



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA EN CONDICIONES DE ESCASEZ EN EL DISTRITO DE RIEGO 011, ALTO RIO LERMA, GUANAJUATO

JESSICA DE LA CRUZ FLORES

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Valoración económica del agua en condiciones de escasez en el Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma, Guanajuato** realizada por la estudiante: **Jessica de la Cruz Flores** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A)


DR. ADOLFO A. EXEBIO GARCÍA

ASESOR (A)


M.C. MARIA EUGENIA DELGADILLO PIÑÓN

ASESOR (A)


DR. JOSÉ SATURNINO MORA FLORES

ASESOR (A)


DR. JUAN ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, octubre de 2022

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA EN CONDICIONES DE ESCASEZ EN EL DISTRITO DE RIEGO 011, ALTO RIO LERMA, GUANAJUATO

Jessica de la Cruz Flores, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

En el año 2011 la sequía ocasionó que el 47% del territorio nacional entrara en situación de emergencia por falta de agua, generando pérdidas agrícolas en Guanajuato por 1551.2 millones de pesos, afectando a 123,000 ha y 36,019 productores (CENAPRED, 2012). Este fenómeno se repitió en 2021 con una cobertura del 87% del territorio. En condiciones de sequía debe privilegiarse la planeación del riego con un enfoque de optimización económica, incorporando un valor monetario que refleje el valor de la escasez del agua en función de su disponibilidad y costo de oportunidad. El objetivo de este trabajo fue estimar el valor económico del agua en el Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma, Guanajuato, para el año agrícola 2019-2020, en condiciones de sequía, mediante la asignación óptima del recurso al patrón de cultivos, así como también los escenarios del 25, 50 y 75% de probabilidades de disponibilidad del agua. Se formuló un modelo de Programación Lineal (MPL) (Base) para maximizar el beneficio neto con un patrón de 30 cultivos agrupados en tres ciclos agrícolas, restricciones de agua mensuales y anuales, tierra, mercado y demanda de agua de cultivos. Los resultados indican que con el MPLBase el beneficio neto mejoró en 102.72 millones de pesos y el valor económico del agua en condición de sequía se incrementa 14 veces más ($2.52 \text{ \$/m}^3$) que la tarifa de riego 2019-2020 ($0.19 \text{ \$/m}^3$), valor cada vez menor con mayor disponibilidad de agua. Esto implica que los usuarios deben reconocer el verdadero valor del agua y su inelasticidad en sus costos de producción e iniciar un estudio Técnico- Económico para su implementación.

Palabras clave: disponibilidad de agua, precios sombra, programación lineal, valor económico del agua.

ECONOMIC VALUATION OF WATER IN CONDITIONS OF SCARCITY IN THE IRRIGATION DISTRICT 011 ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO

**Jessica de la Cruz Flores, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2022**

ABSTRACT

In 2011, drought caused 47% of the national territory to enter an emergency situation due to lack of water, generating agricultural losses in Guanajuato of 1551.2 million pesos, affecting 123,000 ha and 36,019 producers (CENAPRED, 2012). This phenomenon was repeated in 2021 with a coverage of 87% of the territory. In drought conditions, irrigation planning should be favored with an economic optimization approach, incorporating a monetary value that reflects the value of water scarcity based on its availability and opportunity cost. The objective of this work was to estimate the economic value of water in the Irrigation District 011 Alto Rio Lerma, Guanajuato, for the agricultural year 2019-2020, under drought conditions, through the optimal allocation of the resource to the crop pattern, as well as the scenarios of 25, 50 and 75% probabilities of water availability. A Linear Programming Model (LPM) (Base) was formulated to maximize the net benefit with a pattern of 30 crops grouped in three agricultural cycles, monthly and annual water restrictions, land, market and crop water demand. The results indicate that with the LPMBase the net benefit improved by 102.72 million pesos and the economic value of water in drought condition increases 14 times more ($2.52 \text{ \$/m}^3$) than the 2019-2020 irrigation rate ($0.19 \text{ \$/m}^3$), decreasing value with increasing water availability. This implies that users must recognize the true value of water and its inelasticity in their production costs and initiate a technical-economic study for its implementation.

Key words: water availability, shadow prices, linear programming, economic value of water.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento para realización de mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillos y el postgrado de Hidrociencias, por darme la oportunidad de desarrollarme no solo profesional sino también personalmente.

Al Dr. Adolfo Exebio García, por su paciencia y dedicación durante la realización de mi proyecto, por haberme guiado en el proceso, por su apoyo y su valioso tiempo para compartir sus conocimientos y experiencias.

A la M.C. María Eugenia Delgadillo Piñón, valiosas sugerencias y aportes para la revisión de la presente investigación, así como su incondicional ayuda y paciencia.

Al Dr. José Saturnino Mora Flores, por ser parte de mi consejo particular y por las sugerencias para mejorar este estudio.

Al Dr. Juan Enrique Rubiños Panta en conjunto con toda la coordinación del postgrado de Hidrociencias, por todo el apoyo brindado en la realización de mis estudios de maestría.

Al Ing. Alfredo Marmolejo Cervantes, Coordinador de Operación Hidráulica de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito De Riego 011, por la invaluable información estadística proporcionada para la elaboración del presente estudio.

Al Ing. José Alberto Masías Segura, Jefe de Operación del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato por la valiosa información brindada para este trabajo.

Al M.C. Domingo Martínez Luna por compartir sus conocimientos para la elaboración de este trabajo, así como su apoyo durante las visitas de campo.

A la M.C. Itzel Yazmín Vera Herrera, por su apoyo incondicional y gratos momentos durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

DEDICATORIA

A mi sobrina, Nicole Ariadna,
porque la tarea, así como la tesis,
un día, se acaban.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
LISTAS DE CUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xiii
ABREVIATURAS	xv
I. INTRODUCCIÓN	16
1.1. Planteamiento del problema.....	18
II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	20
2.1. Objetivos.....	20
2.1.1. Objetivo general.....	20
2.1.2. Objetivos específicos.....	20
2.2. Hipótesis.....	20
2.2.1. Hipótesis General	20
2.2.2. Hipótesis específicas	21
III REVISIÓN DE LITERATURA	22
3.1. Situación del agua en México.....	22
3.1.1. Regiones Hidrológico Administrativas.....	22
3.1.2. Distribución del agua en el territorio.....	22
3.1.3. Disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas.....	23
3.1.4. Usos del agua en México	23
3.1.5. Grado de presión de los recursos hídricos	24
3.1.6. Instrumentos para gestión del agua en México	25
3.2. Marco teórico en la valoración del agua	26
3.2.1. Origen y problemas en la valoración del agua	26
3.2.2. Valor, precio y costo del agua	28
3.2.3. Papel de la valoración económica en la gestión del agua	29
3.2.4. El valor económico versus otros conceptos de valor	30
3.3. Métodos de valoración del agua.....	30

4.3.2.	Metodología para la obtención de la demanda y disponibilidad en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma	86
4.3.3.	Modelo Base y escenarios contruidos	90
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL	92
5.1.	Patrón de cultivos y estadísticas de producción	92
5.2.	Establecimiento de modelo de programación lineal	95
5.2.1.	Elección del patrón de cultivos del MPL	95
5.2.1.	Cálculo de los coeficientes de la función objetivo	96
5.3.	Estimación de la demanda y disponibilidad de agua.....	100
5.3.1.	Demanda.....	100
5.3.2.	Disponibilidad.....	106
5.4.	Modelo base (MPL Base) vs Situación Actual de Sequía (Año agrícola 2019-2020).....	124
5.4.1.	Beneficio neto y área total regada	124
5.4.2.	Patrón de cultivos	125
5.4.3.	Volumen utilizado.....	134
5.5.	Escenarios contruidos a partir del MPL-Base.....	135
5.5.1.	Escenario con una probabilidad del 25% de ocurrencia (MPL01)	136
5.5.2.	Escenario con una probabilidad del 50% de ocurrencia (MPL02)	139
5.5.3.	Escenario con una probabilidad del 75% de ocurrencia (MPL03)	142
5.6.	Precio sombra del agua o valor económico del agua de riego	145
5.6.1.	Precio sombra vs cuotas del Distrito de Riego	147
5.7.	Estrategias de planeación de riego en función de la demanda y disponibilidad del agua.....	147
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	149
6.1.	Conclusiones.....	149
6.2.	Recomendaciones	150
VII	LITERATURA CITADA	151
ANEXOS		158
Anexo A		158
Anexo B		170

