



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN SOCIOECONOMÍA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA
ECONOMÍA

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA PARA RIEGO BAJO ESCENARIOS DE ESCASEZ EN EL DISTRITO DE RIEGO DR011, ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO, MÉXICO

JOSÉ MANUEL RODRÍGUEZ FLORES

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION


En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe José Manuel Rodríguez Flores, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Oscar Antonio Arana Coronado, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Valoración económica del agua para riego bajo condiciones de escasez, en el distrito de riego DR011 Alto Rio Lerma, Guanajuato, México

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 18 de Septiembre de 2018



Firma del
Alumno (a)



Dr. Oscar Antonio Arana Coronado
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA PARA RIEGO BAJO ESCENARIOS DE ESCASEZ EN EL DISTRITO DE RIEGO DR011, ALTO RIO LERMA, GUANAJUATO, MÉXICO**, realizada por el alumno: **JOSÉ MANUEL RODRÍGUEZ FLORES** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

**SOCIOECONOMÍA ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA
ECONOMÍA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Oscar Antonio Arana Coronado

ASESOR



Dr. Roberto Carlos García Sánchez

ASESOR



Dr. Ramón Valdivia Alcalá

Montecillo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2018

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA PARA RIEGO BAJO ESCENARIOS DE ESCASEZ EN EL DISTRITO DE RIEGO DR011, ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO, MÉXICO

José Manuel Rodríguez Flores, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

En los últimos años se ha observado que el agua es más escasa y los retos hídricos en el país son cada vez más graves. En particular la agricultura es el sector con mayor uso consuntivo de agua en México. Por ello deben desarrollarse estrategias y políticas que gestionen su uso de forma eficiente, para lo que es necesario conocer el valor económico del agua dentro del sector. Esta investigación aplica la valoración económica del agua de uso agrícola en los módulos que componen el Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma, en el Estado de Guanajuato, México. Utilizando una metodología de valoración deductiva: la programación matemática positiva (PMP). Se usó como base la producción; consumo de agua del año agrícola 2016-2017 y datos medios de los años agrícolas 2014 a 2017 sobre precios medios rurales, rendimientos y costos de producción. Los resultados demuestran que el valor económico del agua es de 1.8 a 4.7 veces la cuota pagada por los usuarios en el año 2016-17, que es de \$500 pesos por hectárea por riego. La disposición de pago aumentaría cuando el agua escasea, en un escenario del 25% de 1.8 a 5.8 veces la cuota pagada en el año base y de 3.6 a 14.8 cuando la escasez es del 50%. Se esperaría que un aumento en el precio de esta cuota promueva un uso eficiente del recurso. Se evaluó la viabilidad de crear un mercado formal de agua en el distrito de riego, como un mecanismo para lograr un uso eficiente de la misma y disminuir los impactos económicos de la escasez. Con los resultados se comprueba que la creación de un mercado de agua donde los módulos tienen la posibilidad de venta y compra de derechos de esta a un precio de \$31.58 dam^{-3} cuando es del 25% y de \$64.74 dam^{-3} cuando es del 50%. Esto permite al distrito de riego sobre la superficie irrigada y el patrón de cultivos óptimo, reducir la pérdida en el ingreso neto de los módulos y del distrito de riego.

Palabras clave: Valoración económica del agua para la agricultura; Programación matemática positiva; Guanajuato.

ECONOMIC VALUATION OF IRRIGATION WATER UNDER DROUGHT SCENARIOS IN THE IRRIGATION DISTRICT DR011, ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO, MEXICO

José Manuel Rodríguez Flores, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

In the last years it has been observed that water scarcity and water challenges in the country are increasing. This situation puts at risk the development of the different economic activities. Particularly the agriculture is the sector with the greatest water consumptive use in Mexico. Therefore, strategies and policies must be developed to manage the use of water efficiently, for which is necessary to know the economic value of water within each sector. This research applies the economic valuation of water for agricultural use in the modules that compose the Irrigation District 011, Alto Rio Lerma, in the state of Guanajuato, Mexico. Using a deductive valuation methodology: Positive mathematical programming (PMP). The production and use of water data are from the 2016-17 and the used average data for rural prices, yields and production costs are from the years 2014 to 2017. The results show that the economic value of water is 1.8 to 4.7 times the fee paid by users in 2016-17, which is \$500 pesos per irrigated hectare. This value would increase when water becomes scarcer, in a scenario of 25% drought increases from 1.8 to 5.8 times the quota paid and from 3.6 to 14.8 when the drought is extreme of 50% drought. It would be expected that an increase in the price of this fee will encourage an efficient use of the resource. The feasibility of creating a water market as a mechanism to achieve an efficient use of water and reduce the impacts of drought conditions, was evaluated. The results show that the creation of a water market, which the irrigation modules have the possibility of selling and buying water rights at a price of \$600 dam^{-3} when the drought is of 25% and \$1,230 dam^{-3} in a 50% drought. Allows the irrigation district, with aggregate effects on the irrigated area and on the optimum crop pattern, the capacity to reduce the losses in the net profit of the irrigation modules and the irrigation district.

Keywords: Economic value of irrigation water; Positive mathematical programming; Guanajuato.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por sufragar mis estudios de maestría y estancia de investigación.

Al Colegio de Postgraduados, por los recursos bibliográficos, materiales y humanos que fueron esenciales para mi formación académica e investigación.

A los miembros de mi consejo particular: Dr. Oscar Antonio Arana Coronado, por su paciencia, consejos y motivación. Al Dr. Ramón Valdivia Alcalá, por sugerirme el tema de investigación, que ahora es de gran interés para mí desarrollo académico, por sus consejos claves para realizar esta investigación, apoyo y amistad. Al Dr. Roberto Carlos García Sánchez, por sus recomendaciones y apoyo durante mi estancia como estudiante. A ellos les agradezco ser una parte fundamental en mi formación académica y humana.

Al Dr. Josué Medellín Azuara, por la invitación a realizar una estancia de investigación en UC Merced, por la enseñanza de la metodología aplicada en esta investigación y por permitirme trabajar con él y su equipo.

Al Ing. Alfredo Marmolejo Cervantes, coordinador de operación hidráulica y cultura del agua de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego 011, por el aporte de los datos para esta investigación.

Al Ing. Vertario Trejo Segura, jefe de operaciones de la Jefatura del Distrito de Riego 011, dirección local de Guanajuato, de CONAGUA y al Ing. Juan Martin Vera Arroyo, jefe de unidad de riego Cortázar, del Distrito de Riego 011, por su gran apoyo y tiempo para la proporción de datos.

A los profesores del Posgrado de Socioeconomía, Estadística e Informática que me impartieron cursos, brindaron sus consejos y recomendaciones.

A Verónica Campos Santoyo, secretaria de la coordinación del posgrado de Economía, por su gran apoyo administrativo.

A la Ing. Malinali Santacruz Carillo por su ayuda en el material cartográfico.

DEDICATORIA

A mis padres quienes siempre me han apoyado y amado incondicionalmente, me han enseñado e inculcado los valores para formar la persona que ahora soy.

A mi hermana Lili por su amor y motivación, por ser una compañera en la vida.

A mi familia.

A mis amigos: Manuel, Diana, Malinali, Chava y Uriel.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
DEDICATORIA	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xi
SIGLAS	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	4
1.2.1 General	4
1.2.2 Particulares	4
1.3 Hipótesis	4
1.3.1 General	4
1.3.2 Particulares	4
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	8
3.1 Conceptos básicos	8
3.2 Agua como insumo en la producción agrícola	9
3.3 Métodos de valoración económica del agua	10
3.4 Programación matemática positiva (PMP).....	11
3.4.1 Etapa 1: Modelo lineal	12
3.4.2 Etapa dos: Función de costos cuadrática.....	16
3.4.3 Etapa tres: Modelo no-lineal de producción	17
3.5 Demanda de agua en la agricultura.....	17
CAPÍTULO IV. ÁREA DE ESTUDIO	19
4.1 Características generales del distrito de riego	21
4.2 Recursos Hídricos	22
4.3 Operación Distrito de Riego Alto Rio Lerma	27
4.4 Agricultura en el Distrito de Riego 011	31

4.5 Módulos de riego.....	33
CAPÍTULO V. METODOLOGÍA	34
5.1 Actividades seleccionadas	35
5.2 Costos de producción, precios medios rurales y rendimientos.....	37
5.3 Uso del agua	38
5.4 Modelo de programación matemática positiva	39
CAPÍTULO VI. RESULTADOS	44
4.1 Valor económico del agua en escenarios de escasez	44
4.2 Mercado de agua eficiente en el DR011 como mecanismo frente a la escasez.....	47
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXOS.....	63
Anexo I: Información utilizada en el modelo de programación matemática positiva.	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Función de producción neoclásica	10
Figura 2: Curva de demanda.....	18
Figura 3: Mapa del distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma.....	19
Figura 4: Climograma del distrito de riego 011 2013-2018	21
Figura 5: Cuenca Lerma-Chapala y Distrito de Riego Alto Rio Lerma.....	23
Figura 6: Uso de agua por modulo del DR011	34
Figura 7: Evolución entrega de agua del DR011 en el año agrícola 2016-2017	39
Figura 8: Precios sombra del agua en los módulos de riego	46
Figura 9: Volumen de agua usado por los módulos de riego con escasez del 25% (dam ³) ..	49
Figura 10: Volumen de agua usado por los módulos de riego con escasez del 50% (dam ³).50	

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características de los módulos de riego del DR011	20
Tabla 2: Distritos de riego de la cuenca Lerma-Chapala.....	23
Tabla 3: Características de las presas abastecedoras del DR011.....	24
Tabla 4: Disponibilidad de aguas de los acuíferos de los que extraen agua los módulos del DR011.....	25
Tabla 5: Volumen concesionado por modulo del DR011 Alto Río Lerma	26
Tabla 6: Almacenamiento sistema de presas del DR011 2008-2017	30
Tabla 7: Volumen extraído de pozos por el DR011 2009-2017.....	30
Tabla 8: Evolución de la cuota por agua de gravedad en los últimos diez años DR011	31
Tabla 9: Producción media por ciclo en el DR011 2014-2017	32
Tabla 10: Cultivos principales en el DR011 2014-2017	32
Tabla 11: Superficie sembrada por modulo 2016-2017	33
Tabla 12: Volumen de agua usado por módulo de riego 2016-2017 (dam ³).....	34
Tabla 13: Patrón de cultivos seleccionados para el Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma del año base 2016-2017	36
Tabla 14: Datos medios: precio medio rural, costos y rendimientos 2014-2017	37
Tabla 15: Precios sombra del agua por módulo de riego (MXN pesos/dam ³)	45
Tabla 16: Elasticidad precio del agua en los módulos de riego.....	47
Tabla 17:Superficie sembrada (ha) con y sin escasez y mercado de agua.	51
Tabla 18:Ingreso neto de los módulos del DR011 con y sin escasez del 25% y mercados de agua (millones de MXN \$)	53
Tabla 19: Ingreso neto de los módulos del DR con y sin escasez del 50% y mercados de agua (millones de MXN \$).....	54

SIGLAS

CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
dam ³	Decámetros cúbicos (1000 m ³)
DOF	Diario Oficial de la Federación
DR	Distrito de Riego
DR011	Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
ha	Hectárea(s)
m ³	Metros cúbicos
Mm ³	Millones de metros cúbicos
MXN \$	Pesos mexicanos
PM	Programación matemática
PL	Programación lineal
PMP	Programación matemática positiva
O-I	Ciclo agrícola otoño-invierno
P-V	Ciclo agrícola primavera-verano
REPDA	Registro público de derechos de agua
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SE	Secretaría de Economía
S. de R.L.	Sociedad de Responsabilidad Limitada
t	Tonelada(s)

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En México la dinámica poblacional, el crecimiento de las actividades económicas sean agrícolas, comerciales e industriales, el crecimiento de la mancha urbana, la sobreexplotación de los acuíferos, la contaminación de los cuerpos hídricos, degradación de las cuencas y los efectos del cambio climático, constituyen un panorama adverso en el sector hídrico del país, que pone en riesgo el acceso y disponibilidad de agua para los diferentes usos y el medio ambiente.

La agricultura es el sector con mayor uso consuntivo en el mundo de aguas superficiales y subterráneas, en México consume en promedio el 75% del agua potable disponible (CONAGUA, 2016). Su uso en este sector además se enfrenta a otras problemáticas al ser vulnerable ante los efectos del cambio climático y a desafíos políticos, tecnológicos, económicos y sociales. Sin embargo, existen formas en que la agricultura, puede adaptarse a los retos de disponibilidad, como una mejor asignación del recurso, el cambio a cultivos intensivos en el uso del agua, la adopción de prácticas que permitan una mayor productividad, el uso de fuentes alternas como aguas residuales, así como mejores políticas de precios.

Una forma en que las políticas pueden influir en una asignación eficiente del agua, es gestionando su demanda. FAO (2013) define gestión de la demanda como las acciones que controlan la demanda, aumentando la eficiencia económica del uso del agua o reasignando el recurso hídrico dentro de cada sector y entre los distintos sectores.

Para ello existen diferentes herramientas que permiten hacer este análisis en cada uno de los sectores. Desde el punto de vista de la economía, ha existido un gran esfuerzo en desarrollar diferentes metodologías que permiten asignar un valor económico y conocer la demanda del agua en los diferentes sectores que la usan (Young, 1996). Al conocer el valor del agua en la agricultura, permite a los formuladores de políticas, inversionistas y administradores del agua, seleccionar la mejor decisión de financiamiento y distribución del recurso, asignándolo a donde se obtenga un mayor beneficio económico, social y ambiental, previniendo la sobreexplotación. Así como la posibilidad de generar un marco de políticas para promover la eficiencia entre los usuarios, como mercados de agua, políticas de precios y mecanismos de asignación.

En los principios de Dublín-Rio de 1992 (ONU, 1992), se reconoce menciona que el agua “*es un bien público y tiene un valor social y económico en todos sus usos*”. El manejo del recurso hídrico debe hacerse, por lo tanto, tomando en cuenta los aspectos sociales, económicos, culturales y ambientales que suponen un desarrollo sostenible explicados por Strange & Bayley (2013). En los mismos principios se menciona que el no reconocer el valor económico del agua ha provocado un excesivo uso del agua, así como un impacto negativo en el medio ambiente. Por lo que valorar el agua como un bien económico es una forma de lograr un uso eficiente y equitativo, sobre todo en lugares donde es escasa (Speed et al., 2013).

Que el agua tenga un valor y que los usuarios en el sector agrícola estén dispuestos a pagar por el recurso genera a su vez un marco para desarrollar políticas e instrumentos económicos como mecanismos de precios y mercados de agua que permitan la transferencia del recurso entre usuarios. Esto supone asignar el agua a la actividad donde se obtenga mayor valor económico por unidad de agua aplicado. Shiva (2004) comenta que “*en el paradigma del mercado se considera la escasez del agua como una crisis derivada de que no se comercia el agua. Si esta pudiera trasladarse y distribuirse libremente en mercados libres, se transferiría a las regiones de escasez y el alza de los precios conduciría a la conservación*”. Por esta razón precios altos puede hacer que los productores con bajo valor productivo vendan su agua a actividades agrícolas con mayor valor o elijan producir cultivos de mayor valor o intensivos en el uso del agua (OCDE, 2010).

Conocer el valor del agua provee además una señal sobre la escasez que de otra forma no podríamos saber en ausencia de los mercados y que permite conocer los impactos en los beneficios económicos provocados por cambios en la disponibilidad del agua.

Esta investigación contribuye a la literatura existente de valoración económica del agua en su uso agrícola, utilizando la metodología de programación matemática positiva, aplicada a los módulos de distrito de riego 011 Alto Rio Lerma, en el Estado de Guanajuato, donde además se evalúa la factibilidad de fomentar la creación de un mercado de agua ante escenarios de escasez.

1.1 Planteamiento del problema

Históricamente han existido problemas de escasez en la región. En 1955, se presentó una sequía que provocó el menor nivel del lago de Chapala registrado hasta ese año. Para el año de 1998 se presentó otra fuerte temporada de sequías que afectó el almacenamiento del recurso, dejando las presas del estado de Guanajuato al 10% de su capacidad. En el 2002 se presentó el nivel más bajo histórico de almacenamiento del lago Chapala desde 1955. En el año 2005 existió una escasez que se extendió hasta el 2006 afectando gravemente la producción agrícola de la región especialmente en Guanajuato. La última escasez severa se presentó en el 2011, la cual afectó el centro y norte del país, considerada la peor sequía en las últimas siete décadas teniendo un fuerte impacto negativo en la producción agrícola (Domínguez, 2016) y que fue un punto de partida para desarrollar acciones frente a los impactos de este fenómeno (DOF: 25/01/2012). Actualmente la cuenca Lerma-Chapala se encuentra en el límite de aprovechamiento hídrico, concesionar más agua superficial o subterránea implica afectar el aprovechamiento de usuarios aguas abajo y además pone en riesgo el desarrollo económico de la región. Por lo anterior se han generado un complejo problema de intereses en términos de la calidad y cantidad entre los distintos sectores económicos del estado (Vargas Velázquez, 2005).

Aunque el panorama actual presenta grandes retos, estos pueden agudizarse con el cambio climático. Un estudio realizado por SAGARPA-FAO(2012) estudió la vulnerabilidad de las regiones agrícolas ante efectos del cambio climático, pronosticaron un incremento en la temperatura y una reducción en la precipitación, así como sequías más frecuentes especialmente en la región centro-norte y norte del país. El Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, IEE (2011) pronosticaron aumentos en la temperatura de hasta 3.0 grados en el estado lo que ocasionará una mayor evaporación de la tierra y de los cuerpos de agua, así como un efecto negativo en el proceso de lluvia-escurrimiento que reduciría el cauce del río Lerma y el almacenaje de agua en las presas. En este estudio concluyen, que los recursos hídricos (superficiales y subterráneos) se verán reducidos en todo el Estado y existirá un aumento de la demanda de agua para uso urbano, industrial y agrícola, aumentando la brecha ya existente entre oferta y demanda. Específicamente la demanda para uso agrícola, reportan

que la extracción de pozos al 2030 aumentara entre 30 y 80% y de fuentes superficiales hasta un 10%.

Considerando la problemática, se puede concluir que es necesario implementar políticas que contribuyan a la gestión eficiente del agua para uso agrícola. Políticas que permitan una coordinación entre los diferentes niveles de gestión y se promueva una asignación del recurso que sea flexible ante las condiciones climáticas futuras. Sin el conocimiento del valor económico del agua y de la demanda de uso agrícola en el área de estudio, se pueden estar tomando decisiones que incentiven lo contrario.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

- Valoración económica del agua de uso agrícola en los módulos del Distrito de Riego 011, mediante un modelo de programación matemática positiva.

1.2.2 Particulares

- Calcular el precio sombra del agua para los módulos del Distrito de Riego ante diferentes escenarios de escasez.
- Construir la demanda derivada de agua para cada módulo del Distrito de Riego.
- Evaluar la posibilidad de un mercado de agua entre los módulos del distrito como mecanismo para enfrentar la escasez de agua en el distrito de riego.

