá, R., Sandoval Romero, F., & Hernández Ortiz, J. (2019). Efectos en el uso del agua en un distrito de riego, ante cambios de política agrícola y mejoras de la investigación para la adaptación al cambio climático. *Rev. Mex. de Ec. Agríc. y de los Rec. Nat.*, (vol XII, num 1).

Ramírez Barraza, Brenda Aracely, González Estrada, Adrián, Valdivia Alcalá, Ramón, Salas González, José María, & García Salazar, José Alberto. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(3), 539-550. Doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>

Ren, C., Guo, P., Tan, Q., & Zhang, L. (2017). A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 164, 85-94. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.185>

Rodríguez-Flores, J. M., Medellín-Azuara, J., Valdivia-Alcalá, R., Arana-Coronado, O. A., & García-Sánchez, R. C. (2019). Insights from a Calibrated

Optimization Model for Irrigated Agriculture under Drought in an Irrigation District on the Central Mexican High Plains. *Water*, 11(4), 858.

Rubiños-Panta, J.E., Martínez-Damián, M. A., Palacios-Vélez, E. Hernández-Acosta, E., & Valdivia-Alcalá, R. (2007). Valor económico del agua y análisis de las transmisiones de derechos de agua en distritos de riego en México. *Terra Latinoamericana*, Vol. 25, Núm. 1, enero-marzo 2007. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Sosa-Márquez, L.E., Valdivia-Alcalá, R, Hernández-Ortiz, J., Contreras-Castillo, J.M. & Monroy-Hernández, R. (2019). Análisis de las transmisiones de derechos de agua para el periodo 2006-2016 en Celaya, Guanajuato. En *Estudios recientes sobre economía ambiental y agrícola en México* (347) La Paz, B.C.S: Universidad Autónoma de Baja California Sur.

Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). *Determining the economic value of water: concepts and methods*. Routledge.

Zhang, C., & Guo, P. (2018). An inexact CVaR two-stage mixed-integer linear programming approach for agricultural water management under uncertainty considering ecological water requirement. *Ecological Indicators*, 92, 342-353. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.018>

4 ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA AGRÍCOLA DEL DR 011, ALTO RÍO LERMA

César Botello Aguillón¹ Dora María Sangerman Jarquín² Ramón Valdivia Alcalá^{1*} Juan Hernández Ortiz¹ Francisco Gerardo Gutiérrez García¹ Fermín Sandoval Romero¹

¹Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Edo. de México, México. C. P. 56230.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Coatlinchan, Texcoco, Edo. de México, México. C. P. 56250.

*Autor para correspondencia: ramvaldi@gmail.com

Artículo enviado a La Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (REMEXCA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

4.1 Resumen

En la búsqueda de indicadores que ayuden a medir el impacto ambiental de las actividades humanas en el medio ambiente y los recursos naturales, existe uno que resulta de gran utilidad como indicador de la demanda de una nación sobre los recursos hídricos mundiales. La estimación de la huella hídrica de la producción agrícola permite la identificación de cultivos que pueden reducir su huella hídrica en favor de aumentar la eficiencia del uso del agua. Con la metodología de Hoekstra *et al.* (2011), se contabilizó la huella hídrica de productos agrícolas del Distrito de Riego 011. Se encontró que, de 14 cultivos del distrito, la huella hídrica total promedio en los módulos ($\text{dam}^3 \text{ t}^{-1}$), la del cacahuate, frijol y nopal reportan las mayores cifras (1.7, 1.6 y 1.8, respectivamente) mientras que las hortalizas con los cultivos de lechuga, tomate de cáscara y zanahoria son las menores (0.15, 0.29 y 0.25, respectivamente). En cuanto a huella hídrica del total de la producción agrícola (dam^3), se observó que el maíz participa con el 43.4%, sin embargo, representa

el 52.8% de la producción total. Los cultivos de cacahuete y alfalfa del módulo 05 son económicamente incosteables, presentan costos de agua azul por tonelada elevados (\$8,623 y \$11,914), sin embargo, ocupan el 1% del área sembrada. El estudio demuestra que la huella hídrica es un buen indicador para evaluar y mejorar la eficiencia del uso del agua permitiendo reconocer los cultivos en los que es posible reducir su huella hídrica.

Palabras Clave: eficiencia hídrica, escasez, agua virtual.

Abstract

In the search for indicators that help measure the environmental impact of human activities on the environment and natural resources, there is one that is very useful as an indicator of the demand of a nation on global water resources. The estimation of the water footprint of agricultural production allows the identification of crops that can reduce their water footprint in favor of increasing the efficiency of water use. With the methodology of Hoekstra et al. (2011), the water footprint of agricultural products of Irrigation District 011 was counted. It was found that, of 14 crops in the district, the average total water footprint in the modules ($\text{dam}^3 \text{ t}^{-1}$), that of peanuts, beans and nopal report the highest figures (1.7, 1.6 and 1.8, respectively) while vegetables with crops of lettuce, husk tomato and carrot are the lowest (0.15, 0.29 and 0.25, respectively). Regarding the water footprint of the total agricultural production (dam^3), it was observed that corn participates with 43.4%, however, it represents 52.8% of the total production. Peanut and alfalfa crops in module 05 are economically unaffordable, they have high blue water costs per ton (\$8,623 and \$11,914), however, they occupy 1% of the planted area. The study shows that the water footprint is a good indicator to evaluate and improve the efficiency of water use, allowing the recognition of crops in which it is possible to reduce their water footprint.

Keywords: water efficiency, scarcity, virtual water.

4.2 Introducción

Desde hace décadas los debates sobre el impacto de la humanidad en los recursos mundiales del agua se han incrementado, creando enormes desafíos para los habitantes y para todos los usuarios del agua, intensificándose donde las consecuencias del cambio climático empiezan a manifestarse de forma inobjetable (Bernauer y Böhmelt, 2020). En la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente, que tuvo lugar en Dublín, Irlanda, se produjo “la Declaración de Dublín “constituye el principal elemento sobre los problemas de agua dulce” (WMO, 1992). Vale la pena recordar dos de los cuatro principios rectores de la conferencia que son relevantes para el estudio en cuestión, lo que no significa que los otros dos tengan menos importancia. Se trata del principio rector número uno y el número cuatro (WMO,1992): “Principio número 1; el agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente” y “Principio rector número 4; el agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico”.

Estos dos principios además de admitir sin ambages la importancia del agua para la vida y todas las actividades humanas y el medio ambiente, señala que, por su escasez y los múltiples usos se debe reconocer como un bien económico y, por tanto, la economía y sus principios resultan de utilidad para mejorar su uso. Gracias al constante diálogo sobre la problemática del recurso agua, a los avances científicos y tecnológicos que se han desarrollado alrededor del tema hídrico, se ha llegado a comprender los procesos que se dan para cuantificar la disponibilidad del recurso a lo largo del ciclo del agua, se han identificado las instituciones involucradas en la regularización de los intercambios entre los sistemas ecológico y socioeconómico, y los precursores de la aparente escasez de agua y se han propuesto y aplicado metodologías para identificar el estado de la gobernanza multinivel del agua (OCDE,2015).

En este contexto, en las últimas décadas se han desarrollado conceptos e indicadores que contribuyen a medir el impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente y los recursos naturales. Entre estos conceptos se

encuentra la huella ecológica, huella de carbono, agua virtual y la huella hídrica. La huella hídrica (HH), es un concepto desarrollado en analogía con el concepto de huella ecológica (Hoekstra y Chapagain, 2006), que se introdujo casi una década después del concepto de agua virtual (Allan, 1993;1994), en conferencias de expertos del comercio de agua virtual (AV) por Hoekstra y Hung en 2002 (Hoekstra y Hung, 2003).

La HH y AV están estrechamente relacionadas (Chapagain y Hoekstra, 2004), el AV se define como el volumen de agua necesario para producir un producto o servicio, además de agua física que puede contener, también incluye la cantidad de agua que se ha requerido para generar dicho producto o servicio (Oltra y Jiménez, 2018), mientras que la definición de HH, es el volumen de agua necesario para la producción de los bienes y servicios que consumen los habitantes dentro de un área geográfica, una cuenca hidrográfica o un país (Dan *et al.*, 2018). Este último concepto se propuso como una medida de la apropiación real de los recursos hídricos globales de un país (Hoekstra y Hung, 2003).

La HH se presenta como un marcador de uso del agua que está detrás de cada producto, consumida por un individuo o un país y la aseguraron como un buen sistema de seguimiento de un país para conocer el uso de sus recursos hídricos (Muthu, 2019). Se ha estimado la HH en diversos cultivos y actividades en México y en el mundo: en forrajes (Ríos *et al.*, 2015), trigo (Ewaid *et al.*, 2019), cebolla y tomate de cáscara (Sánchez *et al.*, 2020), aguacate (Naranjo y Reyes, 2021), caña de azúcar (Garay *et al.*, 2022), producción de carne (West y Baxter, 2018), turismo (Sun y Hsu, 2019), producción de etanol (Liu *et al.*, 2019), minería (Álvarez *et al.*, 2021), etc.