LISTAS DE CUADROS

Cuadro 3.1. Valores críticos d para la prueba Kolmogórov-Smirnov de bondad de ajuste.	58
Cuadro 4.1. Superficie dominada, regable y número de usuarios por módulo.	59
Cuadro 4.2. Características principales de las fuentes de abastecimiento del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma.	64
Cuadro 4.3. Longitud de la Red menor del DR011 a cargo de los Módulos de Riego (en kilómetros).	66
Cuadro 4.4. Tipo de revestimiento y longitud total de Red Distribución del Distrito (Red Mayor y Menor, en kilómetros).	66
Cuadro 4.5. Estructuras sobre la Red de canales a Cargo de la SRL y de los Módulos de Riego.	67
Cuadro 4.6. Longitud de la Red de caminos a Cargo de la SRL y de los Módulos de Riego (kilómetros).	68
Cuadro 4.7. Longitud de la Red de Drenaje del Distrito a Cargo de la SRL y de los Módulos de Riego (en kilómetros).	69
Cuadro 4.8. Estructuras de la Red de drenaje a Cargo de la SRL y de los Módulos de Riego.	70
Cuadro 4.9. Cárcamos de bombeo oficiales y particulares en los Módulos del Distrito de Riego 011.	71
Cuadro 4.10. Pozos oficiales y particulares en los Módulos del Distrito de Riego 011.	72
Cuadro 4.11. Evolución de la Cuota de Riego en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.	73
Cuadro 4.12. Componentes operativos de la administración y manejo del DR011.	75
Cuadro 4.13. Información requerida para elaboración del proyecto de investigación.	81
Cuadro 5.1. Superficie Sembrada (ha) y porcentaje de participación de los principales cultivos del Distrito de Riego 011.	93
Cuadro 5.2. Variables de decisión del modelo de programación lineal.	96
Cuadro 5.3. Precios netos de las actividades de cultivo del modelo.	97

Cuadro 5.4. Superficie (ha) máximas y mínimas a sembrar el siguiente ciclo agrícola.....	100
Cuadro 5.5. Coeficientes mensuales de requerimiento neto de riego en el DR011. Ciclo agrícola 2019-2020.....	102
Cuadro 5.6. Coeficientes mensuales de requerimiento bruto de riego en el DR011. Ciclo agrícola 2019-2020.....	104
Cuadro 5.7. Probabilidades complementarias de los volúmenes anuales.....	107
Cuadro 5.8. Parámetros estadísticos necesarios para cálculo de las funciones de distribución.	109
Cuadro 5.9. Probabilidad de ocurrencia (%) de los volúmenes anuales, obtenidos mediante Distribución empírica, Normal, Log Normal, Gamma y Pearson III.....	110
Cuadro 5.10. Volúmenes anuales esperados en hm^3 , estimados con una probabilidad definida, a partir de las funciones de distribución Normal, Log Normal, Gamma y Pearson III.....	112
Cuadro 5.11. Método error cuadrado medio.	115
Cuadro 5.12. Tabla de frecuencias y selección de intervalos para la prueba de Bondad Chi-Cuadrada.	117
Cuadro 5.13. Prueba Bondad Chi-Cuadrada.	119
Cuadro 5.14. Prueba Bondad Kolmogórov-Smirnov.....	121
Cuadro 5.15. Resumen Selección de la función de distribución.	123
Cuadro 5.17. Volumen esperado para las diferentes probabilidades de Excedencia seleccionados.	124
Cuadro 5.18. Comparación de las variables del modelo Real 2019-2020 contra el MPL Base.....	125
Cuadro 5.19. Superficie sembrada en el MPL Base vs año agrícola Real 2019-2020.	126
Cuadro 5.20. Comparación del patrón real 2019-2020 contra el patrón óptimo de cultivos del modelo base (MPL Base), para el ciclo 2019-2020.	133
Cuadro 5.21. Relación de volúmenes mensuales derivados y estimados. Año agrícola 2019-202 (Millares m^3 , dam^3).....	134

Cuadro 5.22. Volumen, Beneficio Neto y superficie regada en los escenarios establecidos.	136
Cuadro 5.23. Patrón de cultivos y superficie sembrada (ha) del MPL Base y del escenario al 25% probabilidad (MPL01).	138
Cuadro 5.24. Patrón de cultivos y superficie sembrada (ha) del MPL Base y del escenario al 50% probabilidad (MPL02).	141
Cuadro 5.25. Patrón de cultivos y superficie sembrada (ha) del MPL Base y del escenario al 75% probabilidad (MPL03).	144
Cuadro 5.26. Precio sombra, volumen disponible, beneficio neto y superficie regada en los escenarios establecidos.....	145
Cuadro A.1. Patrón histórico de cultivos en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.	158
Cuadro A.2. Matriz de coeficientes técnicos del MPL para el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato.	160
Cuadro A.3. Modelo de programación lineal base (MPLBase) para el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato.	162
Cuadro A.4. Modelo de programación lineal a una probabilidad del 25% de ocurrencia (MPL01).	164
Cuadro A.5. Modelo de programación lineal a una probabilidad del 50% de ocurrencia (MPL02).	166
Cuadro A.6. Modelo de programación lineal a una probabilidad del 75% de ocurrencia (MPL03).	168
Cuadro A.7. Serie histórica de aportaciones mensuales del Río Lerma (hm ³).....	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Métodos de valoración económica del agua.	31
Figura 4.1. Localización geográfica del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma	60
Figura 4.2. Participación del Gobierno Federal, SRL y los Usuarios en la Operación del Distrito de Riego 011 "Alto Río Lerma, Guanajuato.	76
Figura 4.3. Organización de las Asociaciones Civiles de Usuarios (Módulos de Riego) del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.	79
Figura 4.4. Organización de las Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL) del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.....	80
Figura 5.1. Relación histórica de la superficie sembrada en el DR011 Alto Río Lerma.	94
Figura 5.2. Relación histórica de volúmenes de agua superficial empleados en el DR011..	106
Figura 5.3. Método Gráfico para la selección de Función de distribución de Probabilidad.	114
Figura 5.4. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de maíz, trigo y sorgo.	127
Figura 5.5. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de maíz, trigo y sorgo.	128
Figura 5.6. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de frijol, garbanzo y cacahuate.....	129
Figura 5.7. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de nopal, avena forrajera, tomate, ajo y fresa.	130
Figura 5.8. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de zanahoria, brócoli y camote.....	131
Figura 5.9. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de cebolla, cilantro y lechuga.	132
Figura 5.10. Diagrama de dispersión entre volúmenes observados y volúmenes estimados.	135
Figura 5.11. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 25% probabilidad (MPL01), para los cultivos de sorgo SC.....	137

Figura 5.12. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 25% probabilidad (MPL01), para los cultivos de fresa y lechuga.	137
Figura 5.13. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 50% probabilidad (MPL02), para los cultivos de maíz, sorgo, trigo y alfalfa.	139
Figura 5.14. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 50% probabilidad (MPL02), para los cultivos de frijol O-I, avena forrajera, zanahoria O-I, brócoli O-I y calabacita.	140
Figura 5.15. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 75% probabilidad (MPL03), para los cultivos de Sorgo P-V, Sorgo SC, Trigo, Cebada y Alfalfa.....	142
Figura 5.16. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 75% probabilidad (MPL03), para los cultivos de frijol y avena forrajera.....	143
Figura 5.17. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 75% probabilidad (MPL03), para los cultivos de Zanahoria O-I, Brócoli O-I y calabacita.	143