1.3 Hipótesis

1.3.1 General

- Mediante la optimización del agua en un Distrito de Riego se usa el recurso eficientemente y nos permite valorar económicamente el agua en diferentes escenarios de escasez.

1.3.2 Particulares

- Las tarifas de agua cobradas por las autoridades no reflejan la verdadera valoración económica del agua.
- Los mercados de agua son un mecanismo que permiten distribuir el agua de forma eficiente a la agricultura de una región y ser económicamente resiliente ante panoramas de escasez.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

Existen dos enfoques metodológicos que se han desarrollado para la valoración económica del agua en su uso agrícola: inductivos y deductivos (Young, 2005). En México y en diferentes países, se han desarrollado investigaciones que han aplicado ambos enfoques, en este capítulo se presentan algunos casos, sus resultados y algunos comentarios respecto a ellos.

La literatura donde se emplearon métodos inductivos para el análisis del valor y la demanda de agua en el sector agrícola es extensa. Saenz et al. (2003) calcularon el valor del agua mediante un análisis econométrico del valor de la producción en función del volumen de agua usado. Usando el promedio histórico del valor de producción, en la función final que obtuvieron de valor de producción en función de el volumen de agua usado, encontraron que el valor por metro cubico de agua es de \$0.43 pesos.

Existen muchas investigaciones en las cuales han usado métodos deductivos donde utilizan la programación matemática para analizar el uso del agua en la agricultura. Una investigación aplicada al DR011 de Florencio-Cruz et al. (2002) en la cual se calculó el valor productivo del agua en el distrito de riego mediante un modelo de programación lineal (PL), los recursos que usaron fueron: tierra, mano de obra, maquinaria agrícola y agua (superficial y subterránea). Sus resultados fueron precios sombra para el agua superficial y de pozos, en los diferentes meses del año agrícola base 1998-1999, para agua superficial en el ciclo otoño-invierno fue un precio sombra que oscila entre \$0.54 y \$1.23 pesos por metro cubico de agua, para abril entre \$1.66 y \$2.28, en mayo entre \$1.33 y \$1.96 y junio entre \$1.03 y \$1.72. La diferencia de los precios sombra depende en el patrón de cultivos optimo y debido a que el agua de pozos se destina a cultivos de mayor valor esta tendrá un mayor valor del producto marginal.

García-Salazar et al. (2007) usaron un modelo de programación lineal y un modelo econométrico, ambas metodologías usadas para calcular el valor del agua de irrigación en la Comarca Lagunera. En el modelo de programación lineal, sus insumos fueron tierra, mano de obra y agua. Usando como base datos del ciclo agrícola 2001-2002. Encontraron que el precio sombra de agua de bombeo es de \$0.646 m³ y de \$0.582 m³ para agua de gravedad. A través de un análisis de regresión, determinaron la productividad marginal del agua, a partir

de una función cuadrática del beneficio neto en función el volumen de agua (superficial y subterránea) usado por los cultivos, sin incorporar otro insumo. Encontraron que el valor de la productividad marginal es de \$0.73 m³ para agua de pozo y \$0.25 m³ para agua de gravedad.

Usando la programación matemática positiva (PMP), Medellín-Azuara et al. (2009) estimaron el valor económico del agua de uso agrícola en tres regiones de Baja California. Para calibrar el modelo usaron datos de hectáreas sembradas observadas por cultivo en un año base, restringiendo la disponibilidad de mano de obra, tierra y provisiones. Construyeron un modelo final con una función de costos cuadrática y una función de producción de tipo elasticidad constante. El modelo de PMP se usó para construir la demanda derivada del agua, usando diferentes precios sombra los cuales calcularon disminuyendo la disponibilidad de agua anual. Sus resultados demuestran que con la disponibilidad inicial el precio sombra para fue de 76 y 126 dólares por mil metros cúbicos. Las variaciones entre los valores de los precios sombra de las diferentes regiones, radican en los cultivos que son usados en cada región, ya que en donde el precio sombra es mayor se siembran cultivos de alto valor económico, al variar la disponibilidad hídrica anual, las curvas de demanda derivada para cada región, tienen elasticidades promedio de -0.66 y -0.31.

Mediante un modelo lineal Zetina-Espinosa et al. (2013), calcularon el valor económico del agua en el distrito de riego 044 Jilotepec, Estado de México. Usaron datos base del año 2008-2009, el valor marginal del agua que obtuvieron esta entre 0.96 y 5.72 pesos por metro cubico en el ciclo Otoño-Invierno y entre 0.03 y 0.21 pesos por metro cubico en el ciclo Primavera-Verano, formularon escenarios en base a la disponibilidad de agua, en todos los casos el precio sombra del agua es mayor a la cuota pagada por los agricultores, sugieren un aumento de esta para que mediante una política de precios se fomente el uso eficiente del agua.

Con un modelo de programación lineal aplicado para la agricultura de la costa de Hermosillo, Sonora, específicamente para el agua extraída de pozos. Adams-Salazar et al. (2012) calcularon el valor marginal del agua que obtuvieron fue entre 1.10 y 4.35 pesos por metro cubico, creando diferentes escenarios de disponibilidad. Concluyeron que este precio sombra es mayor a la cuota pagada para la extracción de agua de pozo, cuota considerablemente más

baja por el subsidio a la extracción. Recomendaron un aumento en el precio de esta cuota, considerando el valor marginal obtenido, fomentando un uso sostenible del acuífero.

Hall (2001) evaluó los efectos de los cambios en la disponibilidad de agua en los ingresos de un conjunto de granjas y la construcción de su demanda derivada por el recurso. Aplicado a un sistema de irrigación en la cuenca de Murray-Darling en Australia. Obtuvo sus resultados mediante un modelo de PL y de un modelo calibrado de PMP para su comparación. Es interesante esta comparación ya que ambos modelos usan los mismos datos y todas las variables y coeficientes son idénticas lo que permite una comparación objetiva en sus resultados. Concluye que el modelo calibrado de PMP cuadrático da una mejor reproducción de la realidad y comenta que el modelo lineal únicamente puede mejorar su ajuste agregando restricciones adicionales.

En un meta-análisis de literatura sobre el cálculo de la demanda de agua en la irrigación realizado por Scheierling et al. (2006) concluyen que las demandas calculadas con modelos de programación matemática, tienen mayores valores en el valor económico del agua comparado con metodologías inductivas, así como demandas más inelásticas. Después del análisis hecho concluyen que la elasticidad precio de la demanda de agua para la irrigación tiene un valor medio de -0.50 y una mediana de -0.21.

La programación matemática positiva, también se ha usado para evaluar los impactos económicos y espaciales, derivados de la escasez y el cambio climático en la agricultura aplicados en diferentes países (Graveline et al., 2014; Ponce et al., 2014; Torres et al., 2012 Medellín-Azuara, et al., 2010).

Por último, se ha demostrado que una forma de alcanzar el uso eficiente del agua es mediante la creación mercados de agua. A partir de una evaluación hecha por Grafton et al (2011) en algunos mercados de agua de diferentes cuencas agrícolas, concluyen que los mercados de agua una vez que existen las condiciones institucionales, han demostrado ser una herramienta para lograr una eficiencia económica, y que permite lograr objetivos ambientales, además que este mecanismo puede ser exitoso en casos de escasez.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1 Conceptos básicos

Los mercados donde se transaccionan bienes o servicios de consumo privado, los bienes reciben un valor económico o precio por la interacción del mismo mercado. Esto no significa que sea la única forma en que un bien o servicio reciba un valor o precio. Los bienes públicos, se caracterizan por no tener exclusión entre usuarios, es decir cualquier individuo puede ser usado de él y crear derechos de uso exclusivo para este tipo de bienes es muy difícil de establecer o muy costoso por su naturaleza física, como es el caso del agua (Hanemann, 2005).

En un sistema de mercado, el valor económico del agua estaría definido por su precio, pero el agua vista como un bien puramente privado es difícil de encontrar, y su valor de mercado no se encuentra disponible, sin embargo, cuando el agua es de uso habitacional o como insumo en la producción industrial o agrícola, se paga un precio, aunque este generalmente representa un costo para su suministro y operación del sistema que distribuye el recurso. Sin embargo, este precio no refleja el valor real del agua, cuando el agua es utilizada como un insumo para la producción en este caso en el sector agrícola, su valor representara el valor del producto marginal, es decir el beneficio económico se obtiene de una unidad de agua.

Existen diferentes conceptos de eficiencia en el uso del agua en el sector agrícola. El primero, la eficiencia física también conocida como eficiencia hidráulica en la irrigación, es basada en la administración de la oferta y su distribución (Keller et al., 1996). Esta es tomada en cuenta para desarrollar acciones que buscan un ahorro mediante el incremento de la fracción de agua aprovechada por el cultivo frente al agua aplicada.

El segundo concepto de eficiencia es la eficiencia técnica o agronómica, esta se enfoca en la productividad de los cultivos, puede ser expresada en los kilos producidos por unidad de agua consumida por el mismo cultivo. Aunque la producción depende de diferentes insumos aparte del agua, la productividad del agua parcial es comúnmente medida como el producto medio obtenido por unidad de agua suministrada.

Por último, la eficiencia económica se enfoca en obtener la cantidad máxima de beneficio neto que se puede generar por el uso de un recurso (Johansson et al., 2002). En este caso

asignando el agua dentro de un sistema de producción. Cuando el sistema se compone por un conjunto de granjas, por lo que se busca maximizar la suma del beneficio total de ellas (Harou et al, 2009), como es el caso de esta investigación.

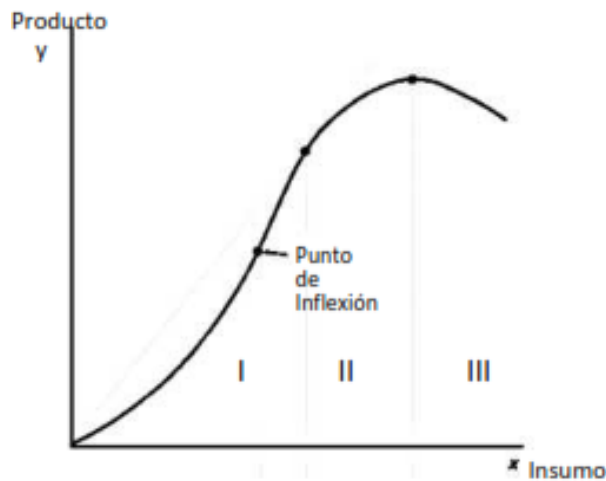
Los diferentes conceptos de eficiencia y productividad para la gestión de los recursos hídricos son discutidos por diferentes autores, considerando diversas metodologías que han empleado para su análisis (Griffin, 2006; Scheierling et al., 2014).

3.2 Agua como insumo en la producción agrícola

Como se comentó anteriormente cuando el agua es usada en la producción agrícola, se considera como un bien intermedio al ser un insumo dentro de un proceso de producción, por lo tanto, su demanda se refiere como una demanda derivada. La demanda por lo tanto, dependerá del producto final y la función de producción de cada producto (Gibbons, 1986).

Una función de producción representa la relación entre insumos y productos, para condiciones físicas particulares, esta relación puede ser derivada directamente por experimentos de campo o modelos econométricos o matemáticos (Harou et al., 2009). En esta relación, el producto marginal se refiere al cambio en el producto asociado al incremento marginal de un insumo. Esto es diferente al producto medio, definido como la proporción del producto al insumo. Desde el punto de vista de la función de producción, el valor económico del agua es el producto marginal del agua multiplicado por el precio del producto (Debertin, 2012).

Figura 1: Función de producción neoclásica



Fuente: Agricultural production economics, Debertain (2012)

3.3 Métodos de valoración económica del agua

A lo largo de los años, los economistas han desarrollado metodologías y diferentes técnicas numéricas para calcular el valor económico del agua y su demanda en los diferentes usos. Young (2005) menciona los diferentes métodos que pueden emplearse, divididos en dos enfoques: inductivos y deductivos. Los métodos inductivos, son métodos paramétricos que con observaciones individuales infieren generalizaciones, como son los modelos econométricos, para el cálculo de funciones de producción, demanda de agua y métodos de valoración como el costo de viaje, precios hedónicos y valoración contingente. Este enfoque de la valoración se caracteriza por usar un gran conjunto de datos, ya que su representatividad y validez depende de la cantidad de datos observados.

Los otros métodos son los deductivos, donde se encuentra la programación matemática (PM), la cual es un método cuantitativo cuyo objetivo es encontrar la forma óptima de lograr un objetivo, las bases teóricas para su formulación son microeconómicas ya que se adapta fácilmente a la teoría de la economía de la producción (Burkett, 2006). De la programación matemática se desarrollan diferentes tipos de modelos como los modelos de programación lineal (PL), programación matemática positiva (PMP), modelos de equilibrio general, entre

otros. En general estos modelos usan el principio de la optimización (maximización o minimización), los cuales representan una abstracción del comportamiento de los agentes económicos y que a partir de premisas generales dan como resultado conclusiones particulares.

Los modelos sean inductivos o deductivos, son herramientas esenciales para la economía, ya que abstraen fenómenos reales para su análisis. La ventaja que tiene la PM es que no necesita grandes bases de datos para tener un modelo que se ajuste a la realidad, además permite introducir información técnica y económica en diferentes escalas y niveles de agregación sea una sola unidad de producción, una región, cuenca o un país. Esta metodología ha sido usada durante muchos años la economía y en investigaciones enfocadas al análisis del uso del agua para irrigación. De acuerdo a Young (2005) este el método más adecuado para obtener funciones de demanda del agua en el sector agrícola.

3.4 Programación matemática positiva (PMP)

Los modelos de programación matemática aplicados al sector agrícola han sido utilizados para la toma de decisiones y políticas, para análisis económicos ante diferentes escenarios de disponibilidad de recursos, cambios en precios y costos, cambios tecnológicos, entre otros. Por ello es necesario que los modelos reproduzcan lo más fielmente la realidad, por esta razón se han desarrollado metodologías y se ha discutido la importancia de calibrar los modelos y que estos tengan un mejor ajuste a la realidad. (Hazell y D. Norton, 1986).

Por esta razón la PMP parte del supuesto que las decisiones hechas por los agricultores reflejan decisiones óptimas considerando que estos se enfrentan a diferentes restricciones de recursos, condiciones de mercado y tecnológicas. Debido a que es difícil que en un modelo de programación matemática considere todas las restricciones para su calibración (Buysse et al., 2007), la PMP utiliza datos reales de un periodo o año base sobre la producción y uso de los insumos, para derivar una función de costos cuadrática y así calibrar el modelo exactamente a los valores observados sin añadir restricciones sin fundamento teórico como menciona Howitt (1995a). Además, el usar esta metodología añade flexibilidad a la función objetivo relajando el supuesto de que los costos se comportan de forma lineal.

Al construir la demanda derivada del agua con modelos de PL, esta tiene la característica de ser escalonada y con respuestas de mayor magnitud en el precio sombra, ante diferentes escenarios de disponibilidad, por ello es que Howitt (1995b) sugiere que partiendo de un modelo lineal y transformarlo a un modelo cuadrático, se obtiene una respuesta más suave y que se ajusta más al comportamiento real de los agricultores.

El método para desarrollar el modelo de PMP consiste en tres etapas. Inicialmente se desarrolla un modelo de programación lineal de maximización de beneficios, a la que se añade una restricción de calibración. De los valores duales obtenidos se genera una función de costos cuadrática. Finalmente se integra un modelo con una función objetivo no lineal, sujeta a restricciones de disponibilidad del recurso. Para su desarrollo se requieren conjuntos de datos mínimos, como los requeridos para un modelo de programación lineal.

Al igual que en la econometría los modelos de programación matemática, tienen dos etapas: la estimación y la predicción. El modelo final se empleará para realizar un proceso iterativo de la disponibilidad del recurso hídrico para calcular diferentes valores marginales del agua y así construir la demanda derivada por el recurso en el área de estudio.

Desde que se comenzó a utilizar esta metodología hasta hoy, han existido adaptaciones y nuevas formas en que se pueden calibrar los modelos de programación mediante la programación matemática positiva. Explicados en diferentes artículos (Heckelei et al., 2005; Mérel y Howitt, 2014; Heckelei et al., 2012; Paris, 2017), sin embargo, esta investigación se basó en la forma básica de programación matemática positiva propuesta por Howitt (1995b).

3.4.1 Etapa 1: Modelo lineal

El primer paso de la PMP es formular y resolver un modelo lineal de producción, en general el modelo lineal debe de cumplir ciertos supuestos, según Hazell y D. Norton (1986) estos son:

- Optimización: Se asume que una apropiada función de utilidad es maximizada o minimizada
- Fijeza: Al menos una restricción tiene un coeficiente distinto de cero

- Finitud: Se asume que hay una cantidad finita de actividades y restricciones consideradas para obtener la solución.
- Determinismo: Todos los coeficientes de las variables en el modelo se asumen ser constantes.
- Continuidad: Se asume que tanto los recursos que pueden ser usados como las actividades producidas puedan ser cantidades fraccionales.
- Homogeneidad: Se asume que todas las unidades de un mismo recurso o actividad son idénticas.
- Aditividad: Se asume que las actividades son aditivas, es decir que el producto total es la suma de los productos individuales.
- Proporcionalidad: Se asume que el margen bruto y los requisitos de recursos por unidad de actividad son constantes para cualquier nivel de actividad. Un margen bruto constante por unidad de actividad implica una curva de demanda elástica para el producto y un abastecimiento perfectamente elástico de cualquier insumo que pueda ser usado. Los requisitos de recursos constantes por unidad de actividad son equivalentes a una función de producción de Leontieff.

Para el modelo lineal se requiere identificar:

- La función objetivo a maximizar.
- Las actividades o variables de decisión.
- Precios netos de cada actividad.
- La disponibilidad o dotación de los recursos, parámetros comúnmente llamados right hand side (RHS) del problema.
- Coeficientes técnicos, que corresponden al uso de los recursos para producir una unidad de cada actividad.
- El nivel de actividad observado (hectáreas sembradas) en un periodo o año base.

La tarea dice Howitt (1995b) es “*definir la forma más simple que sea consistente con la tecnología usada, con la teoría microeconómica y con los datos disponibles*”, sin necesidad de agregar restricciones sin fundamento teórico para la calibración de un modelo. En este primer paso se deben obtener dos vectores de valores duales: de la restricción de recursos y

de la restricción calibración, los segundos serán utilizados para la construcción de la función de costos. El modelo lineal calibrado se formula de la siguiente forma:

$$Max Z = \sum_i p_i x_i - c_i x_i \quad (A.1)$$

$$s.a \quad Ax_i \leq b \quad [\lambda] \quad (A.2)$$

$$x_i \leq \tilde{x}_i + \varepsilon \quad [\mu] \quad (A.3)$$

$$x_i \geq 0 \quad (A.4)$$

Donde: p es el vector de los precios de cada actividad; x es la variable de decisión, el nivel de cada actividad a producir; c es el vector de los costos de producir una actividad. Se tienen las mismas restricciones estructurales, limitadas por la cantidad de recursos disponibles (A.2) y la condición de no-negatividad (A.4) al ser un modelo calibrado existe una nueva restricción de calibración (A.3), \tilde{x} es el vector de nivel de producción observado y ε es una perturbación mínima, con esta restricción se busca que el modelo reproduzca el nivel de producción del año o periodo base. La perturbación (ε) es una tolerancia al desacoplamiento la cual tiende a cero y es positiva.