El concepto se utiliza para evaluar el uso del agua a lo largo de las cadenas de suministro (Hoekstra, 2016), la sostenibilidad del uso del agua dentro de las cuencas fluviales (Abbasi *et al.*, 2019), la eficiencia del uso del agua (Cao *et al.*, 2021), la equidad en la asignación del agua (Kumar, 2021) y la dependencia del agua en la cadena de suministro (Aivazidou *et al.*, 2018). Hoekstra *et al.* (2011),

mencionan que el agua en una cuenca debe ser asignada de forma económicamente eficiente a los diferentes usuarios (eficiencia de asignación) y cada usuario debe utilizar su agua asignada de manera eficiente (eficiencia productiva).

La HH se ha utilizado como herramienta para evaluar y mejorar la eficiencia en el uso del agua y la gestión de los recursos hídricos (Lathuillière *et al.*, 2018), una ventaja de la utilización de los enfoques de HH y AV se encuentra en el hecho de dar sentido a la idea de transversalidad requerida en la implementación de la política hídrica de un país (Pérez *et al.*, 2016), de tal modo que algunos investigadores piden que para el análisis de las políticas de gestión de los recursos hídricos, los enfoques anteriores sean reemplazados por los enfoques del AV y la HH (Bazrafshan *et al.*, 2020), por ser considerados como conceptos económicos dinámicos, importantes para la gestión de los recursos hídricos en cualquier sector, especialmente en la agricultura, en áreas con estrés hídrico o propensas a la sequía. (Singh *et al.*, 2022). Los beneficios económicos asociados a una HH (Verde, Azul o Gris) que resultan de usar el agua para un fin determinado deben sobrepasar el costo total asociado a esta HH (Hoekstra *et al.*, 2011).

En la cuenca hidrográfica de Lerma-Chapala en México la escasez de agua y su creciente demanda para el riego ha causado crisis de años secos intermitentes desde 1950 (Vargas, 2007), por tal motivo se ha despertado gran interés sobre el recurso hídrico en términos de calidad y cantidad en tiempos prolongados de estiaje, ya que se generan conflictos en la región entre usuarios y autoridades del agua por la fuerte competencia existente del recurso hídrico entre los sectores que lo demandan (Fernández y Lloret, 2016).

La presencia y aumento de la escasez del agua, la competencia creciente del agua entre sectores y la reducción de opciones en estrategias de suministro del recurso hídrico en la agricultura de la cuenca Lerma-Chapala, motivaron a realizar la presente investigación sobre la HH azul, verde y gris de la producción agrícola del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma (DR 011), de tal modo que los

resultados permitan la identificación de cultivos que pueden reducir su huella hídrica para fortalecer a la gestión de la demanda del agua y aumentar la eficiencia de su uso en la agricultura.

El DR 011 está ubicado en El Bajío guanajuatense, cuenta con 11 asociaciones de usuarios de riego conocidos como “módulos de riego”, mismos que agrupan a 26,611 usuarios, tiene un total de 111,242.55 hectáreas de las cuales 110,299.45 son de riego (Rodríguez *et al.*, 2019).

4.3 Materiales y métodos

El desarrollo del estudio está basado en la aplicación de la metodología para la contabilidad de la huella hídrica de productos agrícolas o forestales del Manual de Hoekstra *et al.* (2011). La metodología para el cálculo de la HH se realizó en dos etapas.

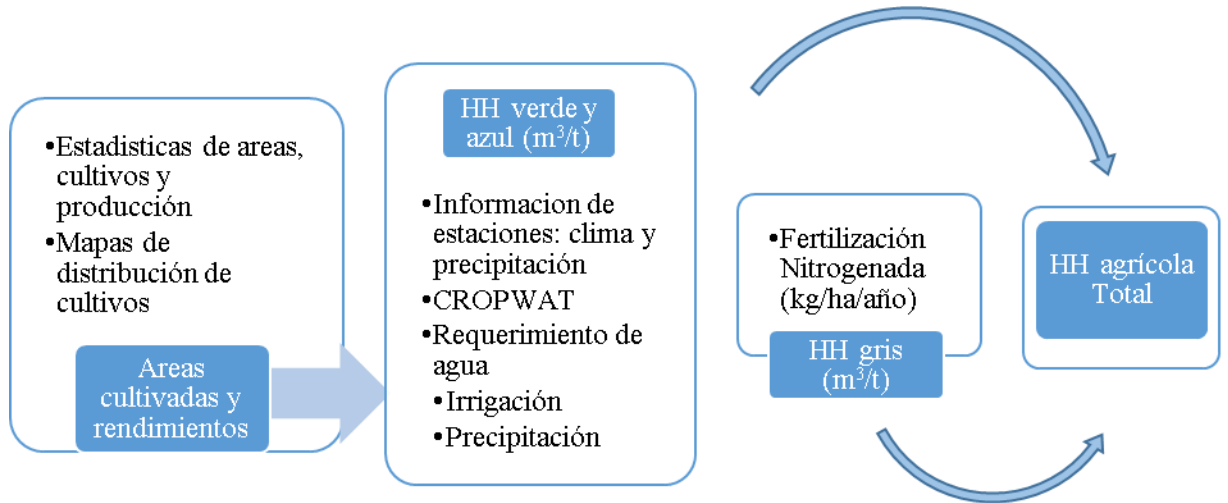
En la primera etapa se definió el alcance general de la evaluación, para tal proceso se siguieron cuatro pasos básicos con el fin de dar claridad al tipo de información necesaria y de las fuentes de búsqueda. Primero se definió el DR 011 como el área de estudio para calcular la HH azul, verde y gris de la producción agrícola, ubicado al sur del Estado de Guanajuato (Figura 4-1), misma que se extiende desde la Presa Solís (Municipio de Acámbaro), hasta la zona de influencia del Río Turbio. Las presas que proveen al distrito son cuatro embalses de almacenamiento: la Presa Tepuxtepec, la Presa Solís, el Lago Yuriria y la Presa Purísima. En segundo lugar, se acotó el alcance de la investigación, con capacidad de proponer alternativas a nivel regional que mejoren las políticas de gestión de los recursos hídrico de la zona de estudio.

Cuadro 4-1. Ubicación geográfica de los módulos de riego del DR 011, Alto Río Lerma.

	Módulo	Latitud N	longitud O	Altitud (m)
1	Acámbaro	20.08	100.77	1846.00
2	Salvatierra	20.24	100.95	1743.00
3	Jaral	20.33	101.03	1729.00
4	Valle	20.42	101.14	1718.00
5	Cortázar	20.47	101.02	1730.00
6	Salamanca	20.58	101.19	1715.00
7	Irapuato	20.62	101.35	1717.00
8	Abasolo	20.51	101.46	1700.00
9	Huanímaro	20.34	101.53	1692.00
10	Corralejo	20.48	101.62	1692.00
11	La purísima	20.80	101.36	1749.00

Fuente: Elaboración propia con información de la Jefatura del Distrito de Riego 011.

En la segunda etapa se realizó la cuantificación de la HH del proceso de los cultivos (huella hídrica agrícola) con riego de las fuentes de abastecimiento superficial del año agrícola 2021-22, la cual se compone por la huella hídrica azul, verde y gris, y se expresa en m^3t^{-1} , para este sector (Figura 4-2). Con la información hidro-climática se utilizó el software CROPWAT 8.0 de la FAO para la estimación del agua azul evapotranspirada (ET_{azul}) y el agua verde evapotranspirada (ET_{verde}), las cuales se expresan en mm periodo^{-1} y que con una relación de 10 se convierten en agua azul utilizada por el cultivo ($\text{CWU}_{\text{verde}}$, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) y agua verde utilizada por el cultivo ($\text{CWU}_{\text{verde}}$, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), finalmente se calculó el componente azul de la huella hídrica (Ec1) de un cultivo ($\text{HH}_{\text{cultivo, azul}}$, m^3t^{-1}), como el agua azul utilizada por el cultivo dividido por el rendimiento de los cultivos (Y , t ha^{-1}). El componente verde (Ec2) ($\text{HH}_{\text{cultivo, verde}}$, m^3t^{-1}) se calculó de una manera similar.



Fuente: Elaboración propia de los autores con información del manual de Hoekstra *et al.* (2011).

Figura 4-2. Metodología para el cálculo de la HH.

$$HH_{cultivo, azul} = \frac{CWU_{azul}}{Y} \quad \text{Ec1}$$

$$HH_{cultivo, verde} = \frac{CWU_{verde}}{Y} \quad \text{Ec2}$$

El componente gris de la huella hídrica de cada cultivo ($HH_{cultivo, gris}$, $m^3 t^{-1}$), se calculó multiplicando la tasa de aplicación de fertilizante nitrogenado por hectárea (TA , $kg ha^{-1}$) por la fracción de lixiviación-escorrentía superficial (α) dividido entre la concentración máxima permitida ($C_{máx}$, $kg m^{-3}$) menos la concentración natural para fertilizante nitrogenado que es aplicado (C_{nat} , $kg m^{-3}$) y posteriormente se dividió entre el rendimiento del cultivo (R , $t ha^{-1}$).

$$HH_{proc, gris} = \frac{(\alpha \cdot TA) / (C_{máx} - C_{nat})}{R} \quad \text{Ec3}$$

Se consideró a α como un 10% de la tasa de fertilización aplicada como lo han marcado autores especialistas en HH (Hoekstra *et al.*, 2011), la concentración máxima permitida en masas de aguas superficiales fue tomada de la norma mexicana NOM-127-SSA1-2021, que indica 10 mg l⁻¹ (medidos como N), se consideró la concentración natural igual a cero por falta de información apropiada y la información referente a las tasa de aplicación de nitrógeno en los

cultivos fue tomada de la agenda técnica agrícola del estado de Guanajuato (SAGARPA, 2015).