ABREVIATURAS

CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastre
Conagua	Comisión Nacional del Agua
cm	Centímetro
dam ³	Decámetros cúbicos (1 000 m ³)
DOF	Diario Oficial de la Federación
DR	Distrito de Riego
DR011	Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma
ha	Hectárea (s)
hm ³	Hectómetro cúbico (1 000 000 m ³)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
LAN	Ley de Aguas Nacionales
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
Mil m ³	Millar de metros cúbicos, dam ³ , 1 000 m ³
Millón de m ³	Millón de metros cúbicos, hm ³ , 1 000 000 m ³
MPL	Modelo de programación lineal
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
O-I	Ciclo agrícola otoño-invierno
\$	Pesos mexicanos
PMR	Precio medio rural
P-V	Ciclo agrícola primavera-verano
PL	Programación lineal
RHA	Regiones hidrológico-administrativa
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
SINA	Sistema Nacional de Información del Agua (Según LAN: Sistema Nacional de información sobre cantidad, calidad, usos y conservación del agua).
SRL	Sociedad de Responsabilidad limitada
ton	Toneladas
km	Kilómetros

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para la agricultura, y su disponibilidad para el riego depende de dos factores: la precipitación y de su apropiado almacenamiento en presas y acuíferos; no obstante, en los últimos años, la falta de lluvia ha provocado periodos de sequía más frecuentes que han afectado fuertemente la producción agrícola.

En el 2011, la sequía ocasionó que el 47% del territorio entrara en situación de emergencia por la ausencia de agua, generando pérdidas agrícolas valuadas entre los 16 mil y 150 mil millones de pesos (Arreguín *et al*, 2016), tan solo en Guanajuato se estimó que afectó a 36,019 productores, 123,902 hectáreas de cultivos, y pérdidas en la producción estimadas en 1,551.2 millones de pesos (CENAPRED, 2012); diez años después, en el 2021, un periodo severo de sequía afectó el 87% del territorio mexicano el cual, sumado con las demandas del sector agrícola y el aumento de requerimiento para abastecimiento público, a causa del confinamiento por el virus SARS-CoV2 (COVID-19), amenazó la disponibilidad del agua en las principales presas de almacenamiento para riego, pues para junio del 2021 conservaban tan sólo 27,249 hm³ (SIAP, 2021). Estos eventos han demostrado que la disponibilidad de agua es extremadamente vulnerable, por lo que resulta imprescindible eficientizar su manejo, control y aplicación (Mejía *et al.*, 2002).

En México, uno de los principales organismos encargados del planificar el uso y distribución del agua a nivel parcela son los Distritos de riego, no obstante, pese a los esfuerzos de convertirlos en organizaciones eficientes operativa y económicamente, los distritos continúan enfrentándose a problemas de excesivas pérdidas en las redes de conducción, dificultades en el control de la distribución y aplicación del agua y, a altos costos de administración, operación y mantenimiento que sobrepasan las tarifas de riego (Mejía *et al.*, 2002).

Por lo tanto, el incremento de la eficiencia en el manejo del agua en los distritos de riego requiere, no sólo de un mejoramiento en la administración de la infraestructura hidráulica, sino también en las técnicas del manejo de los recursos hidráulicos en condiciones de sequía, con un enfoque en la planeación del riego y de la optimización económica.

De acuerdo con Ortega (2013) un problema común en la planeación del riego, es su incumplimiento, puesto que muchos de los usuarios, con fin de buscar mayor beneficio económico, siembran mayor superficie a la estipulada en los planes de riego, y una vez realizados los pagos establecidos por el Distrito, se sienten con la libertad de disponer del agua que consideren necesaria para sus actividades, ocasionando la extracción de un volumen mayor al autorizado y una disminución en la disponibilidad del agua.

Lo anterior combinado con que, los usuarios de los Distritos de riego se encuentran exentos del pago del derecho de uso, explotación o aprovechamiento de aguas nacionales (LFD, 2022), ha provocado, no sólo que los usuarios no reconozcan el verdadero valor del agua, sino que las tarifas oficiales del agua están muy por debajo de su valor real, causando que los ingresos por gestión y servicios del agua no compensen el mantenimiento de la red y los altos costos del riego (Altamirano *et al.*, 2017).

Esta falta de percepción de los usuarios con respecto al riego y al valor del agua, reside en que, en la producción agrícola el valor del agua no es fijo, sino relativo, puesto que, si un agricultor dispone de más agua de la que puede usar, un volumen adicional no tiene ningún valor para él; sin embargo, cuando el agua escasea la misma cantidad de agua puede ser muy valiosa, más aún si para asegurar su cosecha requiere una unidad adicional (Long, 1991).

En este sentido, para incorporar un valor monetario capaz de reflejar el valor de escasez del agua, podemos determinar el valor económico en virtud de su disponibilidad y costo de oportunidad, es decir, al beneficio al que se renuncia por no contar con una unidad adicional de un recurso (Alvarado, 2009). La mejor manera para establecer el costo de oportunidad del agua en un distrito de riego, es determinando su valor marginal o el precio sombra del agua, el cual, se define como la máxima cantidad de dinero que un usuario estaría dispuesto a pagar por tener disponible un volumen adicional para la producción agrícola (Palacios & Exebio, 2012).

Una herramienta útil para medir los beneficios de los productores en función de los cambios en la disponibilidad de agua, son los modelos de programación matemática, particularmente la programación Lineal (Berbel *et al.*, 2011 y Young & Loomis., 2014). El

objetivo de la programación lineal es maximizar los beneficios económicos sujeta un conjunto de restricciones de recursos, producción, insumos, tecnología disponible, requerimiento de agua de los cultivos, etc. y es capaz de adaptarse a las condiciones de sequía (Jabeen *et al.*, 2006 & Chowdhury, 2013).

Un modelo de programación lineal nos permite, a partir de la variación en la disponibilidad de agua, encontrar una solución matemática óptima para el recurso disponible, permaneciendo todas las demás restricciones constantes (Chowdhury, 2013). El precio sombra obtenido mediante el modelo será la contribución del agua a la función objetivo, atribuido a que una unidad adicional alterará la solución óptima y, representará el valor de una unidad adicional de agua para el productor, pues, esta unidad adicional generará a su vez una producción agrícola adicional, cuyo valor depende del tipo de cultivo y del precio específico de una región (Jabeen *et al.*, 2006).

El valorar el agua haciendo uso del precio sombra nos permitirá realizar una mejor asignación del agua, en este caso, destinándola a cultivos que producen el mayor beneficio económico, cuando la disponibilidad de agua es limitada (Shah *et al.*, 2009), por lo que una vez optimizado las superficies y los cultivos a establecer, podemos recurrir a la planeación del riego para equilibrar la oferta del agua superficial con la demanda de los usuarios, de manera de alcanzar la sustentabilidad y rentabilidad de la práctica de la agricultura de riego.

1.1. Planteamiento del problema

El Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma (DR011) se ubica dentro de la cuenca Lerma-Chapala, la cual es una de las más competidas y explotadas en el país y, debido a los periodos recurrentes de estiaje, así como la disminución en calidad y cantidad del agua, han vuelto más hostiles los conflictos y elevado la tensión social entre los usuarios del sector agrícola, urbano e industrial dentro de la cuenca por el recurso agua (Caire, 2005).

Actualmente, el Consejo de Cuenca Lerma-Chapala determina y asigna el volumen de extracción permitido para el Distrito, a partir de la disponibilidad en el almacenamiento en la Presa Solís y laguna de Yuriria (Castro *et al.*, 2017). Sin embargo, las constantes restricciones del Consejo de Cuenca en la asignación del agua, aunado

a los periodos de sequía, han causado reducciones importantes en los volúmenes asignados al Distrito de Riego 011 para cada ciclo agrícola, provocando que la superficie con derecho a riego sea mayor a la disponibilidad de agua y, por ende, que los productores sólo puedan regar una parte de su superficie (Cruz *et al.* 2016).