De los dos tipos de restricciones: estructurales y de calibración, se obtendrán dos vectores de valores duales, el vector λ contiene los precios sombra asociados a los recursos limitados (A.2) imputados por la disponibilidad de recursos b_i y el vector μ contiene los valores duales de la calibración (A.3) los cuales serán usados para formular la función de costos cuadrática.

El valor μ puede ser interpretado como un costo marginal implícito que es necesario para las condiciones de equi-marginalidad de la asignación de tierra entre las actividades, este se requiere como complemento del costo medio para cumplir las condiciones de primer orden en la optimización y cumplir con la calibración del modelo.

Siguiendo a Heckeley et al. (2005) y Petsakos y Rozakis (2009), en el modelo primal calibrado las soluciones serán para λ, μ y x las cuales corresponden a la solución óptima donde se cumplen las condiciones Kuhn-Tucker para el modelo primal.

La condición de primer orden del modelo primal es:

$$\frac{\delta Z}{\delta x} = p - c - A^T \lambda - \mu \quad (\text{A.5})$$

Para hacer más simple el desarrollo algebraico de los valores duales, el vector de actividad x puede ser dividido en dos sub-vectores, X_N de orden $(N \times 1)$ y X_B de orden $[(I - N) \times 1]$. Esta partición es hecha para demostrar la consistencia de la PMP descrita en Howitt (1995b), en su procedimiento se puede observar que el valor dual de la restricción de calibración es positiva para las actividades en que su variable de holgura es cero por lo tanto el valor dual para estas actividades es mayor a cero ($\mu_N > 0$) y un valor dual igual a cero para las actividades que tienen una variable de holgura positiva ($\mu_B = 0$).

Matricialmente se representa:

$$\begin{bmatrix} Z_N \\ Z_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (A_N)^T \\ (A_B)^T \end{bmatrix} \lambda - \begin{bmatrix} \mu_N \\ \mu_B \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$\text{donde: } Z_N = p^N - c^N \quad \text{y} \quad Z_B = p^B - c^B$$

$$\text{y } \mu_B = 0$$

$$\begin{cases} Z_N - (A_N)^T \lambda - \mu_N = 0 \\ Z_B - (A_B)^T \lambda = 0 \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

Por lo tanto, los valores duales del modelo lineal de PMP son:

$$\begin{cases} \mu_N = Z_N - (A_N)^T \lambda \\ \mu_B = 0 \\ \lambda = Z_B [(A_B)^T]^{-1} \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Como se puede observar, el precio sombra λ depende únicamente de la función objetivo, y la restricción de recursos, al agregar restricciones de calibración no se altera el valor dual de las restricciones generales de recursos.

Los modelos de programación matemática cumplen con el teorema de dualidad es decir para cada modelo de maximización hay uno asociado de minimización (Hazell & D. Norton,

1986). Para comprender el modelo de PMP (ecuaciones A.1 a A.4) y sus componentes, el modelo dual de PMP es:

$$\text{Min } CT = b\lambda + \mu[\tilde{x} + \varepsilon] \quad (\text{B.1})$$

$$\text{s. a } A\lambda + \mu + c \geq p \quad (\text{B.2})$$

$$\lambda \geq 0, \mu \geq 0 \quad (\text{B.3})$$

El objetivo de modelo dual es la minimización de costos, en este caso los valores de decisión a obtener son λ valor dual de la restricción de recursos y μ valor dual de la restricción de calibración.

3.4.2 Etapa dos: Función de costos cuadrática

En principio, se puede usar diferentes tipos de función no-lineal de costos. Por razones de simplicidad y a falta de argumentos para usar otro tipo de función (a excepción de la función exponencial) la función de costos es usada en su forma cuadrática.

Una vez obtenidos los valores duales del modelo lineal (λ, μ) , el vector μ correspondiente a los valores duales de las restricciones de calibración son usados para construir la función de costos cuadrática, en el modelo de PMP es la siguiente:

$$CT(X_i) = \alpha_i x_i + \frac{1}{2} \gamma_i x_i^2 \quad (\text{C.1})$$

$$\text{Donde: } \alpha_i = c_i - \mu_i \quad (\text{C.2})$$

$$\text{y } \gamma_i = 2\mu_i / \tilde{x}_i \quad (\text{C.3})$$

Como puede observarse el valor dual de la restricción de calibración se incluye dentro del parámetro asociado al intercepto (α_i) , como a la pendiente (γ_i) de la función de costos. Esta función de costos calibra el modelo a los valores observados de producción y uso de los factores.

3.4.3 Etapa tres: Modelo no-lineal de producción

En la tercera etapa se formula el modelo final calibrado con función de costos cuadrática obtenida en la etapa anterior.

$$Max Z = \sum_i p_i x_i - \alpha_i x_i + \frac{1}{2} \gamma_i x_i^2 \quad (D.1)$$

$$s.a \quad Ax_i \leq b_j \quad (D.2)$$

$$x_i \geq 0 \quad (D.3)$$

Con este modelo se están maximizando los beneficios netos totales con una función de costos cuadrática, sujeto a la disponibilidad de recursos y la condición de no negatividad. A partir de este modelo es que se obtienen los valores duales o precios sombra de los recursos de la restricción (D.2) que servirán para el análisis de esta investigación.

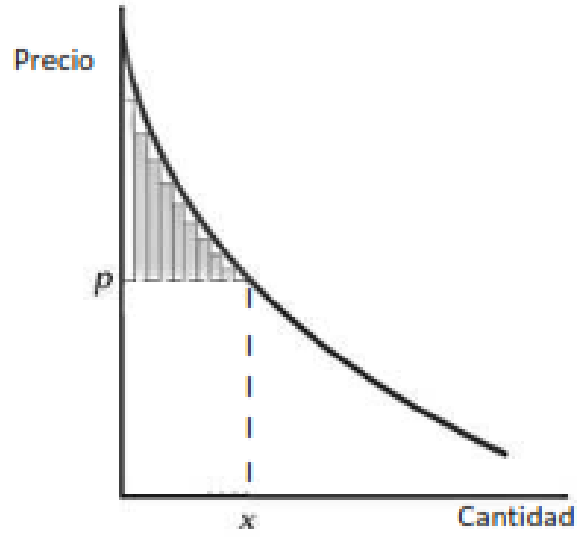
3.5 Demanda de agua en la agricultura.

El conjunto de precios sombra derivados de los diferentes escenarios de disponibilidad hídrica, pueden interpretarse como la disponibilidad máxima a pagar por un incremento del recurso (Caballer y Guadalajara, 1998). Por lo que el conjunto de valores marginales obtenidos ante diferentes disponibilidades permite integrar una curva de demanda (Young & Loomis, 2014).

Cuando el agua es un recurso limitado, el modelo asignara el agua a las actividades con mayor valor neto, a medida que su disponibilidad disminuye otros cultivos con menor uso de agua serán elegidas, aun si el beneficio neto que se obtiene de ellas es más bajo. Por esta razón el modelo al reducir o aumentar la dotación de agua tiene implicaciones en el patrón óptimo de cultivos y el uso de la superficie.

Considerando los demás insumos constantes, si el agua es el único insumo variable y se se podrá derivar su demanda a partir de los diferentes precios sombra obtenidos de diferentes escenarios de disponibilidad (Kaiser & Messer, 2011). La curva de demanda (Figura 2) se deriva a partir de la relación entre el precio y la cantidad de agua usada. Gráficamente, en el eje vertical se encontrará el precio sombra (disponibilidad a pagar) y en el eje horizontal la cantidad de agua usada. El área bajo la curva de demanda y por encima del precio de equilibrio es el excedente del consumidor.

Figura 2: Curva de demanda

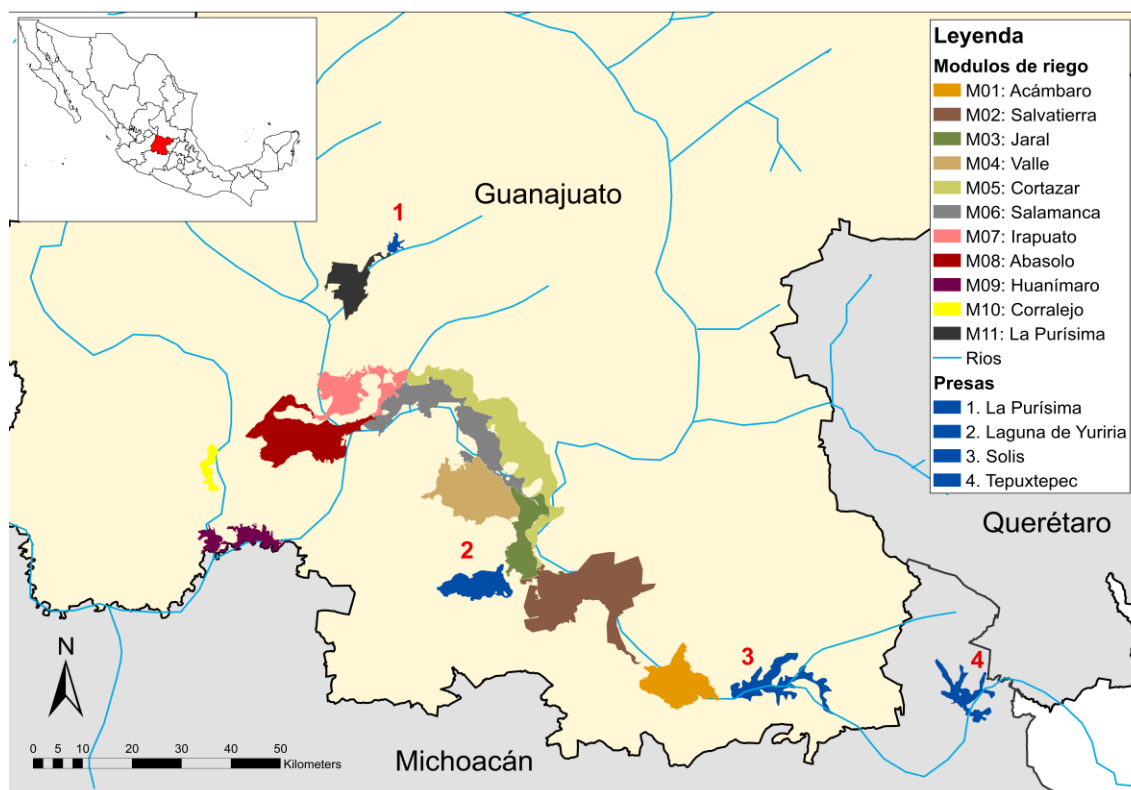


Fuente: Microeconomía intermedia, Varian (2010)

CAPÍTULO IV. ÁREA DE ESTUDIO

La investigación se realizó en el Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma, localizado en el sur del estado de Guanajuato y dentro de la cuenca Lerma-Chapala. Se ubica geográficamente entre los paralelos 19° 55' y 21° 52' de longitud norte y los meridianos 99° 39' y 102° 05' de longitud oeste, a una altitud de 1,722 metros sobre el nivel de mar. Dentro de los municipios de Acámbaro, Salvatierra, Santiago Maravatío, Jaral, Yuriria, Valle de Santiago, Villagrán, Cortázar, Salamanca, Irapuato, Guanajuato, Silao, Tarimoro, Pueblo Nuevo, Abasolo, Huanímaro y Pénjamo.

Figura 3: Mapa del distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma



Fuente: Elaboración propia con datos de Jefatura del Distrito de Riego 011, INEGI y CONAGUA

El Distrito de Riego Alto Rio Lerma, se creó en la época colonial, cuando en 1548 Fray Diego de Chávez conformo la primera obra importante de irrigación en América Latina con aguas de la laguna Yuriria. Fue En marzo de 1939 cuando se publicó el decreto de creación del Distrito de Riego No. 011 Alto Rio Lerma y en el año de 1949 inicio su operación.

En noviembre de 1992 se llevó acabo la transferencia de derechos del agua del DR 011 a los usuarios, como parte de un proceso que se dio a nivel nacional. En este proceso los productores del distrito, organizados en 11 Asociaciones Civiles, asumieron la responsabilidad de operar, conservar y administrar la infraestructura hidroagrícola menor. Estos once módulos son: Acámbaro, Salvatierra, Jaral del Progreso, Valle de Santiago, Cortázar, Salamanca, Irapuato, Abasolo, Huanímaro, Corralejo y La Purísima.

El 10 de diciembre de 1996 se constituye el D.R 011 Alto Rio Lerma, Guanajuato, S. R. L. de I.P De C.V, que a partir de febrero de 1997 asume la operación, conservación y administración de la red mayor para la entrega de agua en bloque a cada uno de los módulos, que les es asignada por el consejo de cuenca y CONAGUA. La sociedad de responsabilidad limitada es el vínculo entre los módulos y la Jefatura del Distrito de Riego de la Comisión Nacional del Agua. El distrito de riego tiene un total de 111,242.55 hectáreas de las cuales 110,299.45 son de riego y tiene 26,611 usuarios de riego.

Tabla 1: Características de los módulos de riego del DR011

Modulo	Superficie (ha)	Superficie de riego (ha)	Número de usuarios
Acámbaro	8,459.02	8,426.00	2,234
Salvatierra	16,389.96	16,246.00	6,441
Jaral	6,753.86	6,739.54	1,589
Valle	13,389.91	13,341.58	2,462
Cortazar	18,376.51	18,316.22	3,687
Salamanca	14,071.86	13,599.52	2,951
Irapuato	8,392.76	8,361.00	1,507
Abasolo	14,985.80	14,890.85	2,850
Huanímaro	3,864.98	3,823.35	1069
Corralejo	1,575.99	1,575.99	342
La purísima	4,981.90	4,979.40	1,479
Total	111,242.55	110,299.45	26,611

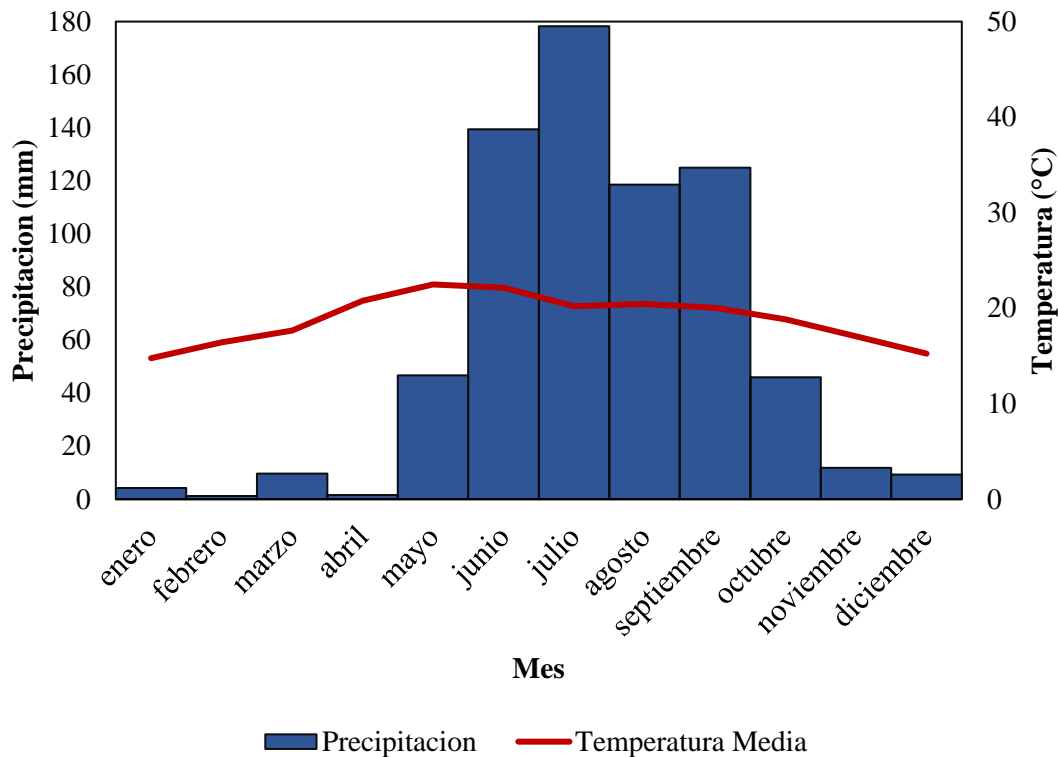
Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por la Jefatura del Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma, 2018.

4.1 Características generales del distrito de riego

La región donde se localiza el DR 011 el tipo de clima es semicálido subhúmedo [(A)C(wo)] y [(A)C(w1)] (García, 2004), con lluvias en verano y con una precipitación media anual de 744.4 mm. Una temperatura media mensual entre los 18° y 20° con un rango de heladas de 10 a 30 días anuales entre noviembre y febrero.

El distrito de riego se ubica en subprovincias de sierras volcánicas y lagos centrales, bajíos michoacanos, y bajíos guanajuatenses; donde destacan los suelos vertisoles los cuales se caracterizan por ser de gran profundidad, alto contenido de arcilla, fértiles y ricos en materia orgánica (INEGI,2009), siendo este el tipo de suelo que se encuentra en todo el distrito.

Figura 4: Climograma del distrito de riego 011 2013-2018



Fuente: Elaboración propia con datos de estación climatológica D.R. 011 (Irapuato), INIFAP 2013-2018

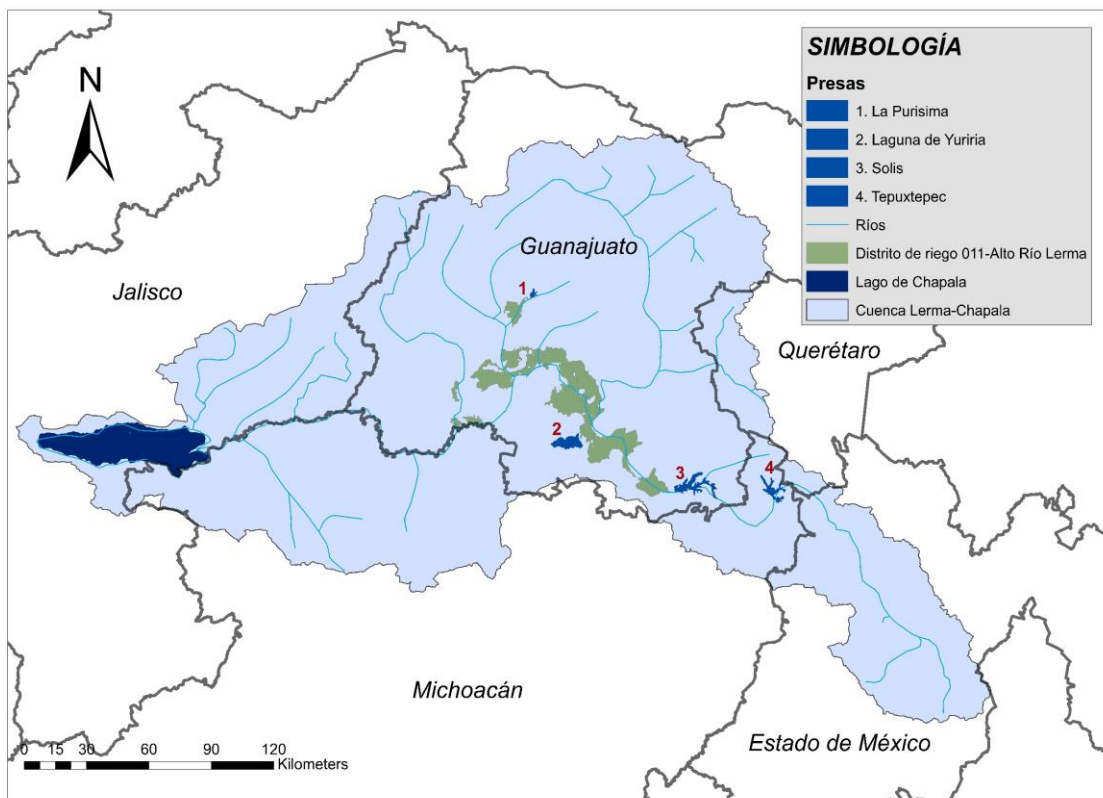
4.2 Recursos Hídricos

El DR011, se encuentra en la cuenca Lerma-Chapala, esta cuenta con una extensión de 54,448 km² (DOF:19/04/2010) y su territorio está dentro de cinco estados: Michoacán, Jalisco, México, Querétaro y Guanajuato. La cuenca es muy importante económicamente y socialmente, en ella se encuentra poco más del 10% de la población del país y aporta aproximadamente 10% del Producto Interno Bruto. La actividad agrícola es intensa en el uso del agua, esta representa el 13% de la agricultura de riego del país y ha mostrado una tendencia creciente, así como un crecimiento de las zonas urbanas, lo que ha provocado cambios en el uso del suelo y la degradación de la cuenca. (IMTA-SEMARNAT, 2009).