Cuando el precio del agua para el usuario está por debajo de su costo económico real, generalmente resulta en un uso ineficiente, como en general es el caso en la agricultura. Para hacer un análisis económico de la HH azul superficial para riego, se tomó en cuenta la investigación de Botello *et al.* (2022), donde encontraron que en promedio el precio sombra (el valor real que no tiene precio en el mercado) del agua de los módulos 02 y 05 del DR 011 era mayor (26 veces) a las cuotas de riego pagadas por los usuarios, utilizando los valores de la investigación (Cuadro 4-2), se multiplicaron por la HH de cada cultivo para conocer la pérdida económica real del agua superficial que es consumida (extraída de la cuenca) en la producción agrícola.

Cuadro 4-2. Precio sombra del agua superficial para riego en el DR011.

Precio Sombra del Agua (\$dam ⁻³)		
Ciclo	M02	M05
O-I	1284	1371
P-V	2084	3872
Perennes	1964	12771

Fuente: Datos obtenidos de Botello *et al.* (2022).

La HH total de un área geográfica genera un punto crítico económico, es decir, es económicamente insostenible cuando el agua no se asigna y usa de manera económicamente eficiente. “Los beneficios de una HH (verde, azul o gris) que son resultados del uso de agua para un determinado fin deberían superar el coste total asociado con esta huella hídrica, incluyendo las externalidades y los costes de escasez del agua.” (Hoekstra, *et al.*, 2011).

En el DR 011 se siembra en el ciclo otoño-invierno (O-I) que va de octubre a noviembre, las cosechas se realizan en febrero y marzo, y se cultivan principalmente trigo, cebada y hortalizas como brócoli y lechuga. En el ciclo primavera-verano (P-V) la siembra va de los meses de marzo y abril, y las

cosechas septiembre, se cultivan maíz y sorgo principalmente. Hay cultivos perennes, los principales son alfalfa y esparrago. Se consideran como segundos cultivos al maíz y al sorgo sembrados generalmente en el mes de mayo.

4.4 Resultados y discusión

Siguiendo la metodología descrita anteriormente, se obtuvieron los componentes azul, verde y gris por cultivo en cada módulo de riego del DR 011 (Cuadro 4-3). Se debe señalar que se ignoró la evapotranspiración del agua en las zonas de captación y los canales de conducción y no se contabilizó el agua verde y azul incorporadas a los cultivos debido a que es considerado en la literatura entre el 75 y el 80% (Hoekstra *et al.*, 2011), lo que supone menos de 1% de la huella hídrica con respecto al agua evaporada. El componente gris del garbanzo es considerado 0% debido a que no se aplica fertilizante nitrogenado porque la siembra del cultivo generalmente se hace bajo condiciones de humedad restringida.

Cuadro 4-3. Huella hídrica por componente de cada cultivo del DR 011.

	Componentes de huella hídrica por cultivo		
	Azul m ³ t ⁻¹	Verde m ³ t ⁻¹	Gris m ³ t ⁻¹
Alfalfa	298.7	478.5	30.4
Avena	935.1	140.7	166.2
Cacahuete	1055.8	535.5	89.0
Cebada	722.9	66.8	149.6
Espárrago	1015.2	1345.3	85.9
Frijol	1116.8	279.7	200.1
Garbanzo	1064.4	249.9	0.0
Lechuga	74.3	9.5	61.5
Maíz grano	85.3	321.7	211.3
Nopal	892.5	770.1	125.0
Sorgo Grano	68.2	352.8	249.9
Tomate de cáscara	195.9	46.7	50.1
Trigo	626.4	60.5	391.5
Zanahoria	193.6	22.1	30.8

Fuente: Elaboración propia con los resultados del estudio.

La WWF (2012), en un reporte de huella hídrica de la agricultura colombiana que considera la huella gris, reportan porcentajes de los componentes azul, verde y gris del 7.1, 87.1 y 5.8%, respectivamente, a diferencia del presente estudio donde los porcentajes son de 56.1, 31.5 y 12.4%, respectivamente, la diferencia entre los porcentajes de HH azul y verde pueden responder a la diferencia de las precipitaciones.

Álvarez *et al.*, (2016), mencionan que “la huella hídrica azul, se hace más relevante con la menor ocurrencia de precipitaciones, lo que implica una mayor demanda de agua de riego”, mientras Colombia presenta una precipitación media anual de 1,293.1 mm, en Guanajuato, México la precipitación media anual es de apenas 478.4 mm (Weather Spark, 2022).

Cuando el fenómeno climático de la niña se presenta en invierno y primavera, se presenta regularmente una sequía en el centro y norte de México. Lobato y Mejía (2021), coinciden que fue la situación que se presentó, debido a que se mantuvo la condición de la niña desde el último trimestre del año 2020, ocasionando que la temporada de lluvia estuviera por debajo de su valor promedio.

La relación de la HH gris que guardan los estudios es más acotada, las diferentes dosis de fertilización o falta de datos, son una posible causa de la diferenciación. Arenas *et al.* (2020), encontraron en el área estudiada que las proporciones de HH en la agricultura cambiaron de 18% (azul), 78% (verde) y 4% (gris) para un año húmedo (1030.6 mm, en 2007) a 68% (azul), 29% (verde) y 3% (gris) respecto a un año seco (675.1 mm, en 2015).

Sumando los componentes de Huella hídrica, se determinó la HH para cada cultivo por año agrícola y módulo, para agua superficial. Se analizó la HH total promedio de 14 cultivos, de los cuales el cacahuate, frijol y nopal reportan mayor HH; mientras que las hortalizas con los cultivos de lechuga, tomate de cáscara y zanahoria son las de menor HH (Cuadro 4-4).

Cuadro 4-4. Huella hídrica promedio de los cultivos del año agrícola 2020-2021 en el DR 011.

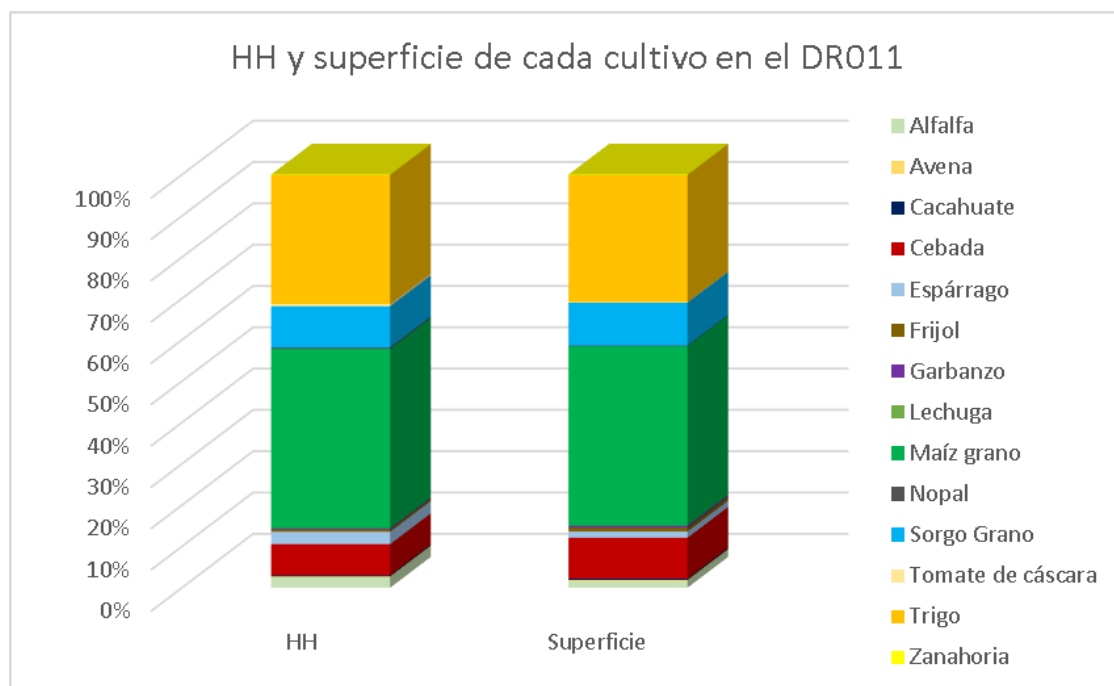
Cultivo\módulo	Huella hídrica dam ³ t ⁻¹										
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Alfalfa	0.4	0.7	0.5	0.3	2.4	0.7	0.4	1.1			
Avena	0.4	3.7		0.3	1.5		0.3				
Cacahuete		1.0			2.9						1.1
Cebada	0.7	1.3	0.9	0.8	0.9	1.0	0.9	1.0	0.9		1.0
Espárrago					2.5	1.5	3.3	2.6			
Frijol		1.9			1.3						
Garbanzo	1.5	0.6	1.9	1.2	1.6		1.1				
Lechuga					0.1						
Maíz grano	0.7	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.7
Nopal						1.8					
Sorgo Grano	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.8
Tomate de cáscara		0.3									
Trigo	0.9	1.1	1.2	1.1	0.9	1.2	1.1	1.1	1.2		1.2
Zanahoria		0.2									

Fuente: Elaboración propia con los resultados del estudio.