Bajo este escenario, una forma de manejar la operación del DR011 es, por una parte, con la ejecución de un plan de riegos que optimice el volumen de agua disponible sobre todo en temporadas de sequía y por otra, incorporando un valor monetario capaz de reflejar el valor de escasez del agua. Dado que la planeación del riego está en función, en mayor parte, de la disponibilidad del agua, podemos establecer el valor económico del agua en virtud de su precio sombra, que será, la máxima cantidad de dinero que un usuario estaría dispuesto a pagar por tener disponible un volumen adicional para la producción agrícola (Palacios & Exebio, 2012).

Una alternativa para estimar el precio sombra del agua será con el uso de programación matemática, especialmente la programación lineal (Berbel *et al.*, 2011), la cual opera con el objetivo de maximizar la rentabilidad económica sujeta a limitaciones de recursos, producción y políticas (Jabeen *et al.*, 2006) y, es capaz de determinar la superficie regable y el patrón de cultivos que maximizan los ingresos netos de los productores de un distrito (Ortega *et al.* 2009).

Por lo tanto es posible determinar, con fines de planeación agrícola, el potencial del valor económico del agua de riego utilizada en Distrito de Riego 011, lo cual nos permitirá que los usuarios hagan un uso eficiente del recurso, asignando el agua cultivos más rentables y viables en caso de escasez. Esta investigación será de utilidad para los encargados de la administración, estableciendo un punto de referencia del para las cuotas cobradas por la conservación, operación y distribución, permitiendo mejorar el servicio que se presta en la unidad, así como los mantenimientos del mismo, garantizando la sostenibilidad del recurso hídrico y la autosuficiencia del Distrito de Riego.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

- 1) Determinar el valor económico del agua en condiciones de sequía en el Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma, Guanajuato, mediante la asignación óptima del recurso agua a un patrón de cultivos representativo y tradicional.

2.1.2. Objetivos específicos

- 1) Analizar el patrón de cultivos histórico, las estadísticas de producción y volúmenes mensuales utilizados en el Distrito de riego 011 Alto Rio Lerma.
- 2) Estimar la demanda de agua a nivel mensual y anual del patrón de cultivos seleccionado mediante el cálculo de los coeficientes de requerimiento de riego (CURR).
- 3) Estimar la disponibilidad de agua con base a las aportaciones históricas al vaso de almacenamiento, utilizando la distribución estadística Log Normal.
- 4) Calibrar el modelo de programación lineal para maximización de beneficio neto, así como la optimización del patrón de cultivos y volúmenes mensuales de agua.
- 5) Estimar el valor económico del agua en tres escenarios de disponibilidad: escasez, normal y húmedo, con una probabilidad de ocurrencia de aportaciones a la fuente de abastecimiento del 25, 50 y 75%.

2.2. Hipótesis

2.2.1. Hipótesis General

- 1) Es posible estimar el valor económico del agua en condiciones de escasez, optimizando el uso de los recursos tierra, agua, capital, patrón de cultivos y beneficio neto de la producción en el Distrito de riego 011 Alto Río Lerma.

2.2.2. Hipótesis específicas

- 1) La planeación del riego en el Distrito de Riego 011 en época de escasez, asigna el agua a cultivos con baja rentabilidad y alta demanda de agua.
- 2) El registro histórico de volúmenes de aportaciones al vaso, registro histórico de estadísticas de producción, eficiencias mensuales de uso del agua, volúmenes mensuales servidos por cultivo, infraestructura hidroagrícola de riego, esquemas de planeación y organización, ciclos agrícolas y demás variables de operación, si existen, se pueden recabarse y analizarse, permitiendo implementar y analizar modelos de planeación del riego.
- 3) El valor económico del agua puede considerarse como un punto de referencia para estimar hasta cuánto podrían pagar los usuarios por unidad de volumen de agua en época de escasez.

III REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Situación del agua en México

3.1.1. Regiones Hidrológico Administrativas

Con la finalidad de administrar el agua superficial, se ha dividido el territorio mexicano en 757 cuencas hidrológicas, las cuales se coordinan en 37 regiones hidrológicas; y para el manejo de aguas subterráneas se establecieron 653 acuíferos.

Las 37 regiones hidrológicas se ordenan en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA): I-Península de Baja California, II-Noroeste, III-Pacífico Norte, IV-Balsas, V-Pacífico Sur, VI-Río Bravo, VII-Cuencas Centrales del Norte, VIII-Lerma - Santiago - Pacífico, IX-Golfo Norte, X-Golfo Centro, XI-Frontera Sur, XII-Península de Yucatán y XII-Aguas del Valle de México.

Las RHA están conformadas por una o varias regiones hidrológicas las cuales respetan la división política municipal con la finalidad de facilitar los procesos administrativos y la recopilación de información socioeconómica, pero consideran las cuencas hidrológicas como base para la gestión de los recursos hídricos.

3.1.2. Distribución del agua en el territorio

En México llueve una media de 1,449,471 millones de metros cúbicos al año, de los cuales el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por ríos y arroyos, y únicamente el 6.4% se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. De tal forma que, tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con países vecinos, el país anualmente cuenta con 451,585 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable que es factible para explotar anualmente (Conagua, 2018).

Pese a lo anterior, existen varias perspectivas a considerar respecto a la disponibilidad de agua renovable, una de ellas son las grandes variaciones en la precipitación, mientras que la mayor parte ocurre en verano, el resto del año es seco; otro problema es la distribución espacial del agua, mientras que en las zonas noroeste y centro hay

precipitaciones anuales menores a los 500 milímetros. en el sureste hay precipitaciones promedio que superan los 2,000 milímetros por año. Entonces, la baja disponibilidad en el norte, centro y noroeste del país requiere un uso eficiente, conservación y reúso del recurso hídrico, por el contrario, en el sureste hace falta habilitación del drenaje, control de avenidas en épocas de lluvia y manejo contra inundaciones.

3.1.3. Disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas

Un indicador básico para la conservación de los recursos hídricos es la *disponibilidad*, ya que esta determina si a la cuenca o el acuífero se le puede extraer un volumen adicional sin comprometer el ecosistema.

El último Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales, publicado en 2020, establece que 104 de las 757 cuencas hidrológicas están en situación de déficit, es decir, en el 14% el caudal concesionado o asignado es mayor que el agua renovable, siendo las más afectadas las regiones hidrológico-administrativas IV-Balsas, VI-Río Bravo, II-Noroeste y VII-Lerma Santiago Pacífico.

De acuerdo Conagua (2021) existen 157 acuíferos sobreexplotados (24% del total de acuíferos), 139 de los acuíferos sobreexplotados se concentran cinco regiones hidrológico-administrativas: VI-Río Bravo, VIII-Lerma-Santiago Pacífico, VII-Cuencas Centrales del Norte, I-Península de Baja California y II-Noroeste. Un problema importante derivado de la sobreexplotación es la intrusión salina, la cual ya se observa en 18 acuíferos; mientras que otros 32 presentan problemas de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres.

3.1.4. Usos del agua en México

El volumen de agua concesionado o asignado a los usuarios se clasifican en usos no consuntivos y usos consuntivos; mientras que las actividades en el primero no modifican el volumen (hidroeléctricas y conservación ecología), en el uso consuntivo existe una diferencia entre el volumen extraído y descargado (agrícola, abastecimiento público, industria y termoeléctricas).

De acuerdo con el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), el 54.3% del agua para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 35.1% restante se extrae de fuentes subterráneas (acuíferos).

En México, el sector agrícola utiliza cerca del 75.7% del agua disponible, el abastecimiento público explota el 14.7%, la industria autoabastecida usa el 4.9% y finalmente las centrales termoeléctricas (excluyendo hidroelectricidad) emplea el 4.6%. De estos caudales, los sectores, agrícola y público urbano, tienen pérdidas de agua de cerca de la mitad del agua extraída, lo que representa una gran área de oportunidad para reducir las extracciones (Conagua, 2020).