El estado de Guanajuato tiene 80% de su territorio dentro de esta cuenca, en él se dedican más de 3 millones de hectáreas a actividades agropecuarias, representando el 59% de su extensión territorial. En él se localizan dos Distritos de Riego: 085 La Begoña y 011 Alto Rio Lerma, siendo este el más grande de la cuenca y el estado, con 149,500 hectáreas de las cuales 106,756 son de riego, distribuidos en 23,464 usuarios. El 87% del agua disponible del agua estatal es destinada a la agricultura, esto ha provocado una presión y un conflicto social por la competencia del recurso, principalmente para el abastecimiento de las zonas urbanas. Por otro lado la mayoría de los acuíferos de Guanajuato están sobreexplotados (DOF: 20/04/2015). Considerando que el 84% de los pozos del estado se destinan a la agricultura, 13% de uso público urbano y 3% de uso industrial (CONAGUA, 2016), la agricultura es el principal sector que ha provocado esta sobreexplotación.

El rio Lerma con 750 km de longitud nace de la meseta central de México y desemboca en el lago de Chapala (Figura 5), el cual es el lago tropical más grande de México (Mestre, 1997). En su recorrido pasa por el DR 011, desde la presa Solís hasta la confluencia con el Rio Turbio, límite del distrito, este recorrido tiene una longitud de 229.6 km, y tiene un área de cuenca propia de aproximadamente 2,078 km². Se agregan la cuenca de la Laguna de Yuriria y la cuenca del Lago de Cuitzeo que forman parte del mismo sistema de escurrimientos (Martinez-Pérez, 2013). El Distrito de Riego Alto Rio Lerma es el distrito de riego más grande y que más agua demanda dentro de la cuenca (Tabla 2).

Figura 5: Cuenca Lerma-Chapala y Distrito de Riego Alto Rio Lerma



Fuente: Elaboración propia con datos de la Jefatura del Distrito de Riego 011, INEGI y CONAGUA, 2018.

Tabla 2: Distritos de riego de la cuenca Lerma-Chapala

Distrito	Usuarios	Superficie regada (ha)	Volumen distribuido (dam ³)
DR011	26611	110,299.45	964,898.84
DR013	6041	24,784.69	187,973.73
DR024	2783	15,354.013	77,966.448
DR033	5851	6,288.3	33,416.28
DR045	6875	16,944	145,368.86
DR061	2866	11,756.73	218,504.25
DR085	2577	8,663.21	113,233.87

Fuente: Estadísticas agrícolas de los Distritos de Riego, CONAGUA 2018

Las fuentes de aprovechamiento hídrico del DR 011 son aguas superficiales concesionadas y aguas subterráneas concesionadas de pozos oficiales y pozos particulares. Las fuentes de abastecimiento superficial son: la presa Tepuxtepec que es usada para la generación de energía eléctrica pero que aproximadamente el 90% del agua llega a la Presa Solís a la que suman también escurrimientos del cauce del Rio Lerma, esta presa es la más importante ya que abastece a diez de once módulos del distrito; la Laguna de Yuriria tiene el funcionamiento de vaso regulador del sistema; por último la presa la Purísima, localizada al noroeste del DR 011 abastece al módulo la Purísima y está localizada sobre el rio Guanajuato.

El DR Alto Rio Lerma cuenta además con cinco presas derivadoras: Chamacuaro, Reforma, Loma de Toro, Santa Julia y Markazuza. Este sistema, alimenta una red de 475 km de canales principales, 1,183 canales secundarios, 260 km drenes principales y 761 km de drenes secundarios.

Tabla 3: Características de las presas abastecedoras del DR011

	Capacidad NAME	Capacidad NAMO	Capacidad muerta	Capacidad para riego
Presa	dam ³			
Tepuxtepec	537,527	425,000	25,000	4,000,000
Presa Solís	1,071,022	800,000	25,000	798,107
Laguna de Yuriria	325,195	288,800	100	187,856
La Purísima	196,000	110,000	1,893	110,000

Nomenclatura: Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME), nivel más alto que debe alcanzar el agua en el vaso bajo cualquier condición. Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO), máximo nivel con que se puede operar la presa para satisfacer las demandas.

Fuente: Estadísticas del Agua en México, CONAGUA (2016b).

El Distrito de riego 011 cuenta con 1981 pozos particulares y 190 pozos oficiales. Pozos que extraen aguas subterráneas de los acuíferos: Valle de Acámbaro, Valle de la Cuevita, Salvatierra-Acámbaro, Irapuato-Valle, Valle de Celaya, Silao-Romita, Lago de Cuitzeo,

Ciénega Prieta-Moroleón y Pénjamo-Abasolo, los cuales se encuentran en déficit, siendo el más explotado el Pénjamo-Abasolo con un déficit de 127.89 millones de metros cúbicos, se puede observar que de los acuíferos de donde se extrae agua para riego del distrito son entre los más explotados del estado, ocasionado en gran parte por esta actividad.

Tabla 4: Disponibilidad de aguas de los acuíferos de los que extraen agua los módulos del DR011

Clave	Acuífero	Área km ²	R	DNC	VCAS	VAPTYR	DMA	
							Positiva	Negativa (déficit)
Mm ³								
1110	Silao-Romita	1,880.97	280.0	0.0	162.541094	0.271357	117.187549	0.000000
1115	Valle de Celaya	2,793.81	317.1	3.3	425.211481	2.180785	0.000000	-113.592266
1116	Valle de la cuevita	782.84	9.9	0.3	10.018066	0.058263	0.000000	-0.476329
1117	Valle de Acámbaro	1,123.24	118.4	1.1	90.232352	0.002160	27.065488	0.000000
1118	Salvatierra-Acámbaro	747.57	28.4	0.0	71.131662	0.306209	0.000000	-43.037871
1119	Irapuato-Valle	2,436.93	507.8	28.3	550.625810	0.332128	0.000000	-71.457938
1120	Pénjamo-Abasolo	2,413.67	225.0	0.0	352.404724	0.481955	0.000000	-127.886679
1122	Ciénega prieta-Moroleón	1,220.11	85.0	9.0	86.254869	0.763400	0.000000	-11.018269

Nomenclatura: **R:** recarga total media anual; **DNC:** descarga natural comprometida; **VCAS:** volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; **VAPTYR:** volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; **DMA:** disponibilidad media anual de agua del subsuelo.

Fuente: Elaboración propia a partir de “Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos”, Diario Oficial de la Federación, 4 de Enero del 2018, SEMARNAT.

El DR 011 en promedio utiliza anualmente 699.8 hm³ y tiene concesionado 881.6 hm³, el agua usada en el distrito 60% es de gravedad, 35% de los pozos y 5% de bombeo directo.

Tabla 5: Volumen concesionado por modulo del DR011 Alto Río Lerma

Modulo	Titular	Fuente			
		Acuífero	Volumen subterráneo (Mm ³)	Presas	Volumen superficial (Mm ³)
1	Productores agrícolas del módulo Acámbaro del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Gto., A.C.	Valle de Acámbaro	3.3	Sistema de presas Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria, canal San Cristóbal	75.95
2	Productores agrícolas del módulo Salvatierra del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Gto., A.C.	Salvatierra-Acámbaro	8.7	Sistema de presas Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria; presas derivadoras: Chamácuaro y Reforma	130.47
3	Productores agrícolas del módulo Jaral del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Gto., A.C.	Irapuato	5.6	Sistema de presas Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria	48.88
4	Productores agrícolas del módulo Valle, del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Gto., A.C.	Irapuato	8.3	Sistema de presas Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria, presa derivadora Lomo de toro	100.32
5	Productores agrícolas del módulo Cortázar del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Gto., A.C..	Valle de Celaya	15.9	Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria, presa derivadora Lomo de toro	137.27
6	Productores agrícolas del módulo salamanca del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Gto., A.C.	Irapuato	8.1	Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria, presa derivadora Santa Julia	111.05
7	Productores agrícolas del módulo Irapuato del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Gto., A.C.	Irapuato	6.8	Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria, presa derivadora Lomo de toro	46.45
8	Agrupación de productores del módulo Abasolo del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Gto., A.C.	Pénjamo-Abasolo	11	Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria	109.05
9	Productores agrícolas del módulo Huanímaro del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Gto., A.C.	-		Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria	29.34
10	Productores agrícolas del módulo Corralejo del Distrito de Riego 011	Pénjamo - Abasolo	3.9	Tepuxtepec- Solís-Laguna de Yuriria	7.49

	Alto Río Lerma, Gto., A.C.				
11	Productores agrícolas de la presa La Purísima, A.C.	-		Presa La Purísima	25.2
Total			67.7	Total	813.9

Fuente: Registro público de derechos del agua (REPDA), CONAGUA (2016).

Un mecanismo para la reasignación del recurso son los mercados de agua, actualmente la Ley de Aguas Nacionales (2016) mediante los bancos de agua permite a los agentes económicos la posibilidad transmitir sus derechos de agua de forma completa o parcial según los artículos 33 a 37 de la misma, siempre y cuando se cumplan los reglamentos de la misma Ley y las condiciones de cada cuenca. Si la cuenca se encuentra en veda como es el caso de la cuenca Lerma-Chapala. Se ha estudiado la viabilidad de crear este mercado considerando las características institucionales dentro de la Cuenca Lerma-Chapala como mecanismo para evitar la sobreexplotación del recurso realizado por Pérez et al. (2005), y como política en el estado de Guanajuato para evitar la sobreexplotación de los acuíferos (Hoogesteger & Wester, 2017).

4.3 Operación Distrito de Riego Alto Rio Lerma

Debido a la poca capacidad institucional para reducir el deterioro de la cuenca, así como la disminución de la disponibilidad de agua para los diferentes sectores, en 1970 la entonces Secretaria de Recursos Hidráulicos creó la primera unidad técnica y administrativa para controlar la contaminación del agua en la cuenca Lerma-Chapala (Mestre, 1997). Cuando la problemática se volvió más compleja y evidente, en 1989 se crea el primer Acuerdo de Coordinación firmado por la federación y los gobiernos de los estados que utilizan recursos hídricos de la cuenca. Se crea además el Consejo Consultivo de Evaluación y Seguimiento, formado por representantes de las diversas dependencias del Gobierno Federal relacionadas con el tema. Este consejo se formó con representantes de gobiernos estatales de Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Querétaro y México, así como representantes de los usuarios de diferentes sectores, este consejo se encargó de dar seguimiento a las acciones para cumplir los objetivos planteados en ese momento: sanear la cuenca, el manejo y conservación de la cuenca y sus corrientes. Posterior a la Ley de Aguas Nacionales de 1992, el 28 de enero de

1993 este consejo se convirtió en el Consejo de Cuenca Lerma-Chapala, en el que se estableció un convenio para definir la fórmula de asignación anual de agua para cada usuario, aunque aún con este acuerdo han existido conflictos entre los mismos usuarios y usuarios con autoridades.

Dentro del Distrito de Riego 011, concluye Salcedo Baca(2005), la jerarquía organizativa de abajo a arriba es: En el primer nivel se encuentran los módulos de riego, los cuales son un conjunto de usuarios que comparten canales menores que distribuyen el agua a sus parcelas, estos son responsables de la operación, administración y mantenimiento de la red menor de distribución y drenaje del sistema, como canales laterales y secundarios provenientes del canal general. El siguiente nivel es el conjunto de estos módulos conformados en una Sociedad de Responsabilidad Limitada de Interés Público y Capital Variable (S. de R.L de I.P. y C.V) la cual recibe el agua concesionada por la Jefatura de Distrito (CONAGUA) para la entrega en bloque a cada módulo. El siguiente nivel es el sistema de presas, el cual por gravedad es la fuente de abastecimiento del distrito y es administrada por la Jefatura de Distrito (CONAGUA). El último nivel corresponde al consejo de cuenca, el cual toma las decisiones sobre el volumen de agua que se asigna al distrito cada año.

El primer día del mes de noviembre de cada año, el consejo de cuenca determina y asigna el volumen que de las fuentes superficiales podrán disponer los usuarios de la cuenca a lo largo del año, para el DR011 este volumen es calculado de acuerdo al agua almacenada en la Presa Solís, laguna Yuriria y presa la Purísima.

Según el decreto del diario de la federación en el que se establece zona de veda en 19 cuencas hidrográficas (DOF:08/04/2014) en la segunda fase del decreto: Determinación de volúmenes máximos de extracción, en específico para el Distrito de Riego 011 se dice lo siguiente:

“El volumen máximo de extracción para el caso del Distrito de Riego 011 incluido el módulo de Pastor Ortiz, será el resultado de la aplicación de la siguiente fórmula:

Cuando la magnitud de la suma de los escurrimientos superficiales generados en las cuencas río Lerma 1 (Alzate), río la Gavia (Ramírez), río Jaltepec (Tepetitlán), río Lerma 2 (Tepuxtepec) y río Lerma 3 (Solís) del período antecedente se ubique entre 0 y 999.00 hm³,

el volumen máximo de extracción será igual a 477.06 hm³. Cuando este escurrimiento sea mayor a 999.00 y menor o igual a 1,644.06 hm³, el volumen máximo de extracción será igual al 74.08% de la suma del escurrimiento generado en las cuencas menos 263.12 hm³. Finalmente, cuando la suma de los escurrimientos generados en las cuencas sea mayor a los 1,644.06 hm³, el volumen máximo de extracción será igual a 955 hm³.

De acuerdo al convenio y las reglas para la determinación de volumen que se distribuye al distrito, los usuarios se ven afectados por reducciones de volúmenes que se les asigne cada año agrícola, debido a que la superficie sembrada depende del agua disponible en el año agrícola, se ha observado que cuando el agua es escasa los productores deciden sembrar únicamente un ciclo agrícola ya sea O-I o P-V. La cantidad de agua, una vez asignada por CONAGUA, su transferencia a los módulos de riego es tarea de la Sociedad de Responsabilidad Limitada, la cual entrega el agua en bloque a cada módulo, donde son los usuarios los que controlan su distribución por la red menor de canales.

La Tabla 6 contiene el volumen de agua total asignado y utilizado por el Distrito de Riego, en función del almacenamiento del sistema de presas de los últimos nueve años agrícolas. Se puede observar que existieron años agrícolas de escasez como el 2009-2010 y 2012-2013, en los cuales se asignó un volumen casi del 50% con respecto al último año reportado 2016-2017, sin embargo, en los últimos cuatro años se ha mantenido constante el volumen disponible del sistema de presas.

Tabla 6: Almacenamiento sistema de presas del DR011 2008-2017

Ciclo Agrícola	Almacenamiento sistema de presas Tepuxtepec-Solís-Laguna de Yuriria-La purísima (Mm ³)	Asignado al DR011 (Mm ³)	Utilizado DR011 (Mm ³)
2008-2009	1,613.6	898.8	1,083.7
2009-2010	1,253.1	496.1	352.0
2010-2011	1,503.2	771.5	829.5
2011-2012	1,270.8	581.8	580.3
2012-2013	1,190.3	495.8	334.0
2013-2014	1,501.6	769.0	645.5
2014-2015	1,551.9	834.7	569.6
2015-2016	1,486.8	838.3	679.3
2016-2017	1,498.6	903.7	788.9

Fuente: Jefatura del Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma, CONAGUA 2018

El agua de pozos, aparte de los volúmenes concesionados por el REPGA, no existe un acuerdo formal de asignación de aguas subterráneas, ya que su uso depende en parte por la disponibilidad de aguas superficiales, como resultado se ha provocado una sobreexplotación de aguas subterráneas en la región (Speed et al., 2013). De los acuíferos se extraen en promedio 358.259 millones de metros cúbicos anuales para el uso agrícola del distrito.

Tabla 7: Volumen extraído de pozos por el DR011 2009-2017

Ciclo Agrícola	Utilizada DR011 (Mm ³)
2009-2010	379.818
2010-2011	431.591
2011-2012	375.024
2012-2013	370.905
2013-2014	351.708
2014-2015	302.087
2015-2016	315.595
2016-2017	339.343

Fuente: Jefatura Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma, CONAGUA 2018

Históricamente en el Distrito se ha cobrado a los usuarios por hectárea riego, esta cuota ha aumentado en términos nominales con los años como puede observarse en la Tabla 8. Para el periodo de análisis la tarifa es de \$500.00 pesos por hectárea de riego. Las Autoridades de la Jefatura del distrito, comentan que a pesar de ser una cuota alta comparada a la de otros distritos, ésta aun es baja y difícilmente es suficiente para cubrir todos los costos de operación y mantenimiento de cada módulo de riego. Este precio no refleja el verdadero valor del agua, consideran que un mecanismo el cual podría promover un uso eficiente del agua y una mejor recaudación por las autoridades sería su cobro por metro cubico, sin embargo, no han tenido la capacidad tecnológica, ni el apoyo de los usuarios para poder implementar esta política.

Tabla 8: Evolución de la cuota por agua de gravedad en los últimos diez años DR011

Año agrícola	MXN \$/ ha de riego
2008-2009	330.00
2009-2010	340.00
2010-2011	355.00
2011-2012	365.00
2012-2013	420.00
2013-2014	435.00
2014-2015	455.00
2015-2016	465.00
2016-2017	480.00
2017-2018	510.00

Fuente: Jefatura Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma, CONAGUA 2018

La tarifa para la extracción de agua de pozos es la tarifa 09 de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Esta tarifa se aplica exclusivamente a los servicios en baja tensión que destinen la energía para el bombeo de agua utilizada en el riego de tierras dedicadas al cultivo de productos agrícolas y al alumbrado del local donde se encuentre instalado el equipo de bombeo. Debido al alto subsidio de ésta, ha propiciado fomentado la sobreexplotación de los acuíferos del estado de Guanajuato (Scott y Shah, 2004).