Los resultados de huella hídrica promedio de los cultivos del año agrícola de la presente investigación guardan relación con otro estudio de HH en DR 011. Magaña *et al.* (2017), contabilizaron la HH azul promedio de riego de presas como de bombeo y encontraron que los cultivos que tienen una HH azul menor son las hortalizas, representados por la lechuga, zanahoria y la sandía (21, 14 y 15 m³t⁻¹, respectivamente), mientras que los valores más altos son en los cultivos perennes como el espárrago, la alfalfa y el zacate (1,235, 452 y 333 m³t⁻¹, respectivamente).

En los resultados de HH de la producción total del DR 011 y su superficie de siembra (Figura 4-3), se observa que los cultivos de maíz y trigo tienen alto peso en términos de HH total, participando con el 74% del total; el maíz 43% y el trigo 31%, pero los cultivos representan respectivamente el 53% y 22% de la producción total del DR 011, al contraste con el cultivo de lechuga que representa apenas el 0.007% de la HH total con solo el 0.04% del total de la producción total. Los cultivos de maíz, trigo, sorgo y cebada necesitan grandes

cantidades de agua debido a la extensa superficie que ocupan, tan solo estos cuatro cultivos usan del 94% de la extensión de superficie de riego por gravedad.

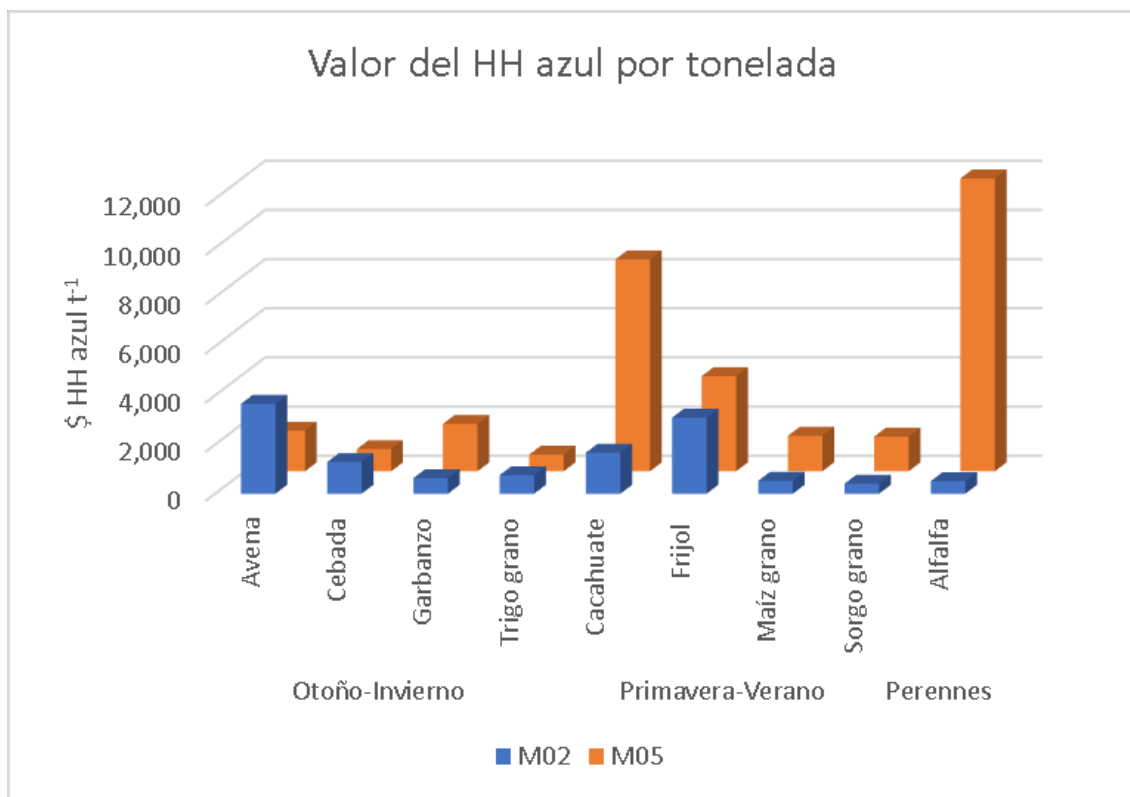


Fuente: Elaboración propia con los resultados del estudio.

Figura 4-3. Huella hídrica total de los cultivos del año agrícola 2020-2021 en el DR 011 y su superficie de siembra.

La relación entre la HH azul de los cultivos y el precio sombra del agua superficial, en los módulos 02 y 05 se utilizaron para conocer el valor de la HH azul por tonelada de cada cultivo (Figura 4-4).

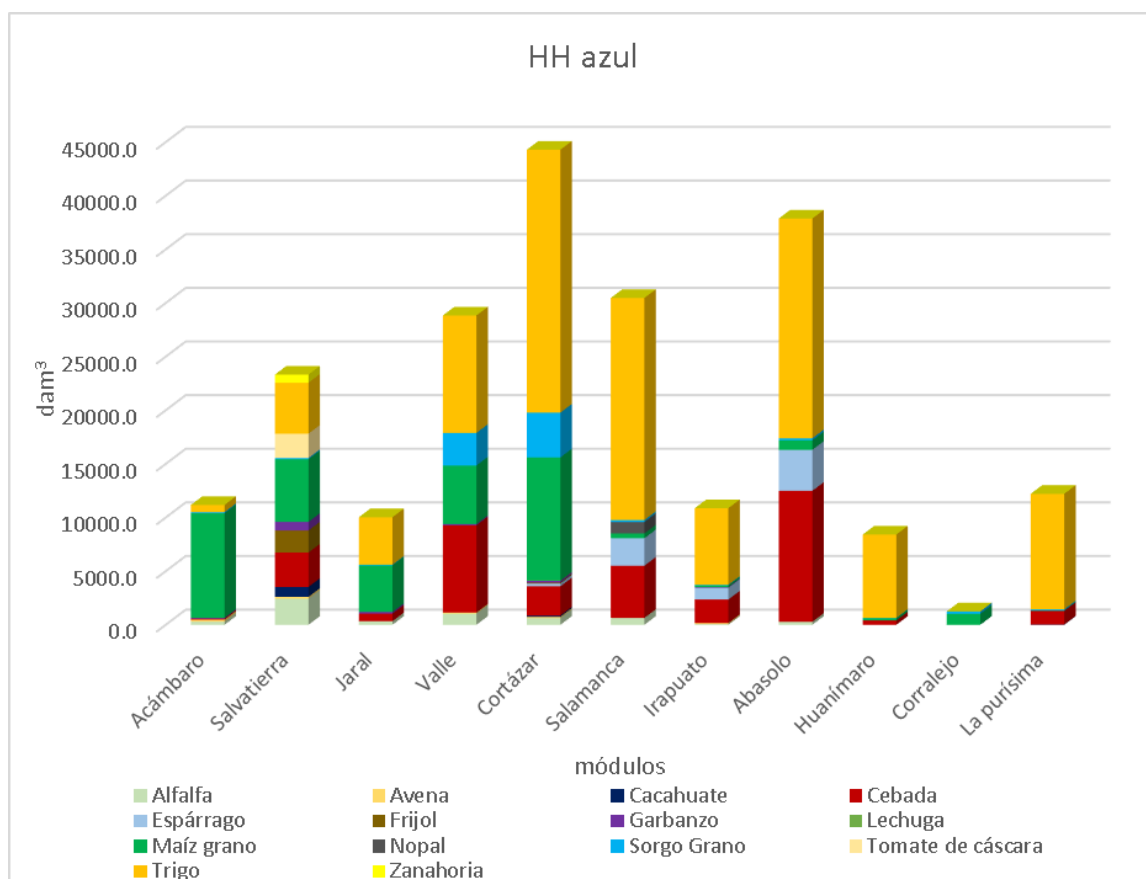
Los cultivos de alfalfa, cacahuete y frijol son los más costosos en términos de agua azul, principalmente debido a que presentan baja productividad agrícola respecto a otros módulos. Una de las características de la HH es que es un indicador espacial y temporal, el bajo rendimiento de estos cultivos puede ser causado por agentes negativos, externos y temporales, por lo tanto, se necesita un análisis profundo de las posibles causas para que se implemente una estrategia que ayude al aumento de la producción y así mejorar la sostenibilidad económica del uso del agua azul.



Fuente: Elaboración propia con los resultados del estudio.

Figura 4-4. Valor de la HH azul por tonelada de cultivos del M02 y M05.

En la figura 4-5 se presenta la distribución de HH azul por cultivo en cada módulo del DR 011, donde se observa gráficamente el peso que tiene la HH azul (dam³) de la producción total de los cultivos de trigo, maíz y cebada, que juntos suman el 85.8% del total de HH azul, con el 51.3, 18.1 y 16.4%, respectivamente. Resalta el módulo 05: Cortázar, como el de mayor HH azul coincidiendo con Magaña *et al.* (2017), mientras el módulo 10: Corralejo como el de menor HH azul, sin embargo, este último es el de menor superficie sembrada con menos del 1%.



Fuente: Elaboración propia con los resultados del estudio.

Figura 4-5. HH azul de cultivos por módulo del DR 011.