Las regiones hidrológico- administrativas con mayor volumen concesionado son VIII Lerma- Santiago-Pacífico, IV Balsas, III Pacífico Norte y VI Bravo; resaltando los estados de Sinaloa y Sonora por sus grandes extensiones agrícolas bajo riego como las entidades federativas con mayor volumen concesionado.

3.1.5. Grado de presión de los recursos hídricos

Un indicador del grado de presión que ejerce sobre el recurso hídrico de un país, cuenca o región, es el porcentaje de agua empleada para usos consuntivos con respecto al agua renovable. El grado de presión puede ser muy alto, alto, medio, bajo y sin estrés, cuando es mayor a 40% se considera "Alto" y menor al 10% es "Sin estrés". A nivel nacional el valor es de 19.5%, lo cual se considera bajo, sin embargo, las partes centro, norte y noroeste del país tienen fuerte presión sobre este recurso.

En México la región hidrológico-administrativa con "muy alto" grado de presión es la XIII- Aguas del Valle de México (141%); con un grado de presión "alto" se encuentran las RHA I-Península de Baja California (81.3%); II-Noroeste (84.7%); III-Pacífico Norte (40.4%); IV-Balsas (50.2%); VI-Río Bravo (75.4%); VII-Cuencas Centrales del Norte (47.7%), y VIII-Lerma Santiago Pacífico (45.2%); con un grado de presión "medio" la RHA IX-Golfo Norte (21.1%). El resto del país se considera con "bajo" grado de presión como es el caso de la RHA XII-Península de Yucatán, o sin presión como las RHA V-Pacífico Sur; X-Golfo Centro, y XI-Frontera Sur.

3.1.6. Instrumentos para gestión del agua en México

El agua es un asunto de interés social y seguridad nacional, por lo cual existen distintas leyes emanadas de la Constitución, y otras disposiciones generales que reglamentan la administración de los recursos hidráulicos. A continuación, se enlistan los instrumentos que regulan el uso y aprovechamiento del sector hídrico en México.

3.1.6.1. Ley de aguas Nacionales

En diciembre de 1992 se expide en México la Ley Nacional de Aguas Nacionales (LAN), y dos años después, en enero de 1994 se publica en el Diario Oficial de la Federación el su Reglamento. Ambos ordenamientos surgen como necesidad de regular la explotación, uso y aprovechamiento de agua superficial y subterránea, así como su distribución y control para garantizar su preservación en cantidad y calidad.

3.1.6.2. Comisión Nacional del Agua

La Ley Nacional de Aguas Nacionales, establece como autoridad administrativa, normativa, técnica y consultiva encargada de la gestión del agua, a la Comisión Nacional del Agua (Conagua), quien desempeña sus funciones a través de 13 organismos de cuenca y tiene como misión preservar los recursos hídricos nacionales y sus bienes inherentes para su uso sustentable (Conagua, 2020).

Para llevar a cabo sus operaciones, Conagua trabaja en conjunto con diversos organismos federales, estatales y municipales, presentando varias iniciativas gubernamentales para abordar la problemática del agua en México como La Agenda del Agua 2030, el Programa Nacional Hídrico y distintos Programas Hídricos Regionales, así como Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de cumplimiento obligatorio y Normas Mexicanas (NMX) de aplicación voluntaria.

La Comisión Nacional del Agua, se encuentra a cargo del Sistema de Información del Agua (SINA), el cual integra y publica información estadística y geográfica del sector hídrico en México y funge como un instrumento para la gestión del agua que reúne datos con carácter oficial, proveniente de diversas áreas de Conagua y otras instituciones.

3.1.6.3. Registro Pública de Derechos de Agua (REPDA)

A partir de la expedición de la Ley de Aguas Nacionales (LAN) se acuerda que todo volumen concesionado o asignado a los usuarios debe inscribirse en Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) con el fin de generar un padrón de usuarios a los cuales se les ha concesionado o designado un volumen. Hasta el 2020, se contaba con 560,201 títulos de concesión o asignación de aguas nacionales inscritos que corresponden a un volumen concesionado de 89,547.80 hm³ (Conagua, 2021).

3.1.6.4. Ordenamientos

Los ordenamientos son instrumentos jurídicos para preservar las aguas nacionales que pueden ser zonas de veda, reglamentos, declaratorias de reserva, rescate u otros mecanismos para mantener el control de alumbramientos (extracciones) aguas subterráneas. Las zonas de veda se prohíbe la extracción de agua por la falta de disponibilidad, mientras que en las zonas reglamentadas se restringe la explotación de agua hasta alcanzar un volumen disponible. En las zonas de reserva se busca implantar un programa de restauración o conservación donde se establecen limitaciones en el uso del agua.

Hasta 2017 se mantenían vigentes los siguientes ordenamientos subterráneos: 147 zonas de veda, 333 acuíferos con suspensión de libre alumbramiento, cuatro reglamentos de acuíferos, tres decretos de zonas reglamentadas y tres declaratorias de reserva para aguas subterráneas (Conagua, 2018). En cuanto a los ordenamientos de aguas superficiales, hasta el 2018 existían 282 cuencas en veda, 32 zonas reglamentadas y 374 declaratorias de reserva (Conagua, 2021).

3.2. Marco teórico en la valoración del agua

3.2.1. Origen y problemas en la valoración del agua

El agua es la base principal del desarrollo social y económico de un país, sin embargo, durante muchos años ha sido considerada como un recurso natural libre cuyo suministro es ilimitado y gratuito (Piedra *et al.*, 2017), generando una falsa idea de abundancia en la que no hay motivación para conservarla o aprovecharla de mejor manera, acelerando

su paulatina degradación, asignándola de una manera deficiente y propiciando escasez con un uso irracional.

Pese a lo anterior, un problema usual al tratar de valorar el agua, es que al ser percibido como un bien público o comunitario, no cuenta con un mercado, principalmente porque no existen derechos de propiedad (Aguiar & Álvarez, 2002), y es esta ausencia de mercado y precio lo que lleva a la sobreexplotación y al uso inadecuado; sin embargo, el constante aumento de escasez en cantidad y calidad, ha motivado que idea del agua como un bien de libre acceso sea obsoleta y justifica la importancia de otorgarle un carácter de bien económico (Fonseca, 1998). Bajo este contexto, se define a la valoración económica como todo intento de asignar un valor monetario estimado a los bienes y servicios ambientales, de acuerdo al bienestar que su uso brinda a la sociedad (Ministerio del Ambiente, 2015).

Es importante recalcar que todo intento de establecer un valor económico a un recurso natural es polémico, ya que implica establecer un valor cualitativo a un recurso que es un derecho humano, corriendo el riesgo de fomentar la noción del agua como una mercancía (Piedra *et al.*, 2017); y si bien, algunos de los múltiples valores del agua pueden expresarse monetariamente, no significa que sea igual al precio de mercado (Vega, 2021); es decir, la valoración económica no estipula una oferta comercial, sino un indicador de la importancia del agua en relación con el bienestar de la sociedad (Piedra *et al.*, 2017); razón por la cual, establecer un valor económico al recurso agua ayuda a acercarnos a su verdadero valor y no solo a un valor de mercado (Castiblanco, 2003).

El poder valorar económicamente un bien o servicio ambiental nos permitirá comparar los beneficios y costos que implica el uso, mejora o daño de un activo ambiental (Ázqueta, 1994), estableciendo de esta manera instrumentos para su uso racional, así como un manejo y gestión sustentable (Castiblanco, 2003); es decir, el valorar el agua como bien económico nos ayuda a asignar el agua de una manera eficiente, generar conciencia de su escasez y que debe ser utilizado de manera racional, así como recuperar el costo de prestación del servicio (Ramírez *et al.*, 2019).