4.4 Agricultura en el Distrito de Riego 011

En el distrito de riego las siembras se realizan en los ciclos otoño-invierno (O-I) entre los meses de octubre y noviembre, las cosechas se realizan en febrero y marzo, en el cual se cultivan principalmente trigo, cebada y hortalizas como brócoli y lechuga. En el ciclo primavera-verano (P-V) durante los meses de marzo y abril, y las cosechas septiembre, se cultiva maíz y sorgo principalmente. Los cultivos perennes principales fueron alfalfa y esparrago. Se consideran como segundos cultivos maíz y sorgo sembrados generalmente en el mes de mayo.

Tabla 9: Producción media por ciclo en el DR011 2014-2017

Ciclo	Superficie media Sembrada (ha)	Producción media (t)	Valor medio de la producción (miles de MXN \$)
Otoño-Invierno	66,730.27	514,366.14	2,012,394.93
Perennes	8,439.53	138,476.81	1,021,402.99
Primavera-Verano	17,466.04	202,812.39	724,891.62
Segundos Cultivos	54,546.18	535,691.06	1,848,850.75

Fuente: Elaboración propia con datos de Jefatura del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma, CONAGUA 2018

Como puede observarse en la Tabla 10, en promedio en los últimos tres años agrícola la superficie sembrada en el Distrito de Riego se destinó principalmente a los cultivos de maíz, cebada, sorgo y trigo, estos representaron el 87.43% de la superficie total. Estos cultivos son también a los que mayor cantidad de agua se destina demandando en promedio el 82% del agua asignada al distrito.

Tabla 10: Cultivos principales en el DR011 2014-2017

Cultivo	Superficie sembrada media (ha)
Alfalfa	4,249.96
Brócoli	2,726.27
Cebada	35,260.70
Espárrago	4,651.60
Maíz grano	60,243.72
Sorgo Grano	18,262.40
Trigo Grano	24,024.04
Otros	9,243.99

Fuente: Elaboración Propia con Datos Proporcionados por la Jefatura del Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma, 2018

4.5 Módulos de riego

Existen diferencias en la superficie sembrada y agua usada en el año base 2016-2017, los módulos el Acámbaro, Huanímaro, Corralejo y La Purísima, son los que menos superficie sembraron y menos agua usaron en el año base, los que mayor superficie sembraron en el año agrícola 2016-2017 fueron Salvatierra, Valle, Salamanca, Irapuato, Cortázar y Abasolo, siendo estos módulos los que mayor agua demandan.

Tabla 11: Superficie sembrada por modulo 2016-2017

Modulo	Superficie total sembrada (ha)
M01 Acámbaro	8,034.27
M02 Salvatierra	21,008.79
M03 Jaral	11,463.50
M04 Valle	21,070.15
M05 Cortázar	29,835.12
M06 Salamanca	19,028.81
M07 Irapuato	10,382.81
M08 Abasolo	22,955.18
M09 Huanímaro	7,048.03
M10 Corralejo	2,635.00
M11 La Purísima	7,208.81
<i>Total</i>	<i>160,670.47</i>

Fuente: Elaborado con datos de la Jefatura del Distrito de Riego 011, CONAGUA 2018

A parte de las diferencias en la cantidad de agua usada por cada módulo, existen diferencias en la fuente de donde obtienen el recurso, por ejemplo, el módulo Jaral utiliza una mayor cantidad de agua de pozos que de agua de gravedad, y que es aproximadamente la misma

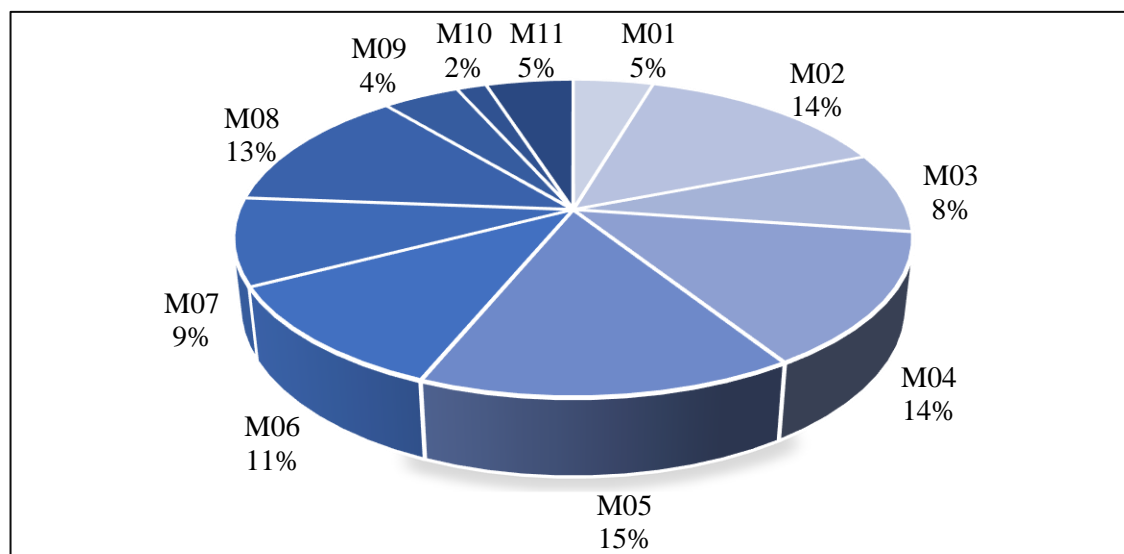
cantidad que utilizan grandes módulos como Valle y Cortázar, los cuales utilizan principalmente el agua de esta fuente para el riego de hortalizas y cultivos perennes.

Tabla 12: Volumen de agua usado por módulo de riego 2016-2017 (dam³)

Modulo	Superficial	Pozo	Total
M01 Acámbaro	37,143.63	11,402.11	48,545.74
M02 Salvatierra	126,211.48	45,069.80	171,281.28
M03 Jaral	35,508.65	53,564.17	89,072.82
M04 Valle	94,017.24	54,565.79	148,583.03
M05 Cortazar	112,250.72	53,475.04	165,725.76
M06 Salamanca	103,425.02	19,211.04	122,636.06
M07 Irapuato	44,020.27	51,989.28	96,009.55
M08 Abasolo	113,840.04	21,262.00	135,102.04
M09 Huanímaro	35,369.09	11,828.98	47,198.07
M10 Corralejo	12,709.32	5,228.70	17,938.02
M11 La purísima	46,248.09	8,006.70	54,254.79
<i>DR011</i>	<i>760,743.55</i>	<i>335,603.61</i>	<i>1,096,347.16</i>

Fuente: Elaborado con datos de la Jefatura del Distrito de Riego 011, CONAGUA 2018

Figura 6: Uso de agua por modulo del DR011



Fuente: Elaborado a partir de Informe de entregas de agua, Jefatura Distrito de riego 011, 2018.

CAPÍTULO V. METODOLOGÍA

La metodología usada es la programación matemática positiva, la cual consiste en desarrollar un modelo de programación no-lineal de producción donde se maximiza el beneficio neto total del distrito de riego. El proceso como se mencionó en el apartado 2.4, es construir un modelo lineal en el cual se maximiza el beneficio neto total del distrito de riego, con varias regiones (módulos de riego). El modelo lineal se calibró al año agrícola 2016- 2017 sujeto a la disponibilidad observada de los recursos: agua y tierra, de ese año. Los valores duales obtenidos para las restricciones con este modelo se usaron para formular una función de costos cuadráticos, por cada actividad y modulo, esta función se integró en un modelo final del cual se construyeron varios escenarios de disponibilidad hídrica para obtener diferentes valores de precios sombra y conocer los cambios en el patrón de cultivos que optimizan el uso de los recursos.

Como se mencionó anteriormente para la investigación se tomaron en cuenta utilizaron los once módulos del distrito de riego. Para desarrollar el modelo requieren de diferentes juegos de datos por modulo: patrones de cultivos, uso del agua, rendimientos, costos de producción y precios medios rurales, siendo estos los factores que determinan la heterogeneidad de los módulos y por lo tanto las diferencias en el precio sombra del agua entre un módulo y otro.

5.1 Actividades seleccionadas

Una diferencia importante que tiene implicaciones en los resultados de la investigación es el patrón de cultivos que cada módulo tiene. Esta diferencia se refleja claramente en el valor marginal del agua y en la disposición que tendrán los agricultores de un módulo a pagar por un volumen de agua. Analizando los patrones de cultivos desde el año 2008 al 2017, no existen diferencias en la representatividad de los cultivos seleccionados para cada módulo, por lo que el año agrícola elegido puede considerarse como un año agrícola típico.

Como se comentó anteriormente los cultivos más representativos son: cebada, trigo, maíz y alfalfa, sin embargo, dentro de cada módulo existen otros cultivos que son importantes por el número de hectáreas que se destinan a ellos. Se seleccionaron los cultivos que dentro de cada módulo representaran más del 1% de la superficie sembrada, cultivos resumidos en la Tabla 13. El resto de los cultivos no representan una gran cantidad de tierra y agua usada por

lo que no se estarían afectando los resultados, entre estos cultivos descartados se encuentran cilantro, calabacita, cacahuete, chile, garbanzo y ajo.

Tabla 13: Patrón de cultivos seleccionados para el Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma del año base 2016-2017

Cultivo	Superficie sembrada (ha)	Volumen de agua (dam ³)
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	4,312	42,801
Avena Forrajera (<i>Avena sativa</i>)	269	2,150
Brócoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	2,449	23,101
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	35,559	301061
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	531	3828
Espárrago (<i>Asparagus officinalis</i>)	4,652	29164
Fresa (<i>Fragaria mexicana</i>)	576	18214
Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	684	10432
Lechuga (<i>Latuca sativa</i>)	1,162	8329
Maíz grano (<i>Zea mays</i>)	59,593	287191
Sorgo Grano (<i>Sorghum bicolor</i>)	20,965	79305
Tomate de cáscara (<i>Physalis philadelphica</i>)	647	8767
Trigo Grano (<i>Triticum sp.</i>)	22,357	235169
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	641	2399
Total	154,396	1051912
%Representado del DR	97.3%	95.6%

Fuente: Elaborado a partir de (CONAGUA, 2018d, 2018b)

Hay que destacar que existen módulos que tienen representatividad una mayor variedad de cultivos como los módulos Salvatierra, Cortázar, Salamanca, Irapuato y Abasolo, en los cuales se siembran cultivos de mayor valor como fresa, esparrago, lechuga y brócoli. Se espera que en estos módulos el precio sombra sea mayor al tener cultivos con mayor ingreso neto representativos en su patrón de cultivos. Por otro lado, los módulos Acámbaro, Jaral, Huanímaro, Corralejo y La Purísima, tienen como cultivos más representativos cultivos de bajo ingreso neto como trigo, sorgo y maíz, por lo que se espera que el precio sombra del agua se menor para estos módulos.

5.2 Costos de producción, precios medios rurales y rendimientos.

Los conjuntos de datos correspondientes a costos de producción, precios medios rurales y rendimientos, se usaron de datos medios de los últimos tres años agrícolas 2014-2015 a 2016-2017 reportados por la Jefatura del Distrito de Riego 011 (Tabla 14). El precio medio rural no varía significativamente entre módulos sin embargo se usaron los precios que reportan los módulos a la jefatura del distrito, consistentes con datos de agencias del gobierno (SAGARPA y SE). Los costos medios de producción por modulo son reportados cada año agrícola clasificados por fuente del recurso agua, entre los módulos existen diferencias significativas en los costos de producción sobre todo en los cultivos de hortalizas, por otro lado, los costos no varían significativamente en los cultivos de granos. Los rendimientos tienen diferencias según se cultiven con el uso de agua superficial o de pozos, se observa que módulos con un mayor uso de agua subterránea tienen una mayor productividad. Los conjuntos de datos usados en el modelo pueden verse en el Anexo I.

Tabla 14: Datos medios: precio medio rural, costos y rendimientos 2014-2017

Cultivo	Precio Medio (MXN \$/t)	Costos Medios (MXN \$/ha)	Rendimiento Medio (t/ha)
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	2,100.00	23,302.7	25.92
Avena Forrajera (<i>Avena sativa</i>)	1,669.12	13,920.00	11.75
Brócoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	4,139.35.	45,805.75	14.95
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	4,302.63	17,795.41	6.21
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	3,274.08	37,761.33	38.19
Espárrago (<i>Asparagus officinalis</i>)	33,802.24	92,355.73	4.74
Fresa (<i>Fragaria mexicana</i>)	9,011.37	143,797.50	31.96
Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	15,711.68	19,575.00	2.51
Lechuga (<i>Latuca sativa</i>)	3,034.55	32,235.87	24.96
Maíz grano (<i>Zea mays</i>)	3,467.45	21,031.16	11.31
Sorgo Grano (<i>Sorghum bicolor</i>)	3,392.11	18,337.91	7.86
Tomate de cáscara (<i>Physalis philadelphica</i>)	4,167.10	27,540.00	24.30
Trigo Grano (<i>Triticum sp.</i>)	3,697.97	18,294.49	6.59
Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	1,521.25	23,852.50	41.25

Fuente: Elaborado a partir de CONAGUA (2018c, 2018b)

5.3 Uso del agua

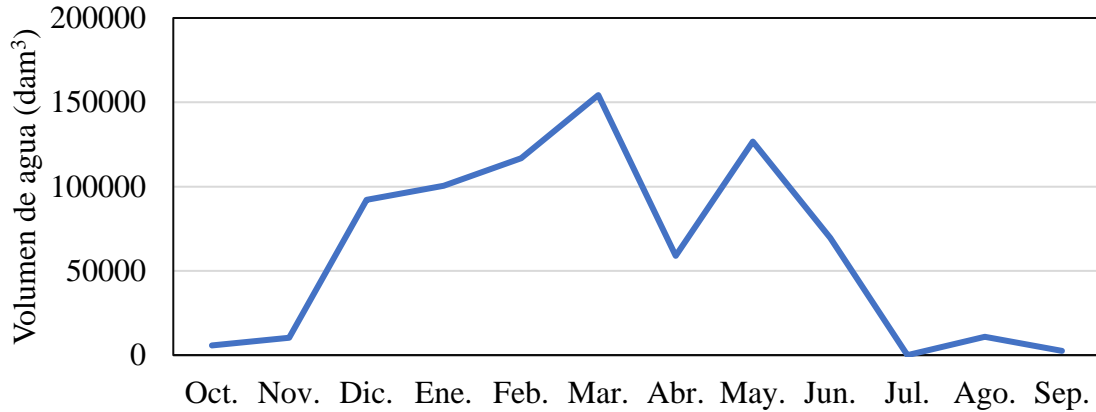
Los datos de entregas de agua se obtuvieron mediante la S. de R. L. del DR011, con los reportes mensuales de entregas de agua a cada cultivo y módulo, clasificados por aguas de presas, pozos particulares y pozos oficiales. Así mismo se usaron resúmenes de entregas de agua que se reportan cada año agrícola para todos módulos, proporcionados por la jefatura del distrito de riego del año 2014 al 2017. Estas bases de datos, reportan información sobre el agua enviada cada mes y en un año agrícola a cada cultivo y modulo del distrito.

Como se observa en la Tabla 12, existen módulos de riego que usan grandes cantidades de agua y de diferentes fuentes. En el año base los módulos Salvatierra, Valle, Cortázar y Abasolo, fueron los que más agua usaron, comparado a los módulos Acámbaro, Huanímaro, Corralejo y La Purísima. En la misma tabla se observa de donde proviene el agua que utilizan los módulos, esto es importante ya que el agua de pozos es más productiva, por lo que se espera que en los módulos donde se utiliza una mayoría de agua proveniente de acuíferos tenga un mayor valor.

El uso de agua por cada cultivo corresponde al promedio del volumen entregado a cada cultivo entre el número de hectáreas sembradas en cada módulo. El volumen varía según el cultivo y de que fuente utiliza este recurso, ya sea de agua superficial o de pozos. Se consideró como restricción de agua para cada módulo el agua usada observada en el año base 2016-2017. Se espera que módulos donde utilizan mayor cantidad de agua de pozo tengan un mayor precio sombra ya que ésta se destina a cultivos con mayor beneficio neto como hortalizas y cultivos perennes (esparrago y fresa). Todas las unidades de volúmenes de agua se manejaron en miles de metros cúbicos o decámetros cúbicos (dam^3).

En la Figura 7, se observa como evoluciona el plan de riegos a lo largo de un año agrícola, se puede diferenciar los ciclos primavera-verano y otoño-invierno, los meses de febrero y mayo son los dos periodos en lo que se siembra y riega maiz el cual utiliza la mayor cantidad de agua en el distrito.

Figura 7: Evolución entrega de agua del DR011 en el año agrícola 2016-2017



Fuente: Elaborado a partir del informe de distribución de aguas, DR011 S. de R.L, 2018

5.4 Modelo de programación matemática positiva

Como se comentó en el capítulo 3.4, la programación matemática positiva consiste en tres etapas o pasos para su auto-calibración, el modelo final debe ser capaz de representar el uso observado del agua y comportamiento de los agricultores.

Primer Paso: Modelo lineal de producción.

El primer paso para desarrollar el modelo de PMP es el modelo de programación lineal de producción al cual se agregan restricciones de calibración. De acuerdo a Howitt (1995b) el modelo calibrado se representa de la siguiente forma:

$$Max \quad Z = \sum_g \sum_i (p_i y_{gi} - c_{gi}) x_{gi,tierra} \quad (1)$$

sujeto a:

$$\sum_i a_{gij} x_{gij} \leq b_{gj} \quad \forall g, j \quad (2)$$

$$x_{gi} \leq \bar{x}_{gi} + \varepsilon \quad (3)$$

$$x_{gi} \geq 0 \quad \forall i \quad (4)$$

Donde se maximiza el beneficio neto total del distrito Z, en la función objetivo (ecuación 1), que es igual al precio p_i multiplicado por el rendimiento y_{gi} , menos el costo c_{gi} , por la variable de decisión x_{gi} que es el número de hectáreas sembradas en el módulo g del cultivo i. La restricción de los recursos (ecuación 2) está dada por los coeficientes técnicos de Leontieff a_{gij} , estos representan el uso de los factores de producción usados en una unidad de actividad producida, limitados a la cantidad del recurso j, sean estos tierra y agua, en cada región dado por el parámetro b_{gj} . Se agrega una restricción de calibración (ecuación 3) la cual limita la producción de la actividad x_{gi} al valor observado en el año base \bar{x}_{gi} con una perturbación ε , factor de desacoplamiento para asegurar que el nivel de actividad sea igual al observado. Por último, se tiene la condición de no negatividad (ecuación 4).