4.5 Conclusiones

Los porcentajes de HH azul, verde y gris son importantes para identificar la importancia del uso de agua utilizada para riego en la agricultura, el porcentaje azul será mayor cuando se tengan menores precipitaciones en la zona geográfica de estudio, la baja productividad de los cultivos ocasiona el aumento de las HH azul y verde. Es importante contar con datos precisos de la fertilización que se aplica a los cultivos porque la HH gris representa un porcentaje significativo en la contabilidad de la HH total, un uso eficiente de fertilizantes y plaguicidas puede disminuir considerablemente el componente gris.

Con el presente estudio de estimación de huella hídrica en la agricultura se muestra que es útil para definir los volúmenes de riego y es posible identificar

que la HH es un indicador que puede contribuir a la evaluación y mejora de la sostenibilidad económica del uso del agua en la agricultura, es posible reconocer los cultivos que pueden reducir su huella hídrica en favor de aumentar la eficiencia del uso del agua o ser considerados para ser remplazados por un patrón de cultivos que tengan una menor huella hídrica. El agua es un recurso importante en la agricultura y es primordial contar con medidas que ayuden a contribuir a un uso eficiente, principalmente donde se presente escasez de este recurso, como zonas áridas y semiáridas.

4.6 Literatura citada

Abbasi, H., Delavar, M., and Bigdeli, R. 2019. Evaluation of climate change impacts on water resource sustainability in river basins using the water footprint scarcity indicators. *Iran-Water Resources Research*. 15(4): 259-272.

Aivazidou, E., Tsolakis, N., Vlachos, D., and Iakovou, E. 2018. A water footprint management framework for supply chains under green market behaviour. *Journal of Cleaner Production*. 197: 592-606.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.171>

Allan, J.A. 1993. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydropolitical futures would be imposible. *In: Priorities for water resources allocation and management*. ODA. London. 13-26 pp.

Allan, J.A. 1994. Overall perspectives on countries and regions. *In: Water in the Arab World: perspectives and prognoses*. Rogers, P. and Lydon, P. (Eds). Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts. 65-100 pp.

Álvarez, C. E., Machuca, F. and Pérez, M. 2021. Water footprint in gold extraction: A case-study in Suárez, Cauca, Colombia. *Heliyon*. 7(9): e07949.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07949>

Álvarez, A., Morábito, J. A. y Schilardi, C. 2016. Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (*Zea mays*) en provincias del centro y noreste argentino. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 48(1): 161-177.
<https://www.redalyc.org/pdf/3828/382846012006.pdf>

- Arenas, C. F., Correa, S. N. y Pineda, S. M. 2020. Estimación de la huella hídrica en la producción agrícola de lima Tahití en la Cuenca La Angula, Santander, Colombia. Investigación y Ciencia. 28(79): 52-61.
<https://www.redalyc.org/journal/674/67462875006/html/>
- Bazrafshan, O., Zamani, H., Etedali, H. R., Moshizi, Z. G., Shamili, M., Ismaelpour, Y. and Gholami, H. 2020. Improving water management in date palms using economic value of water footprint and virtual water trade concepts in Iran. Agricultural Water Management. 229: 105941.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105941>
- Bernauer, T. and Böhmelt, T. 2020. International conflict and cooperation over freshwater resources. Nature Sustainability. 3(5): 350-356.
<https://doi.org/10.1038/s41893-020-0479-8>
- Botello, C., Valdivia, R., Hernández, J., Sangermán, D. M. and Gutiérrez, F. G. 2022. Reallocation of water in agriculture under drought conditions as economic efficiency maximizer. Agro Productividad.
<https://doi.org/10.32854/agrop.v15i8.2191>
- Cao, X., Zeng, W., Wu, M., Li, T., Chen, S. and Wang, W. 2021. Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint. Journal of Cleaner Production. 309: 127371.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127371>
- Chapagain, A. K. and Hoekstra, A. Y. 2004. Water footprints of nations. Unesco-IHE Institute for Water Education. 1(16): 11-75 pp.
<https://waterfootprint.org/en/resources/publications/value-water-research-report-series-unesco-ihe/>
- World Wildlife Fund (WWF). 2012. Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. Colombia. 1-40 pp.
https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/anexo_1_v2.pdf

- Dan, W., Hubacek, K., Shan, Y., Gerbens, W. and Liu, J. 2021. A Review of Water Stress and Water Footprint Accounting. *Water*. 2(13): 201. <https://doi.org/10.3390/w13020201>
- Ewaid, S. H., Abed, S. A., and Al-Ansari, N. (2019). Water footprint of wheat in Iraq. *Water*. 11(3): 535. <https://doi.org/10.3390/w11030535>
- Fernández, J. J. y Lloret, A. 2016. Consumo de agua y producto interno bruto en la cuenca Lerma-Chapala. *Tecnología y ciencias del agua*. 7(4): 129-138. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400129&lng=es&tlng=es
- Garay, Á. S., Valdivia, R., Hernández, J. y Sandoval, F. 2022. Estimación de la huella hídrica de la producción de caña de azúcar para los ingenios de la cuenca del Papaloapan. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 13(1): 103-113. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2581>
- Hoekstra, A. Y. and Hung, P. Q. 2003. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *In: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade*. 12: 25-48. <https://waterfootprint.org/en/resources/publications/value-water-research-report-series-unesco-ihe/>
- Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. 2006. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *In: Integrated assessment of water resources and global change*. Springer, Dordrecht. 35-48 pp. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1_3
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Mekonnen, M. M. and Aldaya, M. M. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775526>
- Hoekstra, A. Y. 2016. A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecological indicators*. 66: 564-573. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.026>

Magaña, J. D., Teresa, O. A. y Hernández, J. 2017. La Huella Hídrica de productos agrícolas de la subcuenca Salamanca. *In: Huella Hídrica en México: análisis y perspectivas*. Vazquez. R y Lambarri J.(eds.) Instituto Mexicano de Tecnología del Agua .Progreso, Morelos, México. 175-206 pp.

Kumar, T. 2021. Water footprints and water allocation in a sustainable manner. *Asian Journal of Multidimensional Research*. 10(12): 51-56. <https://doi.org/10.5958/2278-4853.2021.01185.x>

Lathuillière, M. J., Bulle, C. and Johnson, M. S. 2018. A contribution to harmonize water footprint assessments. *Global Environmental Change*. 53(): 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.004>

Liu, H., Ren, L., Zhuo, H. and Fu, S. 2019. Water footprint and water pinch analysis in Ethanol industrial production for water management. *Water*. 11(3): 518. <https://doi.org/10.3390/w11030518>

Lobato, R. y Mejía, P. I. 2021. Perspectiva sobre la sequía actual en México. *Perspectivas*. Núm. 16. IMTA. Morelos. 1-3 pp. <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-16>

Muthu, S. S. 2019. *Environmental Water Footprints (Agricultural and Consumer Products)*. Springer. Singapore. 119 pp. <http://doi.org/10.1007/978-981-13-2508-3>

Naranjo, J. F. y Reyes, H. 2021. Huella hídrica del cultivo de aguacate cv. Hass (*Persea americana* Mill.), en el Distrito de Conservación de Suelos Barbas-Bremen, Quindío, Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*. 15(29): 63-70. <https://doi.org/10.31908/19098367.1813>

Oltra, M. A., y Jiménez, F. 2018. La huella hídrica en el sector agrario de la Vega Baja. *In: Agroalimentación, agua y sostenibilidad*. Melgarejo, J.; Abadía, R. (eds.). Orihuela: Ayuntamiento; Alicante: Universidad, 2018. 91-99 pp. <http://hdl.handle.net/10045/83930>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2022. AQUASTAT - Mapa global de superficies de riego. Organización

de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/aquastat/es/geospatial-information/climate-information> Sitio accedido el 01 de abril del 2022.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). 2015. Principios de Gobernanza del Agua de la OCDE. <https://www.oecd.org/cfe/regional-policy/OECD-Principles-Waterspanish.pdf>

Pérez, R. H., Constantino, R. M. and Davila, H. R. (Eds.). 2016. Water, Food and Welfare: Water Footprint as a Complementary Approach to Water Management in Mexico. Springer. vol. 23. 252 pp. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-28824-6>

Ríos, J. L., Torres, M., Castro, R., Torres, M. A. y Ruiz Torres, J. 2015. Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. 47(1): 93-107.

Rodríguez, J. M., Medellín, J., Valdivia, R., Arana, O. A. and García, R. C. 2019. Insights from a Calibrated Optimization Model for Irrigated Agriculture under Drought in an Irrigation District on the Central Mexican High Plains. Water. 11(4): 858. <https://doi.org/10.3390/w11040858>

Sánchez, A. M. P., González, Á. B., López, S. V., Villanueva, J. L. J. y Nolasco, A. Q. 2020. Huella hídrica de los cultivos de cebolla (*Allium cepa*L.) y tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa*Brot.) en la región de Atlixco, Puebla, México. Tecnología y Ciencias del Agua. 11(5): 1-30. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-05-01>

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2015. Agenda Técnica Agrícola Michoacán. SAGARPA.

Singh, V. K., Rajanna, G. A., Paramesha, V. and Upadhyay, P. K. 2022. Agricultural Water Footprint and Precision Management. Sustainable Agriculture Systems and Technologies. 251-266 pp. <https://doi.org/10.1002/9781119808565.ch11>

Sun, Y. Y. and Hsu, C. M. 2019. The decomposition analysis of tourism water footprint in Taiwan: Revealing decision-relevant information. *Journal of Travel Research*. 58(4): 695-708. <https://doi.org/10.1177/0047287518757371>

Vargas, S. 2007. Agua y sociedad en el alto Lerma: El módulo Tepetitlán. *Agricultura, sociedad y desarrollo*. 4(1): 1-17.