Es importante resaltar, que el estimar el valor económico del agua siempre resultará en un valor inexacto debido a que depende de muchas variables y porque debe considerarse no sólo sus valores de uso y no uso, sino también características sociales y económicas de los usuarios, su disponibilidad, calidad, así como las pérdidas económicas que generaría su escasez.

3.2.2. Valor, precio y costo del agua

Con frecuencia se confunden los términos valor, costo y precio del agua de manera que suelen usarse como sinónimos, por el contrario, son muy distintos entre sí.

3.2.2.1. Valor económico

El “valor económico” de un bien o servicio que no puede ser comercializado como es el caso del agua, se define como la cantidad que un usuario objetivo y plenamente informado estaría dispuesto a pagar por él, o, del otro lado de la transacción, el importe que una persona aspira a recibir en compensación por ceder este recurso (ONU, 2012). Dicho valor estará en función de su uso y su situación de escasez, a mayor escasez, tendrá mayor valor y viceversa, sin embargo, este monto usualmente no coincide con los costos de suministro o las tarifas cobradas el servicio de abastecimiento.

La valoración económica nos permite establecer políticas para un uso racional de los recursos, además de calcular indemnizaciones por los daños que se inflijan al medio ambiente (Castiblanco, 2003).

3.2.2.2. Precio del agua

El precio del agua es una transacción financiera o fiscal entre el proveedor y el usuario, la cual generalmente está controlada y subsidiada por el gobierno (Winpenny *et al.*, 2013). Es común confundir el precio y valor, no obstante, el término valor hará referencia al monto máximo que un usuario estaría dispuesto a pagar por un bien o servicio, mientras que el precio será aquel que se rige por la demanda y oferta de un mercado.

Debido a que en México no existe un mercado del agua donde pueda darse una interacción de mercado, no se puede hablar de “precio” en sentido estricto, por lo tanto, el termino más adecuado es “tarifa del agua” (Cardenete *et al.*, 2006).

3.2.2.3. Costo del Agua

El agua tiene un costo económico de suministro, extracción y tratamiento que varían en función de su entorno, uso y finalidad. La justificación económica del suministrar a un usuario está en la relación entre el beneficio y costo de entregar agua al consumidor (Winpenny *et al.*, 2013).

Los costos de disponibilidad del agua en un territorio dependen de varios factores, siendo los más determinantes la cercanía y ubicación de la fuente de abastecimiento y en seguida, la calidad disponible, el primero definirá los costos de captación, transporte y entrega, mientras que el segundo, dará pauta para establecer los costos de convertirla en agua potable (Trujillo & Perales, 2020).

3.2.3. Papel de la valoración económica en la gestión del agua

Los problemas de gestión del agua involucran evaluar políticas de elección, es decir, cómo combinar el agua con otros recursos para obtener el mayor beneficio, cuánto de cada insumo utilizar en la producción, qué productos y cuánto de cada uno de ellos producir con los elementos disponibles; así como asignar el empleo de cada recurso y el consumo de bienes y servicios a lo largo del presente y el futuro.

Proporcionar una estimación del valor del agua nos ayudará, por citar algunos ejemplos, a definir inversiones para capturar, almacenar, entregar y tratar suministros de agua; fijar un precio de recuperación de financiamientos en sistemas de abastecimiento de agua o facilitar la distribución dinámica de volúmenes de agua entre los diferentes sectores que compiten por su uso a lo largo del tiempo (Young & Loomis, 2014).

De esta manera, el reconocer explícitamente los valores económicos del agua de diversos bienes hídricos nos permite generar estrategias y metodologías que den pauta a su protección, conservación y gestión integral, además de crear herramientas que ayuden a dirigir, diseñar y aplicar planes de manejo (Castiblanco, 2003). Es importante

usar criterios económicos en la evaluación y toma de decisiones políticas de asignación y gestión de agua, no obstante, la eficiencia económica no debe ser el único criterio en la toma de decisión de recursos hídricos (Young & Loomis, 2014).

3.2.4. El valor económico versus otros conceptos de valor

El *enfoque económico* no es la única manera de asignar valores a los recursos naturales y ambientales, sin embargo, una metodología de valoración económica a diferencia de otros conceptos de valor, nos permite asignar medidas monetarias a las pérdidas en el bienestar que genera un cambio en la oferta de agua o en su contaminación; por lo tanto, al utilizar el dinero como medida de valor, nos es posible la comparación entre los costos monetarios de inversión y los valores de usos alternativos en un proyecto (Pineda, 2019).

El uso de la eficiencia económica como criterio para el desarrollo, asignación y administración de la oferta y calidad del agua, surge de dos razones fundamentales: 1) Bajo condiciones de escasez y competencia entre los usuarios, maximizar los beneficios netos de una cantidad de agua es útil para solucionar conflictos de agua pública y 2) La eficiencia económica proporciona el medio para evaluar los costos de oportunidad de elegir propuestas alternativas (Pineda, 2019).

3.3. Métodos de valoración del agua

Los métodos de valoración económica se pueden clasificar en distintas formas, Young (1996) propone segmentarlos acorde al uso del bien estudiado: bienes intermedios, bienes de consumo privado y bienes públicos; por su parte De Alba & Reyes (1998), así como Azqueta (1994) propone catalogarlos acorde al tipo de mercado que se utiliza para su cálculo: mercado real (el recurso tiene un precio en los mercados locales), mercado sustituto (se basa en precios indirectos) y mercado simulado (se basa en mercados hipotéticos); mientras que Young & Loomis (2014), lo dividen bajo dos criterios: a) Si se trata de un bien y servicio público o privados y, b) Técnica utilizada para su cuantificación (inductiva o deductiva).

Basándonos en Young & Loomis (2014), encontramos diecisiete métodos para valorar el agua, de los cuales 11 son clasificados como inductivos y 6 como deductivos, cuyas

fuentes de datos varían acorde a la aplicación, ya sea agrícola, industrial o de generación de energía, los cuales se describen en la Figura 3.1.

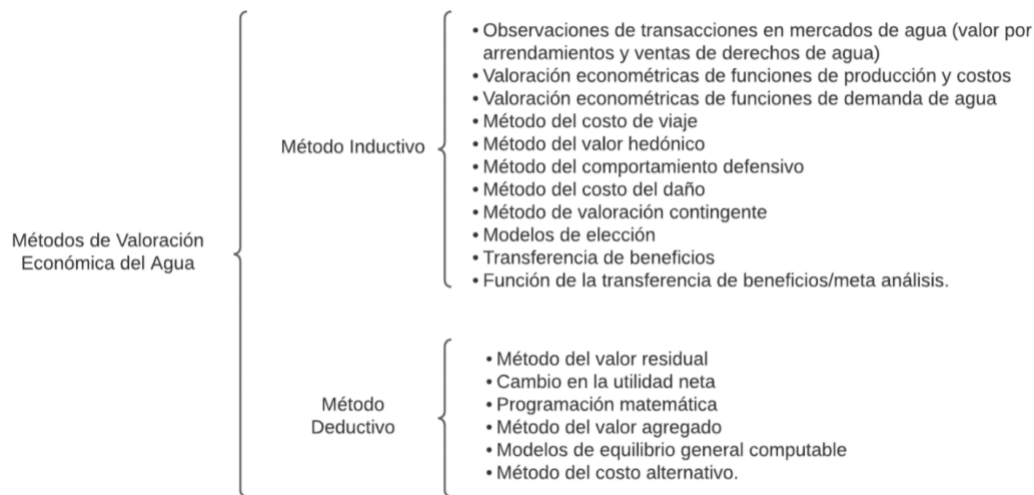


Figura 3.1. Métodos de valoración económica del agua.

3.3.1. Métodos para la valoración de agua de riego

Existen distintos enfoques que pueden utilizarse para valorar el agua en su uso agrícola, pero todos parten de que el agua de riego se emplea como bien intermedio o factor de producción, por lo tanto, el valor y la demanda que hagan los productores de ella, deriva de la contribución del agua de riego en la obtención de la producción agrícola.