Segundo Paso: Parametrización de una función de costos cuadrática

La función de costos totales está dada por:

$$CT_{gi}(X_{gi,tierra}) = \alpha_{gi}x_{gi,tierra} + \frac{1}{2}\gamma_{gi}x_{gi,tierra}^2 \quad (5)$$

Donde: $\alpha_{gi} = c_{gi} -$

$$\mu_{gi} \quad (6)$$

y $\gamma_{gi} = \frac{2\mu_{gi}}{\bar{x}_{gi}}$ (7)

La función de costos (ecuación 5) se calibra exactamente a los valores observados de producción y uso de los factores, al usar el vector de valores duales μ_{gi} de la restricción de calibración (ecuación 3) del primer paso, este vector se incluye dentro del parámetro asociado al intercepto α_{gi} , así como en la pendiente γ_{gi} de la función de costos.

Tercer Paso: Modelo de producción no lineal

En esta etapa se maximiza la sumatoria del beneficio neto total, con una función objetivo no lineal, sujeto a la disponibilidad de los recursos de cada módulo, el modelo final usado es:

$$\text{Max } Z = \sum_g \sum_i (p_i \gamma_{gi}) x_{gi,tierra} - \sum_g \sum_i (\alpha_{gi} + \frac{1}{2} \gamma_{gi} x_{gi,tierra}) x_{gi,tierra} \quad (8)$$

sujeto a:

$$\sum_i a_{gi,tierra} x_{gi,tierra} \leq b_{g,tierra} \quad \forall g, tierra \quad (9)$$

$$\sum_i a_{gi,agua} x_{gi,agua} \leq \delta \cdot b_{g,agua} \quad \forall g, agua \quad (10)$$

$$x_{gi} \geq 0 \quad \forall i \quad (11)$$

En este modelo se maximiza la función objetivo (ecuación 8) la cual es la suma de los beneficios netos totales de todos los módulos del distrito de riego, siendo la variable de decisión las hectáreas sembradas de cada cultivo en cada módulo $x_{gi,tierra}$, a esta función se integra la función de costos cuadrática calibrada por la PMP (ecuación 5). Se tiene la restricción de disponibilidad de tierra (ecuación 9) y la restricción (ecuación 10) es usada para crear escenarios de disponibilidad hídrica donde $b_{agua,gj}$ es la disponibilidad de agua anual para cada módulo, y el coeficiente δ de disponibilidad hídrica el cual puede tener valores de $0 < \delta < 1$. Con este modelo se hacen algunos supuestos, en primer lugar, el agua está disponible pero limitada para cada módulo en un año agrícola y no es intercambiable entre ellos, el agua disponible anual es intercambiable entre los cultivos de un módulo y se

asigna según la estacionalidad de los cultivos, los usuarios de cada módulo toman decisiones maximizando sus beneficios anuales.

Para los diferentes escenarios de escasez simulados en la investigación, se consideraron la reducción de la disponibilidad de agua del 100% al 50% en pasos de diez por ciento, usando el parámetro de disponibilidad hídrica (δ) en la restricción de disponibilidad de agua (ecuación 10). El modelo supone que los agricultores toman decisiones para maximizar el beneficio neto de su producción en un año agrícola, esto se ajusta al comportamiento real de los agricultores y de la operación del distrito. El modelo elige el patrón de cultivos óptimo, hasta el punto donde el producto marginal de los cultivos seleccionados es igual al costo marginal de los factores.

Los valores obtenidos de estos escenarios se utilizaron para construir la demanda derivada de cada módulo, donde cada punto corresponde al precio sombra de cada escenario en relación al agua enviada a cada módulo. Se calcularon las elasticidades precio del agua, utilizando los puntos correspondientes a cada escenario. Estos valores representan el cambio porcentual en la cantidad demandada ante un cambio porcentual unitario en el precio del agua. El método usado para su cálculo fue el de punto medio:

$$\text{Elasticidad precio del agua} = \frac{(Q_2 - Q_1) / [(Q_2 + Q_1) / 2]}{(PS_2 - PS_1) / [(PS_2 + PS_1) / 2]} \quad (12)$$

Donde Q corresponde a la cantidad enviada a cada módulo y PS al precio sombra en cada escenario de escasez (δ).

Modelo no-lineal de mercado de agua

Una vez calibrado el modelo por el primer y segundo paso, se formuló un modelo que permite la exportación e importación de agua entre módulos de riego. Este modelo se utilizó evaluar la posibilidad de crear un mercado de agua en el distrito de riego, como política que compense los impactos económicos de una posible sequía y permita un uso eficiente dentro del distrito. Este modelo permite observar que módulos se volverían vendedores de agua y cuales compradores, así mismo nos posibilita conocer los cambios en el patrón de cultivos óptimo, sin mercados de agua y con mercados de agua, bajo los diferentes escenarios de disponibilidad.

$$MaxZ = \sum_g \sum_i (p_i \gamma_{gi}) x_{gi,tierra} - \sum_g \sum_i (\alpha_{gi} + \frac{1}{2} \gamma_{gi} x_{gi,tierra}) x_{gi,tierra} + (pa AI_{g,agua} - pa AE_{g,agua}) \quad (13)$$

sujeto a:

$$\sum_i a_{gi,tierra} x_{gi,tierra} \leq b_{g,tierra} \quad \forall g, tierra \quad (14)$$

$$\sum_i a_{gi,agua} x_{gi,agua} \leq \delta \cdot b_{g,agua} + (AI_{g,agua} - AE_{g,agua}) \quad \forall g, agua \quad (15)$$

$$\sum_g AI_{g,agua} = \sum_g AE_{g,agua} \quad (16)$$

$$AI_{g,agua}, AE_{g,agua}, x_{gi} \geq 0 \quad (17)$$

Las nuevas variables de decisión son la importación de agua por región $AI_{g,agua}$ y la exportación de agua por región $AE_{g,agua}$, se incluyen dentro de la función objetivo y se multiplican por el precio del agua (pa) que es el promedio del precio sombra del agua de los módulos en los dos escenarios obtenido con el modelo formado por las ecuaciones 8 a 11. La restricción de agua disponible por región es su disponibilidad, más la cantidad que importa, menos la cantidad que exporta (ecuación 15). En el distrito el agua que se importa por los módulos debe ser la misma que estos exportan (ecuación 16) y las nuevas variables deben cumplir con la condición de no negatividad (ecuación 17). Para este modelo a parte de los supuestos mencionados en el tercer paso, se hace el supuesto de que existe la infraestructura necesaria para el mercado de agua y la suficiente capacidad de almacenamiento.

Para el modelo con mercado de agua se utilizó el mismo parámetro de disponibilidad hídrica (δ) en la restricción de disponibilidad de agua con posibilidad de mercado (ecuación 15), en la investigación este valor tuvo valores de 0.75 para el caso de escasez del 25% y de 0.50 para el caso de 50% de escasez.

CAPÍTULO VI. RESULTADOS

El modelo de programación lineal calibrado (ecuaciones 1 a 4), la parametrización de la función de costos cuadrática (ecuaciones 5 a 7), el modelo de producción no-lineal (ecuaciones 8 a 11) y el modelo para evaluar la factibilidad de crear un mercado de agua dentro del distrito (ecuaciones 13 a 17) se formularon y resolvieron usando el software GAMS (General Algebraic Modelling System) siguiendo la guía de McCarl (2015). La calibración del modelo a los valores observados del año base 2016-2017 se realizó en el primer y tercer paso.

4.1 Valor económico del agua en escenarios de escasez

En la primera etapa de la investigación, se obtuvieron los valores marginales del agua para cada módulo, para ello, se redujo la disponibilidad de agua del 100% al 50% en pasos de diez por ciento, usando el parámetro de disponibilidad hídrica (δ) en la restricción de disponibilidad de agua (ecuación 10). El modelo supone que los agricultores toman decisiones para maximizar el beneficio neto de un año agrícola, esto se ajusta al comportamiento real de los agricultores y de la operación del distrito explicado en el Capítulo 4.3. El modelo de optimización elige el patrón de cultivos, donde el valor del producto marginal es igual al costo marginal de los factores.

Debido a la heterogeneidad de los módulos en los diferentes factores considerados en la investigación, los precios sombra tienen diferencias significativas entre los módulos resumidos en la Tabla 15. El módulo Corralejo es el módulo que mantiene el precio sombra más bajo del distrito aun con una escasez extrema del 50%, esto se debe a que tiene un mayor uso de agua superficial y siembra únicamente cultivos de bajo precio neto.

Hay que considerar que los cultivos de trigo y avena, son los que tienen el menor precio neto en el DR011, además al ser el trigo un cultivo con un alto consumo de agua, el valor del producto marginal del agua es bajo. Por otro lado, se observa que módulos que tienen baja representación de trigo, avena y cebada, y un alto porcentaje en la superficie sembrada de maíz, sorgo y hortalizas, mantienen un precio sombra alto en cada nivel de disponibilidad como es el caso de los módulos Acámbaro, Salvatierra, Jaral, Valle, Cortázar e Irapuato, para

estos módulos cuando el agua se hace más escasa el precio sombra aumenta en una mayor proporción que en el resto del distrito.

Como se comentó en el capítulo 4, el precio pagado por los agricultores en el año 2016-2017 fue de \$500 pesos por hectárea de riego. Tomando en cuenta que una hectárea de riego tiene una distribución volumétrica media de 3,400 m³, resulta en un pago \$150.00 por dam³. Por lo que a excepción del módulo Corralejo, en todos los casos el precio sombra es mayor a la cuota pagada por los usuarios de 1.8 a 4.7 veces, con la disponibilidad de agua observada en el año agrícola 2016-2017, considerando una escasez del 20% la proporción del precio sombra sobre el precio pagado aumenta de 1.8 a 5.8 veces la cuota pagada y con una escasez extrema del 50% aumentaría de 3.6 a 14.8 veces el precio pagado a la Jefatura del distrito.

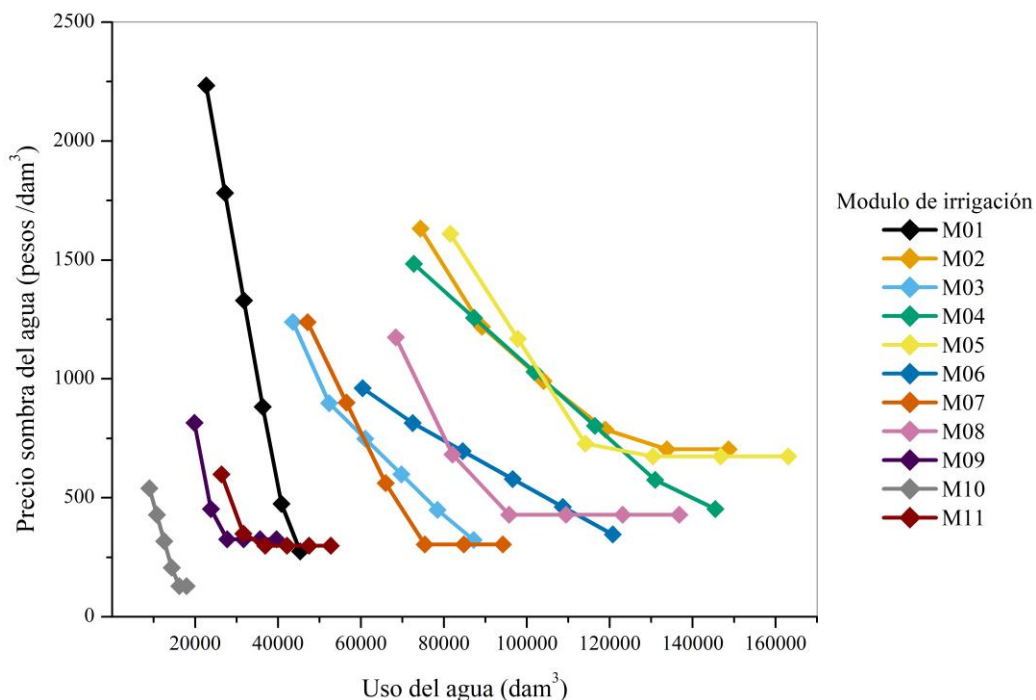
Tabla 15: Precios sombra del agua por módulo de riego (MXN pesos/dam³)

Agua (%)	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
100	275	704	323	453	674	346	304	429	326	128	299
90	474	704	449	575	674	462	304	429	326	128	299
80	882	787	598	802	674	579	304	429	326	206	299
70	1,330	991	748	1030	728	697	562	429	326	318	299
60	1,782	1,219	898	1,257	1,169	814	900	682	448	429	349
50	2,234	,1632	1,239	1,484	1,610	961	1238	1,175	812	540	599

Nomenclatura módulos: M01: Acámbaro, M02: Salvatierra, M03: Jaral, M04: Valle, M05: Cortazar, M06: Salamanca, M07: Irapuato, M08: Abasolo, M09: Huanímaro, M10: Corralejo, M11: La Purísima.

En la Figura 8 se muestran los diferentes valores marginales del agua obtenidos, ante los escenarios de disponibilidad, estos representan el precio máximo que los agricultores estarían dispuestos a pagar por cada mil metros cúbicos adicionales de agua en un año agrícola.

Figura 8: Precios sombra del agua en los módulos de riego



Fuente: Elaboración propia con resultados de la investigación

Como se observa el módulo Acámbaro, Salvatierra y Cortázar, presentan el mayor precio sombra, con una escasez extrema la disposición de pago aumenta a 2,230, 1,632 y 1,484 pesos por mil metros cúbicos respectivamente, esto se debe a que cultivos con alto precio neto están bien representados. Para el caso del módulo Salvatierra los cultivos de zanahoria y tomatillo, y en el módulo Cortázar los cultivos de brócoli, lechuga y espárrago. El Módulo Valle el cual a pesar de no tener cultivos de alto precio neto tiene un alto consumo de agua subterránea, lo que lo hace un módulo más productivo, esto se ve reflejado en sus rendimientos que están por encima de la media del distrito. En particular llama la atención el caso del módulo Acámbaro, en primer lugar, en este módulo no se siembran cultivos de alto precio neto y el cultivo de maíz representa el 80% de la superficie del módulo, como es de esperarse su precio sombra es bajo al 100% y 90% de disponibilidad, no obstante, al reducir su agua disponible a menos del 70% incrementa más su valor marginal con respecto a los otros módulos, esto puede explicarse por el coeficiente técnico de agua en los cultivos de alfalfa y maíz, ya que en este módulo son bajos con respecto a la media del distrito, es decir

el agua es muy productiva en esos cultivos que tienen una mayor representación, además al ser el agua más escasa el modelo elige los cultivos primeramente con mayor precio neto pero, también los que menos agua utilizan, como es el caso particular del maíz .

Las elasticidades precio medias obtenidas para el distrito encuentran en el rango de -0.33 y -0.65 (Tabla 16) estos se encuentran dentro de los rangos encontrados en el meta-análisis hecho por Scheierling et al. (2006) y en México (Guzman-Soria et al., 2009; Medellin-Azuara et al., 2009). En general las elasticidades del distrito se comportan de forma similar, sin embargo, la elasticidad del módulo Cortázar tiene un valor alto cuando disminuye la disponibilidad al 70%, una explicación es que en ese modulo al tener esparrago y lechuga bien representados ambos cultivos utilizan grandes cantidades de agua entre 6,000 y 7,000 m³ por hectárea.

Tabla 16: Elasticidad precio del agua en los módulos de riego

Agua (%)	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	Media
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-0.20	-	-0.32	-0.44	-	-0.37	-	-	-	-	-	-0.33
80	-0.20	-1.05	-0.41	-0.36	-	-0.52	-	-	-	-0.25	-	-0.46
70	-0.33	-0.58	-0.60	-0.54	-1.74	-0.72	-0.22	-	-	-0.31	-	-0.63
60	-0.53	-0.75	-0.85	-0.77	-0.33	-0.99	-0.33	-0.34	-0.49	-0.52	-0.99	-0.63
50	-0.81	-0.63	-0.57	-1.10	-0.57	-1.10	-0.57	-0.34	-0.31	-0.79	-0.34	-0.65

Fuente: Elaboración propia con resultados de investigación.

4.2 Mercado de agua eficiente en el DR011 como mecanismo frente a la escasez.

El objetivo de la segunda parte de esta investigación fue evaluar la factibilidad de crear un mercado de agua dentro del distrito de riego, el cual permite la transferencia eficiente de derechos agua entre módulos. Este mercado se evaluó mediante el modelo calibrado de PMP, formado por el mismo proceso de tres etapas, el modelo final de mercado de agua está formado por la función objetivo del modelo de producción no-lineal (ecuación 12) y las restricciones de recursos (ecuaciones 13 a 16). Se crearon dos escenarios el primero con una reducción en la disponibilidad total del agua disponible en el distrito de 25% y un segundo escenario con una reducción total del 50%, el objetivo de crear este mercado es la distribución eficiente del agua, la cual se logra mediante la optimización del modelo, así mismo, nos permite analizar el comportamiento de este mercado en escenarios de escasez y del patrón de

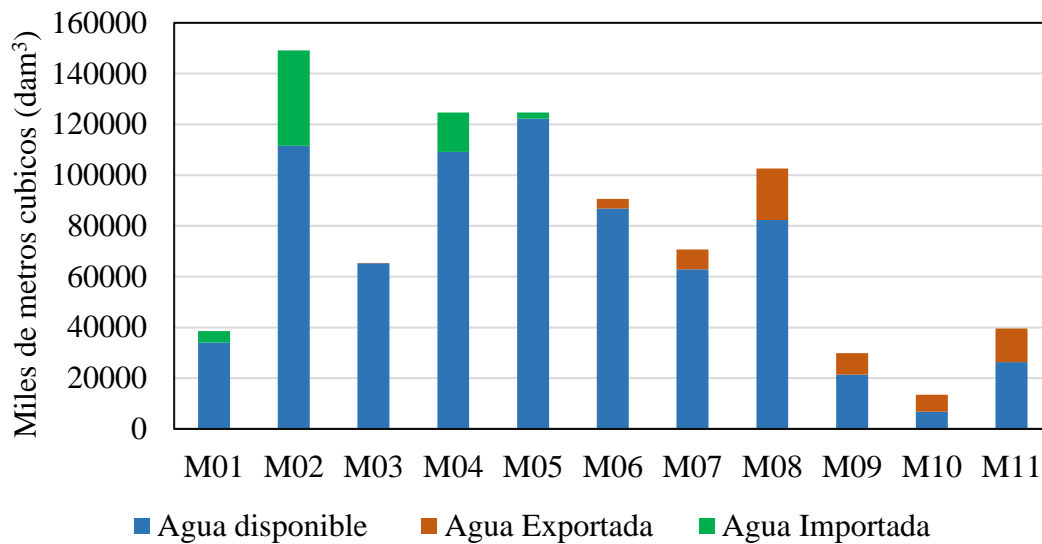
cultivos óptimo, Los resultados se compararon con el caso en que existe una escasez, pero no mercado de agua, obtenidos mediante el modelo calibrado base (ecuaciones 8 a 11) y sus resultados con disponibilidades del 75% y 50%.

Los mercados de agua permiten el movimiento del agua con uso en cultivos de bajo valor a usos de más alto valor, así como de cultivos con alto consumo de agua a los de bajo consumo; lo que provoca cambios en el área irrigada agregada del distrito, así como en el patrón de cultivos óptimo. Se usó como precio del agua en el primer escenario, con veinticinco por ciento de escasez, la cantidad de \$600 MXN pesos por mil metros cúbicos, que es el promedio del precio sombra del agua de los módulos con disponibilidad del 75%, el precio del agua usado en el mercado con escasez del cincuenta por ciento fue de \$1,230 MXN pesos por mil metros cúbicos que como en el caso anterior es el promedio del precio sombra de los módulos cuando estos tienen el 50% de disponibilidad (Tabla 15).