Weather Spark (Estados Unidos da América). 2022. El clima y el tiempo promedio en todo el año en Guanajuato. Elaborado por Cedar Lake Ventures, Inc. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/y/4641/Clima-promedio-en-Guanajuato-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o> Acceso el 20 de octubre del 2022.

West, C. P., and Baxter, L. L. 2018. Water footprint of beef production on Texas High Plains pasture. *Water International*. 43(6): 887-891. <https://doi.org/10.1080/02508060.2018.1515574>

World Meteorological Organization (WMO). 1992. International conference on water and the environment: development issues for the 21st century, Dublin, Ireland: the Dublin statement and report of the conference. 64 p. <https://www.ircwash.org/resources/international-conference-water-and-environment-development-issues-21st-century-26-31-0>.

5 CONCLUSIONES GENERALES

La valoración del recurso hídrico utilizado en la agricultura con la comercialización del agua es un mecanismo eficiente en la economía de los recursos hídricos, es un posible instrumento que hace posible mejorar la gestión de la demanda y su distribución entre sus varios usos. Es necesario su consideración en políticas de gobernanza de los recursos hídricos.

Con la identificación de la productividad del agua se pueden fijar cuotas y precios del agua ante posibles transmisiones de derechos porque se observó que las cuotas de riego pagadas no representan el valor real del agua. Un ajuste en los precios de las tarifas puede beneficiar al desarrollo y mantenimiento de la infraestructura hidroagrícola del DR 011, que beneficie a los usuarios mejorando la eficiencia del uso del agua.

Para proponer medidas que contribuyan a mejorar la eficiencia del uso del agua, un indicador conveniente que puede ser utilizado es la huella hídrica, sus componentes azul, verde y gris son importantes para identificar la importancia del uso de agua utilizada para riego en la agricultura, puede contribuir a la evaluación y mejora de la sostenibilidad económica del agua utilizada en el riego de los cultivos agrícolas, principalmente donde se presente escasez de este recurso, como zonas áridas y semiáridas.

6 ANEXOS

Anexo 1. Información de Módulo 02 Salvatierra (Capítulo 3).

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 02 SALVATIERRA									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO						"GRAVEDAD"		AÑO AGRÍCOLA: 2016-2017	
Cultivo	Cultivo	Superficie (ha)	N° de	Laminas (cm)		Rendimiento	P.M.R 2020	C.P 2020	Precio Neto
		Sembrada	Riegos	Neta	Bruta	(ton/ha)			(\$/ha)
Ciclo: Otoño-Invierno									
	Avena Forrajera	52.01	3.00	63.53	118.45	12.00	2,223.83	17,234.67	9,451.27
	Brócoli	34.88	3.77	74.38	103.45	18.00	4,781.23	50,036.13	36,026.02
	Cacahuete	10.10	1.94	40.86	53.47	6.00	20,570.41	33,991.21	89,431.25
	Calabacita (cala	12.36	2.65	56.13	105.00	24.00	3,702.67	52,615.77	36,248.40
	Camote	36.46	2.93	61.46	115.79	25.00	6,671.48	21,648.97	145,138.14
	Cebada	954.73	3.56	72.41	128.06	6.00	5,337.19	20,570.41	11,452.71
	Frijol Asociado	512.90	5.27	101.06	168.79	2.00	22,238.28	22,794.24	21,682.32
	Garbenzo	136.62	1.51	32.91	60.59	8.00	3,057.76	11,007.95	13,454.16
	Maíz Elotero	97.19	3.84	77.81	147.72	18.00	2,223.83	25,462.83	14,566.07
	Tomate de cásc	409.61	4.80	93.51	155.81	25.00	3,891.70	31,133.59	66,158.89
	Zanahoria	158.29	4.28	83.74	151.60	40.00	1,111.91	25,685.21	18,791.35
Ciclo: Primavera-Verano									
	Brócoli	3.93	1.72	34.83	41.94	18.00	5,559.57	54,127.98	45,944.29
	Cacahuete	116.23	1.56	34.25	52.23	5.10	22,238.28	24,067.38	89,347.85
	Calabacita (cala	26.52	2.37	49.93	92.01	22.00	3,724.91	52,615.77	29,332.29
	Camote	37.08	2.12	46.33	83.24	26.50	5,559.57	21,126.37	126,202.25
	Frijol Asociado	208.86	3.69	73.76	126.77	2.50	22,238.28	22,238.28	33,357.42
	Garbenzo	71.08	1.29	28.45	50.92	9.00	3,335.74	12,019.79	18,001.89
	Maíz grano	4,225.23	2.62	54.75	94.38	12.10	3,780.51	26,074.38	19,669.76
	Sorgo Grano	94.48	2.10	45.49	79.67	9.00	3,780.51	21,187.52	12,837.05
	Tomate de cásc	149.18	2.73	57.04	92.10	25.40	3,891.70	31,133.59	67,715.57
	Zanahoria	8.39	2.99	61.19	108.66	40.00	1,111.91	25,574.02	18,902.54
Ciclo: Perennes									
	Alfalfa	884.53	3.42	68.30	122.73	20.50	2,223.83	21,493.30	24,095.18
	Chayote	2.84	2.84	57.39	106.53	23.60	2,779.79	36,693.16	28,909.77
	Guayabo	7.48	1.53	32.37	55.59	5.00	6,671.48	6,671.48	26,685.94
Ciclo: Segundos Cultivos									
	Maíz grano	2,905.09	1.66	34.45	60.05	12.00	3,780.51	19,992.21	25,373.88
	Sorgo Grano	66.21	1.11	24.08	42.53	9.00	3,780.51	18,852.50	15,172.07

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 02 SALVATIERRA									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('21','22')BOMBEO POZOS,						AÑO AGRÍCOLA: 2016-2017			
Cultivo		Superficie (ha)	N° de	Laminas (cm)		Rendimiento	P.M.R 2020	C.P 2020	Precio Neto
		Sembrada	Riegos	Neta	Bruta	(ton/ha)			(\$/ha)
Ciclo: Otoño-Invierno									
	Brócoli	95.49	3.87	76.90	89.53	18.00	4,781.23	48,090.28	37,971.87
	Calabacita (cala)	12.04	3.02	60.07	69.78	24.00	3,669.32	50,658.80	37,404.79
	Camote	14.37	2.98	61.38	71.52	26.00	6,671.48	23,127.81	150,330.78
	Cebada	582.23	3.77	74.76	86.99	7.00	5,337.19	19,458.50	17,901.82
	Cilantro	2.14	10.54	207.76	242.19	6.00	3,891.70	12,664.70	10,685.49
	Frijol Asociado	171.53	4.54	89.14	103.47	2.50	22,238.28	21,348.75	34,246.95
	Garbanzo	61.62	1.47	32.04	37.33	9.00	3,113.36	10,318.56	17,701.67
	Maíz Elotero	81.72	4.35	87.41	101.54	21.00	2,223.83	24,995.83	21,704.56
	Tomate de cásc	99.73	4.69	90.71	105.39	25.30	4,447.66	30,466.45	82,059.26
	Trigo Grano	728.11	4.21	81.99	95.37	7.00	4,225.27	18,124.20	11,452.71
	Zanahoria	482.82	4.29	82.82	96.34	42.20	1,111.91	24,350.92	22,571.86
Ciclo: Primavera-Verano									
	Brócoli	37.78	3.85	77.53	90.02	17.60	4,781.23	47,812.30	36,337.35
	Cacahuete								
	Camote								
	Frijol Asociado	215.16	3.05	62.35	72.23	2.65	22,238.28	19,892.14	39,039.30
	Maíz grano	1,151.99	2.54	53.69	62.16	12.00	3,780.51	28,020.23	17,345.86
	Sorqo Grano	63.50	3.79	77.30	89.52	9.50	3,780.51	20,570.41	15,344.41
	Tomate de cásc	158.88	3.75	77.28	89.69	25.50	4,447.66	30,466.45	82,948.79
	Zanahoria	82.90	4.19	82.34	95.61	42.00	1,111.91	25,907.60	20,792.79
Ciclo: Perennes									
	Alfalfa	493.60	4.43	85.41	99.16	23.30	2,223.83	20,570.41	31,244.78
	Chayote								
	Fresa								
Ciclo: Segundos Cultivos									
	Frijol (Alubia)								
	Frijol Asociado	4.39	1.00	21.98	25.40	2.60	21,882.47	19,313.95	37,580.47
	Maíz grano	1,957.14	1.24	26.11	30.17	12.00	3,780.51	18,346.58	27,019.51
	Sorqo Grano								

Anexo 2. Información de Módulo 05 Cortázar (Capítulo 3).