Young y Loomis (2014), establecen siete métodos para estimar el valor del agua de riego, cuatro de ellos son técnicas inductivas, es decir, que infieren generalidades de observaciones individuales, en esta categoría encontramos procedimientos econométricos o estadísticos, como son: 1) Valoración econométrica de funciones de producción y costos (método basado en funciones de producción); 2) Valoración econométrica de funciones de demanda de agua (Modelización econométrica); 3) Método del valor hedónico (precios hedónicos) y 4) Método de valoración contingente. Así mismo, reconocen tres métodos deductivos, es decir, parten de premisas generales hasta conclusiones particulares, lo cuales son frecuentes en modelos que postulan la maximización de la utilidad o de la ganancia, en esta clasificación se encuentran: 1) El

método del valor residual (y sus variantes); 2) Programación matemática (modelación de la producción mediante programación matemática), y 3) Método del costo alternativo.

Elegir el método a utilizar estará en función de la disponibilidad de información y de quién realiza la valoración, ya que, si bien la mayoría de los métodos pueden estimar el valor del agua, algunos requieren de datos técnicos y económicos que en ocasiones no están disponibles, o exigen de complejos procesos de modelización económica (Garrido *et al.*, 2007).

En este proyecto de investigación el método elegido para estimar el valor económico del agua, se basará en el uso de programación matemática, especialmente la programación lineal (PL). El método fue elegido en primera instancia por su simplicidad y que la información técnica y económica es menos compleja que otros métodos y tal como lo describen López & Berbel (2012), es un modelo fácil de aplicar en diferentes zonas geográficas; es el único método que nos permitirá estimar el valor marginal del agua de riego, mediante la combinación de distintos cultivos que maximiza la suma de las ganancias de la producción agrícola, es decir, estableciendo un patrón de cultivos que maximiza el beneficio neto de los productores, sujeto a un conjunto de restricciones (Berbel *et al.*, 2011).

3.4. Programación lineal

3.4.1. Conceptos de la programación lineal

La programación lineal es una técnica de programación matemática o una técnica de optimización, que busca encontrar, entre innumerables combinaciones matemáticas, aquella solución o alternativa que logre el uso más eficiente de los recursos conforme a un objetivo (De la Fuente, 1997).

Se entiende como técnica de optimización, que se trata de un método que intenta maximizar o minimizar un objetivo establecido, para seleccionar la mejor alternativa entre un gran número de posibilidades, respetando condicionantes que limiten la libertad de elección, como restricciones de disponibilidad de recursos, condiciones de mercado, especificaciones técnicas, etc. (Alvarado, 2011).

El término “programación”, no tiene relación con la programación para computadoras ni con el desarrollo de un software, más bien se usa como sinónimo de planeación (Alvarado, 2009); mientras que la palabra “lineal” hace referencia a que es un modelo formulado mediante un sistema de ecuaciones lineales, donde todos los términos utilizados son de primer grado, es decir, no son elevados a ninguna potencia (Palacios, 2017).

Entonces podemos definir a la programación lineal como un método matemático que tiene como objetivo maximizar o minimizar una función lineal llamada función objetivo, sujeta a un conjunto de igualdades o desigualdades lineales no negativas llamadas restricciones. (Puente & Gavilánez, 2018).

3.4.2. Componentes de la programación lineal

Un modelo de programación lineal está formado por cuatro elementos: 1) Función Objetivo; 2) Variables de decisión; 3) Restricciones y 4) Parámetros.

3.4.2.1. Función Objetivo

Es la expresión matemática que representa lo que se busca optimizar, es decir, define lo que se va a maximizar o minimizar en un modelo de programación lineal. (Palacios & Exebio, 2017). Usualmente está representada por ingresos, utilidades, costos, desperdicios, o cualquier otra medida que se desea maximizar o minimizar, de acuerdo a los objetivos de la asociación, organización o sistema y se encuentran en función de las variables de decisión (Cabrera, 2017).

3.4.2.2. Variables de decisión

Las variables de decisión son las incógnitas con las que se construyen las expresiones matemáticas de la función objetivo y las restricciones (Cabrera, 2017). Representan aquellas actividades o procesos de interés del planeador, como cultivos, productos, insumos, animales, rutas, labores culturales, bienes, planes de manejo, personal o tratamientos (Coronel de Renolfi & Araujo, 2004), cuyos valores al resolver el problema quedan expresadas como las cantidades que optimizan el modelo.

Para que tenga sentido el uso de la programación lineal deberá incluirse el mayor número de variables de decisión, ya que, de lo contrario, la solución del problema sería trivial (Coronel de Renolfi & Araujo, 2004).

3.4.2.3. Restricciones del modelo

Expresan matemáticamente la escasez de recursos o las condiciones que debe cumplir la solución, por lo tanto, limitaran la cantidad a utilizar de las variables de decisión y por consiguiente el valor de la función objetivo. Un modelo de programación lineal puede tener más de una restricción y cada una está en función de las variables de decisión (Cabrera, 2017).

Según Alvarado (2011), hay tres tipos básicos de restricciones: de máximo ($\geq$), de mínimo ($\leq$) y de igualdad ($=$) que se pueden clasificar en razón a su objetivo:

- Restricciones de recursos o entradas: insumos, capital, mano de obra e instalaciones.
- Restricciones externas: asignaciones requeridas de superficie de terreno y los límites de crédito asignados a los productos.
- Restricciones subjetivas: estas restricciones se las impone el propio operador. Los límites pueden ser difíciles de definir, pero frecuentemente son significativos en el proceso de planificación. A menudo son restricciones personales o del negocio del planeador. Como ejemplo tenemos:
 - Limitaciones sobre la cantidad un nivel de crédito dispuesto a utilizar.
 - Restricciones por el riesgo de ingresos altamente variables como pueden ser la cría de ovejas o de ganado mayor.
 - Restricciones de mínimos respecto a que el operador considere mantener un nivel de animales, superficie, o cultivos.
- Restricciones de no negatividad para que todas las variables sean positivas.

Si al momento de estructurar el modelo de programación lineal, se cuenta con un recurso ilimitado, no es necesario acotar la solución, ya que es trivial planificar su uso racional (Coronel de Renolfi & Araujo, 2004).

3.4.2.4. Parámetros

Son todos los valores (datos) numéricos constantes y conocidos que se emplean para construir la función objetivo y las restricciones (Cabrera, 2017).

Estos pueden ser: 1) valores del lado derecho de las restricciones; 2) coeficientes tecnológicos en las restricciones (coeficientes de las variables de decisión en las restricciones) y 3) coeficientes de las variables de decisión en la función objetivo (contribución de cada variable al valor de la función objetivo).

3.4.3. Supuestos básicos de la programación lineal

Los modelos de programación lineal tienen una serie de limitaciones técnicas en su solución, por consiguiente, su formulación está basada en una serie de supuestos, fundamentales:

3.4.3.1. Linealidad.

La relación entre la cantidad de recursos y la producción es constante independientemente de la dimensión que tome actividad (Coronel de Renolfi & Araujo, 2004), por ejemplo, si fuera necesario 6,000 metros cúbicos para regar una hectárea, entonces, dos hectáreas de la misma clase requerirían 12,000 mil metros cúbicos.

3.4.3.2. Proporcionalidad.

La contribución de cada variable de decisión al valor de la función objetivo o a las restricciones, es proporcional al valor de la variable misma, es decir, si el valor de una variable de decisión se reduce a la mitad, también se reduce a la mitad el valor de la función objetivo y viceversa (Cabrera, 2017).

3.4.3.3. Adivididad.

La cantidad total de recursos usados en todo el proceso, será igual a la suma de los recursos usados en cada uno. El supuesto se basa en que todas las actividades son independientes y se pueden sumar en forma algebraica, es decir las actividades no son complementarias (Coronel de Renolfi, 2004).