Como era de esperarse con los precios sombra obtenidos, aquellos módulos que tienen un bajo precio sombra, serán exportadores de agua a módulos con alto precio sombra o mayor disponibilidad a pagar. Como se observa en la Figura 09 los módulos Acámbaro, Salvatierra, Valle y Cortázar, se volverían importadores de agua, consistente con los resultados obtenidos anteriormente. El mayor importador de agua sería el módulo Salvatierra con 37,657.59 dam³.

Los módulos Abasolo, Huanímaro, Corralejo y La Purísima serían los mayores exportadores de agua, en particular el módulo Corralejo el cual exporta el 50% de su agua disponible en este escenario de escasez, esto se debe a que en él se siembran cultivos de bajo valor, además su acceso a agua subterráneas es limitado. Por otro lado, el módulo Jaral no participaría en el mercado en este panorama de escasez, debido su alto consumo de agua de pozos que es mayor a su uso de fuentes superficiales, el agua de esta fuente se utiliza principalmente al cultivo de hortalizas, este módulo tiene el cultivo de brócoli bien representado.

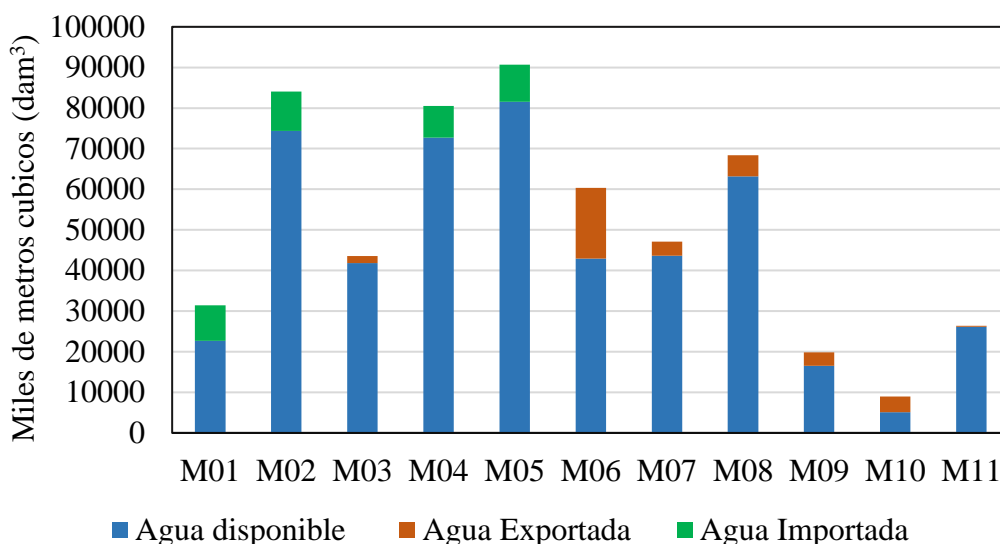
Figura 9: Volumen de agua usado por los módulos de riego con escasez del 25% (dam³)



Fuente: Elaboración a partir de resultados de la investigación.

El caso de una escasez del 50%, el comportamiento de los módulos no cambiara con respecto al escenario anterior; bajo este escenario los módulos Salvatierra y Cortázar serían los más grandes importadores y el módulo Salamanca sería el más grande exportador con 17,464.278 dam³, junto con el módulo Corralejo que exportaría 3,842 dam³, que representa el 49.4% de su agua disponible bajo este escenario. Como en el escenario anterior el módulo Jaral no tendría que exportar ni importar agua ante una escasez del 50%. El módulo La Purísima sería así mismo no participaría en el mercado de agua en este escenario ya que no vendería ni compraría agua, a pesar de que su recurso depende casi en su totalidad de agua superficial, las condiciones que tiene el módulo lo hacen capaz de superar una escasez de esta magnitud, sus rendimientos en los cultivos de granos están por encima de la media del distrito.

Figura 10: Volumen de agua usado por los módulos de riego con escasez del 50% (dam³)



Fuente: Elaboración propia con resultados de la investigación.

En respuesta a la escasez los productores deberán cambiar sus patrones de cultivo por lo que es importante saber cómo estos cambian, comparando los resultados con y sin mercado de agua (Tabla 17). La preferencia en el patrón de cultivos en caso de escasez es reasignar el agua a cultivos con mayor precio neto y/o a cultivos con bajo uso de agua. En todos los casos los cultivos de otoño-invierno: avena, cebada y trigo, son los que tienen mayores pérdidas en la superficie sembrada. Como se comentó anteriormente estos cultivos tienen un ingreso neto bajo y además tienen un alto consumo de agua comparado con otros cultivos como maíz y sorgo. Los mercados de agua permiten que menos agua se use en estos cultivos y se distribuya a otros con mayor precio neto o menor uso de agua.

En el primer escenario con una escasez del 25% se observa que los mercados de agua favorecen a los cultivos de hortalizas en particular el cultivo de frijol, excluyendo el cultivo de alfalfa los cultivos perennes tienen mayores pérdidas con mercado de agua esto se debe a que el esparrago y fresa tienen un alto consumo de agua. De acuerdo a Marques et al. (2005), a medida que el agua se hace más escasa, la probabilidad de que los productores elijan cultivos perennes disminuye, como en este caso los cultivos perennes de fresa y esparrago. Los cultivos de primavera-verano (maíz y sorgo) se ven beneficiados por el mercado de agua,

incluso el sorgo tendría una mayor superficie sembrada que el modelo base, 7.30% más que el escenario sin mercado.

En el segundo escenario con una escasez del 50% los resultados demuestran un comportamiento similar en las decisiones del patrón de cultivos, en general los cultivos de hortalizas de otoño-invierno se ven beneficiados por el mercado. Los cultivos de avena, trigo y cebada tendrían la mayor disminución de superficie sembrada, siendo el cultivo de trigo el que tendría la mayor pérdida de superficie con el 99.1% de su superficie sembrada con respecto al modelo base.

El cultivo de alfalfa como cultivo perenne y en primavera-verano el maíz serían los cultivos que más superficie ganarían con el mercado, también la zanahoria aumentaría su superficie un 2.91% más que el escenario sin mercado. En total el mercado de agua como estrategia frente a los impactos de la escasez, permite que se siembre una mayor superficie para ambos escenarios. Esto permite que los agricultores puedan sembrar una mayor superficie, sembrando un patrón de cultivos óptimo.

Tabla 17: Superficie sembrada (ha) con y sin escasez y mercado de agua.

Cultivo	Superficie sembrada modelo base (ha)	Escasez del 25%			Escasez del 50%		
		Superficie sembrada (ha)	Cambio con mercado (%)	Superficie sembrada (ha)	Cambio con mercado (%)		
Cebada	35,559	28,024	27,083	-3.36	11,496	12,149	5.68
Trigo	22,337	6,323	5,451	-13.79	1,798	198	-88.99
Avena	267	130	87	-33.08	60	58	-3.33
Brócoli	2,449	2,224	2,211	-0.58	1,460	1,453	-0.48
Lechuga	1,162	1,157	1,151	-0.52	1,037	1,056	1.83
Frijol	684	590	687	16.44	211	348	64.93
Cebolla	531	529	524	-0.95	504	503	-0.20
Zanahoria	641	630	637	1.11	584	601	2.91
Tomatillo	647	638	641	0.47	593	596	0.51
Esparrago	4,652	4,624	4,588	-0.78	4,459	4,414	-1.01
Alfalfa	4,311	4,053	4,180	3.13	3,370	3,575	6.08
Fresa	576	568	540	-4.93	485	472	-2.68
Maíz	59,593	57,129	57,640	0.89	49,608	50,736	2.27
Sorgo	20,965	21,534	23,106	7.30	20,350	19,993	-1.75
<i>Total</i>	<i>154,375</i>	<i>128,150</i>	<i>128,525</i>	<i>0.29</i>	<i>96,015</i>	<i>96,151</i>	<i>0.14</i>

Fuente: Elaboración propia con resultados de la investigación.

Se ha observado que cuando los agricultores del distrito de riego enfrentan escasez severa, éstos optan por sembrar un solo ciclo, ya sea otoño-invierno (cebada y trigo) o primavera-verano (maíz y sorgo). Con el modelo optimo bajo los escenarios de escasez, el cultivo de trigo no debería sembrarse por las razones mencionadas anteriormente, sin embargo, en la realidad esto no sucede. Los agricultores deciden sembrar este cultivo por los beneficios a la comercialización que reciben para este y otros granos por parte de la agencia de servicios a la comercialización y desarrollo de mercados agropecuarios (ASERCA), la cual mediante sus incentivos aseguran su comercialización y el pago de un precio mínimo a los agricultores. Considerando el caso particular del trigo, en los últimos años se ha desarrollado y fomentado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) el uso de una variedad de trigo mejorado, el cual necesita un menor número de riegos que el que se ha usado tradicionalmente.

Los resultados en los ingresos demuestran los efectos económicos de una escasez, y los efectos agregados de una escasez con mercados de agua. La Tabla 18, resume los resultados del escenario cuando existe una escasez del 25%, sin mercado de agua existiría una pérdida total del distrito de \$140,370.97 millones de pesos. Esta reducción en el ingreso neto es resultado del cambio en la superficie sembrada y el cambio en el patrón de cultivos debido a la escasez. Si se creara un mercado de agua se tendría un 0.77% más ingreso neto que el escenario sin mercado. El mercado de agua hace que el impacto económico derivado de una escasez sea menor para los módulos de riego y el distrito de riego. En este caso con un mercado de agua los módulos Acámbaro, Salvatierra, Huanímaro, Corralejo y La purísima tienen el mayor beneficio en su ingreso neto cuando existe la posibilidad del mercado, los primeros dos por la importación de agua que permite aumentar su superficie sembrada, y los últimos tres aumenta su ingreso neto por la venta de derechos de agua.

Tabla 18: Ingreso neto de los módulos del DR011 con y sin escasez del 25% y mercados de agua (millones de MXN \$)

Modulo	Modelo base sin escasez	Escasez del 25%		Cambio con mercado (%)
		Sin mercado	Con mercado	
M01	107.99	101.11	102.41	1.29
M02	345.31	317.89	323.05	1.62
M03	165.76	155.15	155.14	0.00
M04	352.59	329.25	332.27	0.92
M05	393.67	366.19	366.37	0.05
M06	392.4	377.58	377.37	-0.06
M07	263.23	255.96	256.48	0.20
M08	326.65	311.99	314.59	0.84
M09	64.17	60.93	62.57	2.69
M10	31.44	30.72	31.60	2.86
M11	91.89	87.95	91.34	3.85
<i>Total</i>	2,535.10	2,394.72	2,413.21	0.77

Fuente: Elaboración propia con resultados de la investigación.

Los resultados para el escenario de escasez del 50% se ven resumidos en la Tabla 7, en este caso el módulo Corralejo tiene el mayor beneficio en su ingreso por un mercado de agua, por la venta de sus derechos de agua, seguido del módulo Acámbaro el cual dedica su superficie a la producción de maíz. El ingreso total del distrito en caso de que existiera un mercado de agua se tendría beneficio de \$14.72 millones de pesos más, por lo que crear un mercado de agua en un escenario de escasez del 50% sería económicamente factible y se tendrían beneficios agregados para el distrito de riego.

Tabla 19: Ingreso neto de los módulos del DR con y sin escasez del 50% y mercados de agua (millones de MXN \$)

Modulo	Modelo base sin escasez	Escasez del 50%		Cambio con mercado (%)
		Sin mercado	Con mercado	
M01	107.99	82.19	87.16	5.70
M02	345.31	273.43	276.02	0.94
M03	165.76	136.04	135.92	-0.09
M04	352.59	285.59	287.09	0.52
M05	393.67	322.51	324.85	0.72
M06	392.4	353.86	355.04	0.33
M07	263.23	236.75	236.50	-0.10
M08	326.65	289.57	289.36	-0.07
M09	64.17	56.39	57.02	1.10
M10	31.44	28.93	30.96	6.58
M11	91.89	83.43	83.48	0.06
<i>Total</i>	<i>2,535.10</i>	<i>2,148.69</i>	<i>2,163.41</i>	<i>0.69</i>

Fuente: Elaboración propia con resultados de la investigación.

Como puede observarse en ambos escenarios los módulos obtienen un mayor ingreso neto en caso de existir un mercado de agua, a excepción de unos módulos que recibirían un menor ingreso pero que no es significativo, únicamente entre -0.06 y -0.1 por ciento menos, por lo que se puede concluir que este mercado es factible para todos los módulos en escenarios de escasez del 25% y 50%.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El valor económico del agua obtenido es más alto a la cuota pagada actualmente por los usuarios de riego tanto para el agua de riego de gravedad, así como la tarifa de extracción de agua de pozos, en todos los escenarios considerados. Se espera que, aumentando estas cuotas a la valoración del agua calculado, al largo plazo se fomente un uso eficiente. Con este aumento, se espera que los usuarios opten por sembrar cultivos con un mayor valor económico o menor consumo de agua, como se demuestra en los cambios del patrón de cultivos.

Como era de esperarse con los resultados de los precios sombra, en un mercado de agua, aquellos módulos en los que el agua tiene un bajo valor se volverán en vendedores de sus derechos de agua y aquellos módulos donde el agua tiene un mayor valor se volverán compradores de derechos de agua, dependiendo del nivel de escasez.

Con los resultados se comprueba que el funcionamiento de un mercado de agua eficiente en el distrito de riego 011, en el cual exista la libre transacción de derechos de agua con un precio de \$600/dam³ y \$1,230/dam³, con escenarios de escasez del 25% y 50% respectivamente, mejora la asignación del recurso. En ambos casos el mercado de agua permite que se siembre una mayor superficie y se obtenga un mayor ingreso neto agregado. Al crear una política de mercados de agua se estarían promoviendo un conjunto de acciones: que los usuarios paguen por un precio por el agua en cada nivel de disponibilidad, que el agua se use económicamente eficiente, al transaccionarse el agua en donde se genere un mayor ingreso. En conjunto se estaría haciendo a la agricultura del distrito más resiliente ante este fenómeno.

Para generar estas políticas deberá existir transparencia y comunicación entre las autoridades y usuarios, que el banco de agua funcione de manera flexible ante los diferentes escenarios de disponibilidad hídrica y que exista un sistema legal y administrativo consistente. Esto permitirá una buena regulación y gobernanza por parte de las autoridades.

Los resultados de esta investigación demuestran la utilidad de esta metodología con el uso de bases de datos limitadas, la cual como se demostró, podría replicarse tanto en otros distritos de riego que se encuentran dentro de la cuenca Lerma-Chapala, como en otras cuencas que están presentando una gran presión sobre el recurso hídrico dentro de México.

Esta investigación utilizó un método para estimar el valor económico del agua para riego en un Distrito de Riego, compuesto por once módulos. Se evaluó la factibilidad de crear un mercado de agua ante diferentes escenarios de escasez, usando conjuntos de datos mínimos. Se tuvieron varias limitaciones en el uso de datos, entre ellas, el no diferenciar tecnologías de riego, el uso de costos agregados y el no utilizar datos de otros insumos al no estar disponibles en bases de datos. Por otro lado, se han desarrollado nuevas formas de calibrar los modelos de programación matemática positiva, como el uso de función de costos exponenciales o utilizando máxima entropía, para lo que se requieren otros juegos de datos.

A pesar de las limitaciones descritas, los resultados brindan una buena señal sobre el valor económico del agua en cada módulo y en el distrito de riego en diferentes escenarios de escasez. Así mismo, nos permitió evaluar la posibilidad de crear un mercado de agua con las condiciones que presentaron los módulos en el año base, como mecanismo para enfrentar la escasez. Con estos resultados se podrán hacer recomendaciones de políticas de precios y manejo del agua dentro del distrito cuando existan problemas en la disponibilidad del recurso.

En futuras investigaciones para tener un mejor ajuste en el modelo de programación matemática, se deberán considerar una mayor mejor desagregación de costos, uso de elasticidades oferta y un mejor conjunto de datos que permita calcular funciones de producción de los cultivos. Para mejorar el análisis del mercado de agua, deberán considerarse costos de transacción, así como incluir en el modelo la posibilidad de compra de agua por parte del sector urbano e industrial lo que permitirá hacer un mejor análisis a nivel de cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams-Salazar, A., Moreno-Vazquez, J. L., & Lutz-Ley, A. N. (2012). Agricultura y manejo sustentable del acuífero de la Costa de Hermosillo Introducción. *Región y Sociedad*, (662), 155–179. <https://doi.org/10.22198/rys.2012.3.a411>
- Burkett, J. P. (2006). *Microeconomics : Optimization, Experiment, and Behavior*. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195189629.001.0001>
- Buyse, J., Van Huylenbroeck, G., & Lauwers, L. (2007). Normative, positive and econometric mathematical programming as tools for incorporation of multifunctionality in agricultural policy modelling. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 120(1), 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.035>
- CONAGUA. (2016). *Estadísticas del Agua en México*.
- CONAGUA. (2018a). Costos de Producción por módulo 2014-2017. Sistema Gerencial de Estadísticas Agrícolas e Hidrométricas, Jefatura Del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma. Celaya, México. Electronic File.
- CONAGUA. (2018b). *Informe entregas de Aguas Mensuales 2006-2017. Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma. Irapuato, México. CD-ROM*.
- CONAGUA. (2018c). Informes de Producción por tenencia 2014-2017. Jefatura del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma. Celaya, México. Electronic File.
- CONAGUA. (2018d). *Plan de Riegos 2014-2017. Jefatura del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma. Celaya, México. Electronic File*.
- Debertin, D. L. (2012). *Agricultural Production Economics*.
- DOF: 25/01/2012 (2012). Retrieved from http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5096849&fecha=30/06/2009
- DOF: 08/04/2014 Diario Oficial.(2014) *Primera Seccion. Martes 8 de abril de 2014*.
- DOF: Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos.
- DOF: 20/04/2015. (2015). *Diario Oficial de la Federacion*.
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: De la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(5), 77–93.
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Informe Sobre Temas Hídricos no. 38*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- 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.