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 05 CORTAZAR									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO						"GRAVEDAD"		AÑO AGRÍCOLA: 2016-2017	
Cultivo		Superficie (ha)	N° de	Laminas (cm)		Rendimiento	P.M.R 2020	C.P 2020	Precio Neto
		Sembrada	Riegos	Neta	Bruta	(ton/ha)			(\$/ha)
Ciclo: Otoño-Invierno									
	Avena Forrajera	27.82	1.66	31.16	48.07	9.00	1,801.30	14,610.55	1,601.16
	Cacahuete	8.66	1.24	26.56	43.35	3.29	18,902.54	38,538.94	23,650.41
	Cebada	3,845.50	3.01	59.39	87.67	5.74	5,206.54	17,862.90	12,022.63
	Frijol (Alubia)	10.36	3.04	64.07	92.21	3.12	21,126.37	21,793.52	44,120.75
	Lechuga	4.12	2.99	60.44	91.40	16.83	2,223.83	29,521.32	7,905.71
	Trigo Grano	3,782.75	3.77	72.15	104.91	6.80	4,253.07	20,981.82	7,939.07
Ciclo: Primavera-Verano									
	Avena Forrajera	2.00	2.00	41.00	51.29	12.00	1,667.87	14,610.55	5,403.90
	Cacahuete	7.53	1.00	21.91	27.44	6.50	13,898.93	38,538.94	51,804.08
	Cebada	28.00	1.00	20.82	25.68	7.00	5,003.61	17,862.90	17,162.39
	Frijol Asociado	11.80	1.00	22.88	28.22	2.00	16,678.71	21,793.52	11,563.91
	Garbanzo	31.45	1.00	22.26	27.50	3.20	20,014.45	10,985.71	53,060.54
	Maíz grano	936.50	1.95	38.95	60.60	12.00	3,780.51	21,904.71	23,461.39
	Sorgo Grano	16.84	1.36	28.98	42.60	9.00	4,247.51	19,447.38	18,780.23
	Tomate de cásc	1.30	3.00	61.54	79.09	15.00	5,337.19	53,927.83	26,129.98
Ciclo: Perennes									
	Espárrago	3.60	1.56	25.83	38.41	3.00	38,916.99	67,708.89	49,042.08
Ciclo: Segundos Cultivos									
	Lechuga	1.38	1.00	23.19	43.42	25.00	4,002.89	29,521.32	70,550.95
	Maíz grano	3,126.24	1.31	27.47	49.15	12.00	3,780.51	27,642.18	17,723.91
	Sorgo Grano	4,506.58	1.06	21.43	37.25	9.00	3,669.32	19,447.38	13,576.47

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 05 CORTAZAR									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('21','22')BOMBEO POZOS,					AÑO AGRÍCOLA: 2016-2017				
Cultivo		Superficie (ha)	N° de	Laminas (cm)		Rendimiento	P.M.R 2020	C.P 2020	Precio Neto
		Sembrada	Riegos	Neta	Bruta	(ton/ha)			(\$/ha)
Ciclo: Otoño-Invierno									
	Ajo	46.40	3.02	56.42	59.39	5.00	66,714.84	91,369.31	242,204.90
	Brócoli	571.09	3.30	67.89	71.47	12.72	5,003.61	62,014.78	1,631.18
	Cacahuete	1.05	1.00	20.95	22.06	3.29	18,902.54	38,538.94	23,650.41
	Cebada	3,080.32	2.33	45.91	48.33	8.38	5,003.61	18,593.43	23,336.85
	Cebolla	235.69	2.91	54.58	57.45	38.24	4,447.66	47,482.07	122,596.31
	Coliflor	154.74	3.51	68.38	71.98	18.00	5,559.57	94,512.69	5,559.57
	Frijol (Alubia)	20.00	1.00	20.60	21.68	3.50	21,126.37	21,793.52	52,148.77
	Garbanzo	11.24	1.00	22.06	23.23	9.00	6,671.48	10,985.71	49,057.65
	Jitomate (tomate)	10.10	2.00	38.12	40.13	22.00	6,115.53	98,960.35	35,581.25
	Lechuga	887.25	3.00	58.09	61.14	26.16	3,335.74	34,292.54	52,970.47
	Trigo Grano	1,174.25	3.06	59.33	62.45	7.05	4,225.27	21,789.07	7,999.11
	Zanahoria	2.00	4.00	79.00	83.16	35.00	4,447.66	42,615.22	113,052.75
Ciclo: Primavera-Verano									
	Cebada	4.15	1.00	21.20	22.32	7.00	5,003.61	18,593.43	16,431.87
	Frijol Asociado								
	Lechuga	15.85	1.00	21.39	22.51	25.00	4,002.89	34,292.54	65,779.72
	Maíz grano								
	Sorqo Grano								
	Trigo Grano	134.09	1.00	21.35	22.48	7.00	5,003.61	21,395.45	13,629.84
Ciclo: Perennes									
	Espárrago	480.90	2.68	50.94	53.63	3.00	38,916.99	67,708.89	49,042.08
	Fresa	78.65	2.88	61.39	64.62	19.00	17,790.62	37,876.24	300,145.63
Ciclo: Segundos Cultivos									
	Cebolla								
	Lechuga	18.50	1.00	21.46	22.59	25.00	4,002.89	34,292.54	65,779.72
	Maíz grano	5,029.71	1.00	21.28	22.40	11.25	3,780.51	23,003.28	19,527.43
	Sorqo Grano	1,139.90	1.00	21.26	22.38	9.00	3,669.32	2,054.82	30,969.03

Anexo 3. Información de producción por módulo de riego modalidad “riego por gravedad” (Capítulo 4).

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 01 ACAMBARO										
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO						AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha) Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)	
Ciclo: Otoño-Invierno										
Avena Forrajera	90.00	3.00	66.00	10.00	900.00	1,350.00	1,215.00	10,890.00	234.90	
Cebada	30.00	3.00	66.00	6.50	195.00	4,650.00	906.75	22,000.00	246.75	
Garbanzo	30.00	1.00	22.00	2.50	75.00	1,600.00	120.00	4,600.00	-18.00	
Trigo Grano	200.00	4.00	88.00	6.80	1,360.00	3,750.00	5,100.00	25,000.00	100.00	
Ciclo: Primavera-Verano										
Avena Forrajera	15.00	2.00	44.00	10.00	150.00	1,375.00	206.25	10,890.00	42.90	
Garbanzo	15.00	1.00	22.00	2.20	33.00	1,600.00	52.80	4,600.00	-16.20	
Maíz grano	6,785.00	2.13	45.96	10.25	69,546.25	3,800.00	264,275.75	20,860.00	122,740.65	
Sorgo Grano	130.00	2.00	44.00	9.44	1,227.20	3,800.00	4,663.36	18,100.00	2,310.36	
Ciclo: Perennes										
Alfalfa	110.00	5.18	114.00	22.00	2,420.00	1,750.00	4,235.00	18,500.00	2,200.00	

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 02 SALVATIERRA									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO					AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)
Ciclo: Otoño-Invierno									
Avena	50.00	2.70	56.00	1.20	60.00	2,000.00	120.00	25,000.00	-1,130.00
Cebada	700.00	2.81	56.29	4.57	3,199.00	6,800.00	21,753.20	26,000.00	3,553.20
Frijol Asociado	500.00	3.86	77.48	2.15	1,075.00	24,116.28	25,925.00	19,200.00	16,325.00
Garbanzo	150.00	1.90	39.00	6.00	900.00	3,500.00	3,150.00	13,000.00	1,200.00
Tomate de cásc	340.00	3.82	76.82	23.00	7,820.00	7,000.00	54,740.00	32,000.00	43,860.00
Trigo grano	1,350.00	3.71	72.80	6.00	8,100.00	6,800.00	55,080.00	25,400.00	20,790.00
Zanahoria	150.00	4.00	80.00	26.00	3,900.00	2,000.00	7,800.00	30,000.00	3,300.00
Ciclo: Primavera-Verano									
Cacahuete	220.00	1.76	40.80	5.27	1,159.40	30,000.00	34,782.00	45,000.00	24,882.00
Frijol Asociado	230.00	2.90	62.14	2.59	595.70	15,063.03	8,973.05	29,000.00	2,303.05
Garbanzo	100.00	1.80	37.00	6.50	650.00	3,500.00	2,275.00	15,000.00	775.00
Maíz grano	3,200.00	3.53	74.43	14.00	44,800.00	6,000.00	268,800.00	32,000.00	166,400.00
Sorqo grano	100.00	2.70	58.00	11.00	1,100.00	5,800.00	6,380.00	25,000.00	3,880.00
Tomate de cásc	150.00	3.00	63.00	25.00	3,750.00	7,000.00	26,250.00	32,000.00	21,450.00
Ciclo: Perennes									
Alfalfa	660.00	4.73	90.91	14.09	9,299.40	3,500.00	32,547.90	26,000.00	15,387.90
Ciclo: Segundos Cultivos									
Frijol Asociado	100.00	1.80	36.20	2.50	250.00	15,000.00	3,750.00	28,000.00	950.00
Maíz grano	2,400.00	1.00	21.00	11.42	27,408.00	6,000.00	164,448.00	30,416.67	91,447.99
Sorqo Grano	110.00	1.00	21.00	10.00	1,100.00	5,800.00	6,380.00	24,000.00	3,740.00

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 03 JARAL									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO					AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)
Ciclo: Otoño-Invierno									
Cebada	200.00	3.00	59.00	5.00	1,000.00	6,000.00	6,000.00	23,000.00	1,400.00
Garbanzo	50.00	1.00	24.40	1.80	90.00	10,000.00	900.00	11,000.00	350.00
Trigo grano	1,200.00	4.00	81.00	5.50	6,600.00	5,800.00	38,280.00	25,000.00	8,280.00
Ciclo: Primavera-Verano									
Maíz grano	1,186.65	4.00	79.00	12.00	14,239.80	5,000.00	71,199.00	34,000.00	30,852.90
Ciclo: Perennes									
Alfalfa	100.00	5.00	103.00	20.00	2,000.00	2,600.00	5,200.00	35,000.00	1,700.00
Ciclo: Segundos Cultivos									
Maíz grano	1,300.00	2.00	43.00	11.00	14,300.00	5,000.00	71,500.00	30,000.00	32,500.00
Sorgo grano	150.00	2.00	43.00	10.00	1,500.00	4,000.00	6,000.00	25,000.00	2,250.00