- García-Salazar, J. A., Mora-Flores, J. S., Martínez-Damian, M. A., Valdivia-Alcalá, R., Godínez-Montoya, L., Fortis-hernández, M., & Hernández-Martínez, J. (2007). COMARCA LAGUNERA Economic Value of Water in Agriculture of the Laguna Region.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.
- Gibbons, D. C. (1986). *Economic Value of Water*. Washington, DC: Resources for the Future.
- Grafton, R. Q., Libecap, G., McGlennon, S., Landry, C., & O'Brien, B. (2011). An integrated assessment of water markets: A cross-country comparison. *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(2), 219–239. <https://doi.org/10.1093/reep/rer002>
- Graveline, N., Majone, B., van Duinen, R., & Ansink, E. (2014). Hydro-economic modeling of water scarcity under global change: An application to the Gállego river basin (Spain). *Regional Environmental Change*, 14(1), 119–132. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0472-0>
- Graveline, N., & Mérel, P. (2014). Intensive and extensive margin adjustments to water scarcity in France's Cereal Belt. *European Review of Agricultural Economics*, 41(5), 707–743. <https://doi.org/10.1093/erae/jbt039>
- Griffin, R. C. (2006). *Water Resource Economics, The analysis of scarcity, policies and projects*. London, England: MIT Press. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2479-2>
- Guzmán-Soria, E., Hernández Martínez, J., García-Salazar, J. A., Rebollar-Rebollar, S., de la Garza Carranza, M. T., & Hernández-Soto, D. (2009). Consumo de agua subterránea en Guanajuato, México, 749–761.
- Hall, N. (2001). Linear and quadratic models of the southern Murray-Darling basin. *Environment International*, 27(2–3), 219–223. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00090-3](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00090-3)
- Hanemann, W. (2005). The economic conception of water. In R. Peter P., L. M. Ramón, & C. Luis Martínez (Eds.), *Water Crisis: Myth or Reality?* Taylor & Francis.
- Harou, J., Pulido-Velázquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, J., Lund, J., & Howitt, R. E. (2009). Hydro-Economic Models: Concepts, Design, Applications, and Future Prospects. *Journal of Hydrology*, 375, 627–643. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>.This
- Hazell, P. B. R., & D. Norton, R. (1986). *Mathematical Programming for Economic Analysis In Agriculture*. (R. D. Norton, Ed.). New York, NY: Macmillan.
- Heckeley, T., & Britz, W. (2005). Models Based on Positive Mathematical Programming : State of the Art and Further Extensions Models Based on Positive Mathematical Programming : State of the Art and Further Extensions, 48–73.
- Heckeley, T., Britz, W., & Zhang, Y. (2012). Positive Mathematical Programming

- Approaches – Recent Developments in Literature and Applied Modelling. *Bio-Based and Applied Economics*, 1(1), 109–124. <https://doi.org/10.13128/BAE-10567>
- Hoogesteger, J., & Wester, P. (2017). Regulating groundwater use: The challenges of policy implementation in Guanajuato, Central Mexico. *Environmental Science and Policy*, 77(April), 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.002>
- Howitt, R. E. (1995a). A Calibration Method for Agricultural Economic Production Models. *Journal of Agricultural Economics*, 46(2), 147–159. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.1995.tb00762.x>
- Howitt, R. E. (1995b). Positive Mathematical Programming. *Oxford Journals*, 77(2), 366–422. <https://doi.org/10.1016/B978-813120376-7/50026-9>
- IEE, I. de E. del E. de G. (2011). *Diagnostico Climatologico y prospectiva sobre vulnerabilidad al cambio climatico en el Estado de Guanajuato*. (SEMARNAT, INE, CCAUG, & IEE, Eds.).
- IMTA-SEMARNAT. (2009). Estrategía general para el rescate ambiental y sustentabilidad de la Cuenca Lerma-Chapala, 250.
- Johansson, R. C., Tsur, Y., Roe, T. L., Doukkali, R., & Dinar, A. (2002). Pricing irrigation water: A review of theory and practice. *Water Policy*, 4(2), 173–199. [https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(02\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(02)00026-0)
- Kaiser, H. M., & Messer, K. D. (2011). *Mathematical Programming for Agricultural, Environmental and Resource Economics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Keller, A., Keller, J., & Seckler, D. (1996). Integrated Water Resource Systems: Theory and Policy Implications. *IWMI Research Report 003 / IIMI Research Report 003*, 15p. <https://doi.org/10.3910/2009.004>
- Ley De Aguas Nacionales*. (2016).
- Marques, G. F., Lund, J. R., & Howitt, R. E. (2005). Modeling irrigated agricultural production and water use decisions under water supply uncertainty. *Water Resources Research*, 41(8), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2005WR004048>
- Martinez-Pérez, R. (2013). *Evaluacion del Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma a 20 años de su transferencia*. Colegio de Postgraduados.
- McCarl, B. A. (2015). *McCarl GAMS User Guide*. GAMS Development Corporation (Vol. 13). <https://doi.org/10.1002/ejoc.201200111>
- Medellín-Azuara, J., Harou, J. J., & Howitt, R. E. (2010). Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. *Science of the Total Environment*, 408(23), 5639–5648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.013>
- Medellin-Azuara, J., Howitt, R. E., Waller-Barrera, C., Mendoza-Espinosa, L. G., Lund, J. R., & Taylor, J. E. (2009). A calibrated agricultural water demand model for three regions in northern baja california. *Agrociencia*, 43.

- Medellín-Azuara, J., Lund, J. R., & Howitt, R. E. (2007). Water Supply Analysis for Restoring the Colorado River Delta, Mexico. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(5), 462–471. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2007\)133:5\(462\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2007)133:5(462))
- Mérel, P., & Howitt, R. E. (2014). Theory and Application of Positive Mathematical Programming in Agriculture and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, 6(1), 451–470. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100913-012447>
- Mestre, J. E. (1997). La cuenca Lerma-Chapala, Mexico. *Attributions and Experiences in Water Management in Mexico*.
- OCDE. (2010). *Sustainable Management of Water Resources in Agriculture*. <https://doi.org/10.1787/9789264083578-en>
- ONU. (1992). Dublin-Rio Principles. In *International Conference on Water and the Environment (ICWE)*.
- Pérez, H. M. B., Ramirez, J. C. C., & Andrade, M. Á. G. (2005). El banco de agua: Una propuesta para salvar el lago de Chapala. *Gestion y Política Pública*, 14(2), 289–309.
- Petsakos, A., & Rozakis, S. (2009). Critical Review and State-of-the-Art of PMP Models : An Application to Greek Arable Agriculture. In *Research Topics in Agricultural and Applied Economics* (Vol. 1, pp. 36–63).
- Ponce, R., Blanco, M., & Giupponi, C. (2014). Climate Change, Water Scarcity in Agriculture and the Country-Level Economic Impacts. A Multimarket Analysis, (November 2014).
- Saenz, M. E., Palacios-Vélez, E., Chávez-Morales, J., Zazueta- Ranahan, F., Tijerina-Chávez, L., & Casas-Díaz, E. (2003). Evaluación económica del proceso de transferencia del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, México. *Terra Latinoamericana*, 21(4), 523–531.
- SAGARPA-FAO. (2012). México: El sector agropecuario ante el desafío del cambio climático.
- Salcedo Baca, I. (2005). En busca de la organización después de la transferencia de los distritos de riego en México. *Revista de Geografía Agrícola*, 115–149.
- Scheierling, S. M., Loomis, J. B., & Young, R. A. (2006). Irrigation water demand: A meta-analysis of price elasticities. *Water Resources Research*, 42(1). <https://doi.org/10.1029/2005WR004009>
- Scheierling, S. M., Treguer, D. O., Booker, J. F., & Decker, E. (2014). *How to Assess Agricultural Water Productivity ? Looking for Water in the Agricultural Productivity and Efficiency Literature* (Water Global Practice Group and Agriculture Global Practice Group No. 6982). *Policy Research Working Papers*.
- Scott, C. A., & Shah, T. (2004). Groundwater overdraft reduction through agricultural energy policy: Insights from India and Mexico. *International Journal of Water Resources Development*, 20(2), 149–164.

<https://doi.org/10.1080/0790062042000206156>

- Shiva, V. (2004). *Las guerras del agua. Privatización, contaminación y lucro*.
<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Speed, R., Yuanyuan, L., Le Quesne, T., Pegram, G., & Zhiwei, Z. (2013). *Basin Water Allocation Planning: Principles, Procedures and Approaches for Basin Allocation Planning*.
- Strange, T., & Bayley, A. (2013). *Desarrollo sostenible, Integrar la economía, la sociedad y el medio ambiente*. Escenciales OCDE. <https://doi.org/10.1787/9789264175617-es>
- Torres, M. de O., Maneta, M., Howitt, R. E., Vosti, S. A., Wallender, W. W., Bassoi, L. H., & Rodrigues, L. N. (2012). Economic impacts of regional water scarcity in the São Francisco River Basin, Brazil: an application of a linked hydro-economic model. *Environment and Development Economics*, 17(02), 227–248.
<https://doi.org/10.1017/S1355770X11000362>
- Varian, H. R. (2010). *Microeconomía Intermedia: Un enfoque actual* (5a ed.).
- Young, R. A. (1996). *Measuring economic benefits for water investments and policies*. World Bank technical paper (Vol. 1). <https://doi.org/10.1596/0-8213-3745-9>
- Young, R. A. (2005). Nonmarket Economic Valuation for Irrigation Water Policy Decisions: Some Methodological Issues. *Journal of Contemporary Water Research & Educaion*, (131), 21–25.
- Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). *Determining the Economic Value of Water* (Second Edi). Taylor & Francis.
- Zetina-Espinosa, A. M., Mora-Flores, J. S., Martinez-Damian, Miguel A. Cruz-jiménez, J., & Téllez-delgado, R. (2013). Valor económico del agua en el distrito de riego 044, jilotepec, estado de méxico. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 139–156.

Recursos electrónicos

- CONAGUA, 2018a. Plan de Riegos 2014-2017. Jefatura del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma. Celaya, México. Archivo Electronico.
- CONAGUA, 2018b. Costos de Producción por módulo 2014-2017. Sistema Gerencial de Estadísticas Agrícolas e Hidrométricas, Jefatura Del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma. Celaya, México. Archivo Electronico.
- CONAGUA, 2018c. Informes de Producción por tenencia 2014-2017. Jefatura del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma. Celaya, México. Archivo Electronico.
- CONAGUA, 2018d. Informe entregas de Aguas Mensuales 2006-2017. Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma. Irapuato, México. CD-ROM.
- CFE, 2018. Consulta de Tarifas, <http://app.cfe.mx>
- INIFAP, 2018. Estaciones Climatológicas, <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/estaciones.aspx>

CONAGUA-IMTA, 2018. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego.
<http://www.edistritos.com/DR/>

CONAGUA, 2016. Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).
<http://app.conagua.gob.mx/repda.aspx>

ANEXOS

Anexo I: Información utilizada en el modelo de programación matemática positiva.

Cuadro I-1: Precio medio rural medio por modulo del DR011 2014-2015 a 2016-2017 (MXN \$)

Modulo/ Cultivo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Cebada	4033.33	4316.67	4700.00	4533.33	4247.33	3941.68	4343.33	4566.67	4150.00	4375.00	4233.33
Trigo	3566.66	3700.00	3716.67	3733.33	3715.00	3600.00	3833.33	3513.88	3716.67	3866.67	3733.33
Avena	1316.09	-	-	-	1706.65	1350.00	-	1900.00	1283.33	-	-
Brócoli	-	-	4183.33	-	4524.33	4600.00	2900.00	-	6016.67	-	-
Lechuga	-	-	-	-	2873.90	3500.00	2050.00	-	-	-	-
Frijol	-	16000.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cebolla	-	-	-	-	3451.67	4600.00	2110.33	-	-	-	-
Zanahoria	-	1053.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tomatillo	-	3950.00	-	-	-	-	-	4500.00	-	-	3750.00
Esparrago	-	-	-	-	31023.31	32993.01	35000.00	31066.67	-	-	29000.00
Alfalfa	1940.61	1900.00	2166.67	2123.33	1532.63	2480.54	2370.00	-	3816.50	-	1550
Fresa	-	-	-	-	1566.67	-	8100.00	9633.33	-	-	12200.00
Maíz	3436.67	3250.00	3689.33	3616.67	3383.33	3400.00	3265.67	3342.19	-	3533.33	-
Sorgo	3386.67	3466.67	-	-	-	-	3450.00	3450.00	-	3500.00	-
Maíz Sec.	-	3483.33	3418.33	3343.33	3352.20	3566.67	3265.67	3342.19	3236.67	3533.33	3410.00
Sorgos Sec.	-	-	-	3433.33	3424.56	3433.33	3400.00	3450.00	3193.33	3466.67	3375.00

Fuente: Elaboración propia con información de Jefatura del Distrito de Riego 2014-2018.

Cuadro I-2: Tierra cultivada del patrón de cultivos seleccionado por módulo del DR011 año base 2016-2017 (ha)

Cultivo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Cebada	95.66	1536.96	3458.95	9205.79	6925.83	3444.10	2035.52	6906.76	611	115.97	1222.28
Trigo	87.44	1812.21	130.49	573.69	4956.99	3645.95	1745.99	5126.09	1400	717.71	2160.4
Avena	114.24	-	-	-	27.82	24.59	-	36.89	65.00	-	-
Brócoli	-	-	1384.62	-	571.10	256.80	191.75	-	45.00	-	-
Lechuga	-	-	-	-	891.37	127.09	143.25	-	-	-	-
Frijol	-	684.43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cebolla	-	-	-	-	235.00	183.94	112.40	-	-	-	-
Zanahoria	-	641.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tomatillo	-	509.34	-	-	-	-	-	53.00	15.00	-	70.00
Esparrago	-	-	-	-	484.50	2553.16	979.99	553.94	-	-	80.0
Alfalfa	621.59	1378.13	288.74	682.95	305.57	474.52	299.85	-	200.00	-	60
Fresa	-	-	-	-	78.65	-	400.11	67.33	-	-	30.0
Maíz	5333.50	5377.25	1211.38	347.00	936.50	377.98	115.27	312.94	-	866.76	-
Sorgo	925.88	224.19	-	-	-	-	40.50	226.27	-	131.07	-
Maíz	-	4862.20	4741.69	8408.81	8155.95	3768.36	1930.36	6663.98	3696.05	625.29	1861.6
Sorgos	-	-	-	1492.47	5646.48	3732.48	2161.44	2757.98	1948.48	178.39	1499.26

Fuente: Elaboración propia con información de Jefatura del Distrito de Riego 2018.

Cuadro I-3: Volumen de agua enviado a cada cultivo por modulo año agrícola base 2016-2017 (dam³)

Modulo/ Cultivo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Cebada	1327.53	17291.24	29171.44	80971.82	48599.69	33314.59	20266.6	51670.56	3727.10	2332.88	12294.39
Trigo	703.97	23652.9	1395.81	6773.83	47018.51	37686.35	21099.31	47244.93	14518	9408.14	25654.88
Avena	985.81	-	-	-	133.73	230.52	-	423.31	377	-	-
Brócoli	-	-	14774.37	-	4081.43	2105.27	1671.02	-	468	-	-
Lechuga	-	-	-	-	5462.64	1402.83	1463.84	-	-	-	-
Frijol	-	10431.83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cebolla	-	-	-	-	1351.25	1142.94	1333.55	-	-	-	-
Zanahoria	-	2399.61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tomatillo	-	7433.23	-	-	-	-	-	237.41	-	-	9944.7
Esparrago	-	-	-	-	2592.67	10392.45	9711.71	6168.94	-	-	478.08
Alfalfa	4820.41	15750.31	3572.36	8290.93	1670.85	2800.42	3346.06	-	1946	-	556.66
Fresa	-	-	-	-	508.21	-	16191.53	821.58	-	-	692.97
Maíz	30934.3	47039.7	7349.38	3000.65	5675.26	881.54	920.66	586.94	-	2443.01	-
Sorgo	6589.76	1321.11	-	-	-	-	-	464.94	-	607.61	-
Maíz Sec.	-	23350.09	30922.53	38475.8	26631.51	16521.29	8684.1	21278.23	12936.1	2705.77	6870.04
Sorgos Sec.	-	-	-	7988.76	19340.27	14318.02	9261.85	7885.8	5650.59	440.62	5171.08

Fuente: Elaboración propia con información de Jefatura del Distrito de Riego 2018.

Cuadro I-4: Rendimiento medio por cultivo y módulo de los años agrícolas 2014-2017 (t)

Modulo/ Cultivo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Cebada	6.25	6.40	5.27	6.40	6.67	6.41	5.77	6.33	5.50	4.75	5.87
Trigo	6.50	7.03	6.36	6.20	6.85	8.42	5.35	6.36	5.83	6.23	6.83
Avena	11.00	-	-	-	11.0	12.5	-	8.4	18.3	-	-
Brócoli	-	-	14.07	-	14.23	14.00	27.64	-	12.0	-	-
Lechuga	-	-	-	-	20.17	28.33	37.05	-	-	-	-
Frijol	-	2.53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cebolla	-	-	-	-	30.95	41.67	39.57	-	39.57	-	-
Zanahoria	-	43.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tomatillo	-	27.93	-	-	-	-	-	19.0	-	-	19.85
Esparrago	-	-	-	-	3.05	4.83	5.69	5.61	-	-	4.95
Alfalfa	22.41	24.13	27.08	32.17	24.52	28.39	31.96	-	20.0	-	25.0
Fresa	-	-	-	-	25.0	-	32.07	34.33	-	-	30.67
Maíz	10.92	12.73	12.56	14.75	9.97	12.00	10.27	11.00	-	11.00	-
Sorgo	8.49	9.00	-	-	-	-	-	9.00	-	8.17	-
Maíz Sec.	-	12.03	11.62	12.87	9.69	11.17	12.21	11.51	10.67	9.33	10.50
Sorgos Sec.	-	-	-	9.83	9.69	7.29	7.26	11.51	8.00	8.17	8.00

Fuente: Elaboración propia con información de Jefatura del Distrito de Riego 2014-2018.

Cuadro I-5: Costos de producción medios de los años agrícolas 2014-2017 (MXN \$ /ha)

Modulo/ Cultivo	M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11
Cebada	21397.5	17072.50	19250.00	18671.67	16284.00	19174.00	16088.33	17721.67	18992.00	18200.00	16500.00
Trigo	18381.67	16835.00	20166.67	17813.33	19062.00	21173.33	16823.00	18408.33	18934.50	18378.75	15350.00
Avena	14195.00	-	-	-	13065.00	13630.00	-	10189.33	9735.00	-	-
Brócoli	-	-	42583.33	-	54673.67	47600.00	38366.00	-	46021.5	-	-
Lechuga	-	-	-	-	27997.00	32700.00	36474.75	-	-	-	-
Frijol	-	19575.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cebolla	-	-	-	-	42467.67	42500.00	37761.33	-	3776.33	-	-
Zanahoria	-	23852.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tomatillo	-	27540.00	-	-	-	-	-	19228.33	-	-	21770.00
Esparrago	-	-	-	-	60582.00	96202.50	80915.00	132056.67	-	-	92022.50
Alfalfa	26429.75	19176.00	22000.00	22000.00	24376.67	18276.67	30859.75	-	33358.50	-	20000.00
Fresa	-	-	-	-	150000.00	-	161770.00	141855.00	-	-	125825.00
Maíz	21873.33	24412.50	23666.67	20643.33	19350.00	18933.33	21544.67	18250.00	141855.00	20606.67	-
Sorgo	18116.67	18785.00	-	-	-	-	-	19000.00	18250.00	17450.00	-
Maíz Sec.	-	19122.00	21666.67	20159.00	21246.00	18933.33	21879.33	20253.33	25937.33	20506.67	19121.50
Sorgos Sec.	-	-	-	20892.00	17886.00	18450.00	18333.00	18173.33	18084.00	17370.00	19355.00

Fuente: Elaboración propia con información de Jefatura del Distrito de Riego 2014-2018