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 04 VALLE									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO					AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)
Ciclo: Otoño-Invierno									
Avena	27.00	2.00	37.00	18.00	486.00	1,000.00	486.00	15,000.00	81.00
Cebada	2,245.00	3.00	53.92	6.00	13,470.00	6,200.00	83,514.00	22,735.86	32,471.99
Garbanzo	35.00	1.00	20.71	2.86	100.10	13,000.00	1,301.30	18,000.00	671.30
Trigo	2,935.00	4.00	70.87	6.00	17,610.00	6,900.00	121,509.00	22,938.70	54,183.92
Ciclo: Primavera-Verano									
Maíz grano	210.00	4.00	71.00	14.00	2,940.00	6,200.00	18,228.00	29,000.00	12,138.00
Sorgo grano	100.00	4.00	71.00	12.80	1,280.00	5,900.00	7,552.00	24,000.00	5,152.00
Ciclo: Perennes									
Alfalfa	279.00	5.00	85.85	37.71	10,521.09	1,442.77	15,179.51	45,139.78	2,585.51
Ciclo: Segundos Cultivos									
Maíz grano	3,039.00	1.00	20.00	11.12	33,793.68	6,200.00	209,520.82	28,000.00	124,428.82
Sorgo grano	2,203.00	1.00	20.00	10.15	22,360.45	5,900.00	131,926.66	24,361.10	78,259.15

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 05 CORTAZAR									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO					AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)
Ciclo: Otoño-Invierno									
Avena	32.00	2.00	41.00	3.00	96.00	4,800.00	460.80	12,850.00	49.60
Cebada	756.00	3.00	60.00	5.50	4,158.00	5,600.00	23,284.80	16,772.00	10,605.17
Garbanzo	50.00	1.00	22.00	2.50	125.00	14,500.00	1,812.50	9,350.00	1,345.00
Lechuga	12.00	4.00	69.00	26.00	312.00	7,500.00	2,340.00	30,841.00	1,969.91
Trigo Grano	6,600.00	4.00	70.00	7.50	49,500.00	6,100.00	301,950.00	19,746.00	171,626.40
Ciclo: Primavera-Verano									
Cacahuete	25.00	1.00	26.00	2.00	50.00	14,000.00	700.00	14,500.00	337.50
Frijol	20.00	4.00	77.00	4.00	80.00	3,000.00	240.00	23,020.00	-220.40
Maíz grano	200.00	3.00	62.00	12.00	2,400.00	5,900.00	14,160.00	20,800.00	10,000.00
Sorqo Grano	35.00	3.00	60.00	10.00	350.00	5,400.00	1,890.00	18,148.00	1,254.82
Ciclo: Perennes									
Alfalfa	150.00	5.00	96.00	4.50	675.00	4,500.00	3,037.50	27,625.00	-1,106.25
Espárrago	50.00	3.00	64.00	5.00	250.00	46,000.00	11,500.00	60,288.00	8,485.60
Ciclo: Segundos Cultivos									
Maíz grano	5,250.00	1.00	22.00	11.00	57,750.00	5,200.00	300,300.00	30,841.00	138,384.75
Sorqo Grano	2,200.00	1.00	22.00	10.00	22,000.00	3,800.00	83,600.00	20,800.00	37,840.00

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 06 SALAMANCA										
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO						AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)	
Ciclo: Otoño-Invierno										
Cebada	1,300.00	3.00	52.62	5.00	6,500.00	6,100.00	39,650.00	36,461.00	-7,749.30	
Trigo grano	5,370.00	4.00	70.99	5.50	29,535.00	6,000.00	177,210.00	37,761.00	-25,566.57	
Ciclo: Perennes										
Alfalfa	150.00	5.00	89.20	16.00	2,400.00	2,800.00	6,720.00	31,347.00	2,017.95	
Espárrago	480.00	2.00	40.63	8.70	4,176.00	40,972.00	171,099.07	199,709.00	75,238.75	
Nopal	150.00	2.00	38.00	8.00	1,200.00	18,000.00	21,600.00	77,970.00	9,904.50	
Ciclo: Segundos Cultivos										
Maíz grano	5,000.00	1.00	20.00	10.00	50,000.00	5,900.00	295,000.00	50,467.00	42,665.00	
Sorgo Grano	1,300.00	1.00	20.00	8.00	10,400.00	5,600.00	58,240.00	41,845.00	3,841.50	

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 07 IRAPUATO									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO					AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)
Ciclo: Otoño-Invierno									
Avena	25.00	3.00	60.00	16.00	400.00	2,000.00	800.00	18,300.00	342.50
Cebada	550.00	3.00	63.00	5.50	3,025.00	5,900.00	17,847.50	24,000.00	4,647.50
Garbanzo	15.30	1.00	22.00	3.50	53.55	14,000.00	749.70	19,000.00	459.00
Trigo grano	1,748.00	4.00	83.00	6.50	11,362.00	6,000.00	68,172.00	25,500.00	23,598.00
Ciclo: Perennes									
Alfalfa	15.00	3.00	61.00	29.00	435.00	3,500.00	1,522.50	42,500.00	885.00
Espárrago	200.00	3.00	61.00	4.00	800.00	38,000.00	30,400.00	99,000.00	10,600.00
Ciclo: Segundos Cultivos									
Maíz grano	1,698.00	1.00	22.00	11.00	18,678.00	6,000.00	112,068.00	30,000.00	61,128.00
Sorgo Grano	300.00	1.00	22.00	9.00	2,700.00	5,700.00	15,390.00	24,000.00	8,190.00

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 08 ABASOLO										
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO						AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)	
Ciclo: Otoño-Invierno										
Cebada	3,097.00	3.00	47.35	5.00	15,485.00	5,900.00	91,361.50	26,220.00	10,158.16	
Trigo grano	5,022.00	4.00	67.22	6.00	30,132.00	5,900.00	177,778.80	25,470.00	49,868.46	
Ciclo: Primavera-Verano										
Maíz grano	900.00	1.00	19.00	11.00	9,900.00	5,900.00	58,410.00	33,410.00	28,341.00	
Ciclo: Perennes										
Alfalfa	68.00	5.00	82.00	10.50	714.00	3,000.00	2,142.00	23,820.00	522.24	
Espárrago	715.00	3.00	56.00	5.04	3,603.60	50,000.00	180,180.00	122,268.00	92,758.38	
Ciclo: Segundos Cultivos										
Maíz grano	6,302.00	1.00	18.73	11.00	69,322.00	5,900.00	408,999.80	33,410.00	198,449.98	
Sorgo Grano	937.00	1.00	18.55	9.00	8,433.00	5,700.00	48,068.10	21,900.00	27,547.80	

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 09 HUANIMARO									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO					AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha) Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)
Ciclo: Otoño-Invierno									
Cebada	100.00	4.00	66.00	6.00	600.00	5,000.00	3,000.00	32,800.00	-280.00
Trigo grano	1,900.00	4.00	66.00	6.00	11,400.00	6,000.00	68,400.00	36,000.00	0.00
Ciclo: Segundos Cultivos									
Maíz grano	1,800.00	1.00	22.00	12.00	21,600.00	5,800.00	125,280.00	43,000.00	47,880.00
Sorqo Grano	200.00	1.00	22.00	10.00	2,000.00	5,700.00	11,400.00	35,700.00	4,260.00

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 10 CORRALEJO									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO					AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha) Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)
Ciclo: Primavera-Verano									
Maíz grano	550.00	2.20	50.20	14.00	7,700.00	5,500.00	42,350.00	28,000.00	26,950.00
Sorqo grano	144.00	2.00	46.00	12.00	1,728.00	5,200.00	8,985.60	25,000.00	5,385.60

DR 011 ALTO RÍO LERMA, GTO. - SOCIEDAD SRL1 SOCIEDAD - MODULO 11 LA PURISIMA									
TIPO DE APROVECHAMIENTO: ('01','32')CONCENTRADO					AÑO AGRÍCOLA: 2020-2021				
Cultivo	Superficie (ha Sembrada	N° de Riegos	Laminas (cm) Neta	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Valor Cosecha (miles \$)	Costo Prod (\$/ha)	Precio Neto (miles \$)
Ciclo: Otoño-Invierno									
Cebada	308.00	3.00	45.00	5.00	1,540.00	5,200.00	8,008.00	24,421.91	486.05
Trigo Grano	2,532.00	4.00	62.00	6.00	15,192.00	5,800.00	88,113.60	26,383.28	21,311.14
Ciclo: Primavera-Verano									
Cacahuete	38.50	2.00	34.00	5.00	192.50	6,250.00	1,203.13	17,490.00	529.76
Ciclo: Segundos Cultivos									
Maíz grano	1,010.00	1.00	18.00	10.00	10,100.00	5,800.00	58,580.00	23,500.00	34,845.00
Sorgo Grano	1,830.00	1.00	18.00	8.00	14,640.00	5,600.00	81,984.00	22,800.00	40,260.00