3.4.3.4. Certidumbre.

Todos los parámetros del modelo deben ser deterministas, en otras palabras, deben ser conocidos (Cabrera, 2017). Se deben conocer exactamente los coeficientes de las variables en la función objetivo (costos, utilidades, etc.), los consumos unitarios de recurso (coeficientes de las variables en las restricciones) y la disponibilidad de cada uno de los recursos (lado derecho de las restricciones) y no debe existir incertidumbre respecto a su valor. (Guerrero, 2009).

3.4.3.5. Divisibilidad.

En todo problema de programación lineal se supone que las variables de decisión pueden tomar cualquier valor real, sea entero o fraccionario, es decir, estos se pueden subdividir en fracciones. Cabe recalcar que el no cumplir este supuesto, no causa la pérdida de linealidad del modelo (Cabrera, 2017).

3.4.4. Ventajas y desventajas de la programación lineal

De acuerdo con Alvarado (2009), Coronel de Renolfi & Araujo (2004) y Hernández (2017), entre las principales ventajas de la programación lineal están:

- Una gran variedad de problemas, en diversos campos, pueden ser representados, o al menos aproximados, como modelos de programación lineal.
- La toma de decisiones es más objetiva, ya que el problema es formulado matemáticamente.
- Permite comprar numerosas alternativas de soluciones y analizar sus consecuencias, en poco tiempo.
- Brinda un plan óptimo detallado para lograr el resultado (máximo o mínimo) óptimo.
- Es posible incluir o reformular restricciones para alterar la solución (análisis de post-optimalidad).
- Permite evaluar costos de sustituir una actividad o insumo.
- Identifica costos de oportunidad interno de cada recurso o insumo limitante.

- Ofrece rangos en los cuales no se modifica la solución óptima para cada actividad y rangos dentro del cual se mantiene el costo de oportunidad de cada recurso.

Por otra parte, el método representa ciertas limitaciones propias de cualquier técnica matemática, que según Coronel de Renolfi & Araujo (2004) se pueden enlistar las siguientes.

- a) No existe la expectativa de precios, éstos deben ser datos conocidos para resolver el problema.
- b) No estima las relaciones insumo-producto, debe contarse con los datos de cantidad y distribución de mano de obra, tierra y capital necesarios.
- c) No resuelve situaciones de riesgo, ya que se basa en la certeza de los datos, es decir, se supone que los datos (precios, producciones, requerimientos, etc.-) son confiables.

A pesar de lo anterior, los modelos de programación lineal son los más usados hoy en día debido a su flexibilidad para describir un gran número de situaciones reales en el terreno militar, la agricultura, en el transporte, en la economía, en la salud, e incluso en la conducta psicológica y social del ser humano matemáticos (Palacios, 2017).

3.4.5. Estructura del modelo de programación lineal

Los modelos de programación lineal generalmente se usan para maximizar o minimizar una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones. Las características generales de un problema de programación lineal son determinadas mediante un modelo matemático que incluye:

3.4.5.1. Función Objetivo

La función objetivo a optimizar se representa por medio de una ecuación lineal explícita del tipo:

$$\text{Minimizar (Min) o Maximizar (Max) } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n$$

Donde

$Z =$ Función a optimizar (maximizar o minimizar).
Se denomina Función Objetivo.

$c_j =$ Coeficiente de coste. Representa el costo unitario o precio neto de cada una de las actividades, según sea el modelo. En modelos de maximización, el precio neto se define como el ingreso bruto menos los costos variables por unidad de actividad.

$x_j =$ Variable de decisión. Representan las actividades en el modelo.

3.4.5.2. Restricciones o desigualdades lineales

La optimización de la ecuación objetivo está condicionada a la existencia real y limitación de los recursos necesarios, así como a las formas y procesos existentes para llevar a cabo las actividades definidas. Estas restricciones se representan por medio de un conjunto de inecuaciones lineales simultaneas del tipo:

$$\begin{array}{rcl}
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n & \leq & b_1 \quad (o \text{ bien } \geq o =) \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n & \leq & b_2 \quad (o \text{ bien } \geq o =) \\
 \cdot & & \cdot \\
 \cdot & & \cdot \\
 \cdot & & \cdot \\
 a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n & \leq & b_m \quad (o \text{ bien } \geq o =)
 \end{array}$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{donde} \quad j = 1, 2, 3, \dots, m$$

Donde:

$a_{ij} =$ Coeficientes tecnológicos. Los coeficientes técnicos de insumo producto son constantes y se definen como la cantidad de recursos que requiere una

unidad de actividad para su realización; el primer subíndice i se refiere al recurso, y el segundo j a la actividad.

$b_m =$ Parámetro. Representa la disponibilidad máxima o requisito mínimo a cumplirse. Simboliza el total de cada uno de los recursos disponibles para ser empleado en las actividades x_n , así entonces, la primera restricción indica que el total del primer recurso empleado en las actividades debe ser menor o igual a la cantidad disponible, b_1 .

$x_j \geq 0$ Restricción de no negatividad. Esta condición restringe las variables de decisión a valores no negativos, es decir, aseguran al modelo una solución positiva.

Estas expresiones matemáticas, encontramos que la programación lineal consiste en encontrar los valores de las actividades x_j , las cuales proporcionan los niveles de cada actividad, que maximizan la función objetivo Z y que cumplen con las m restricciones.

3.4.6. Método simplex

El Método Simplex fue inventado por George B. Dantzig en 1947 y se trata de un algoritmo algebraico (no gráfico) más conocido y popular para la solución de modelos de programación lineal, debido principalmente a las, relativamente sencillas, herramientas matemáticas en las que se sustenta (Hernández, 2017).

El método Simplex es un procedimiento matricial iterativo basado en la metodología de Gauss-Jordan que usa variables no negativas (Puente & Gavilánez, 2018). El procedimiento parte de una primera solución viable para la función objetivo y que con cada iteración evalúa si existe una solución inmediata preferible, el procedimiento concluye cuando ya no es posible encontrar una solución mejor, es decir, se habrá encontrado la solución óptima (el mayor o menor valor posible, según el caso para que se satisfagan las restricciones) (Cabrera, 2017). En resumen, el algoritmo parte de un valor factible a otro y termina cuando no se puede seguir mejorando la solución.

3.4.7. Teoría de la dualidad

La teoría de la dualidad establece que para todo problema de programación lineal de maximización (o de minimización) existe un problema de programación de minimización (o de maximización), al que se denomina problema dual, y al problema original se le llama primal (Kong, 2010).

Entonces un problema dual de programación lineal se origina directamente a partir del modelo original denominado problema primal, esta regla nos indica que existe una correspondencia directa entre los elementos del problema primal y su dual (Palacios, 2017), por consiguiente, al solucionar el problema dual automáticamente se está solucionando el problema primo y recíprocamente, al solucionar el problema primo se tiene la solución del problema dual. (Guerrero, 2009); en resumen, solución óptima de cualquiera de ellos proporciona la solución óptima del otro.

La dualidad es sólo un proceso de convertir un problema en otro, sin embargo, su importancia, según Kong (2010) y Hernández (2017), radica en cuatro razones básicas:

1. Los valores óptimos, cuando existen, son iguales en ambos problemas.
2. El planteamiento dual de un problema de programación lineal puede dar como resultado una reducción en el número de restricciones o una forma más sencilla.
3. Los problemas primal-dual al estar relacionados, permite interpretar las variables, restricciones y función objetivo de uno de los modelos en términos del significado del otro, esto se conoce como interpretación económica.
4. La relación dual tiene un nexo importante con el análisis de sensibilidad.

3.4.8. Interpretación económica de la dualidad

La solución del problema dual del primal nos proporciona los precios marginales (conocidos como: precios duales, precios sombra o costos de oportunidad), los cuales tienen un vínculo importante con el análisis de sensibilidad (Palacios, 2017).

La interpretación económica de los precios sombra, tiene que ver con analizar qué sucede con una solución óptima dado un cambio muy ligero (unitario) en la disponibilidad de recursos, ya sea incrementando o decrementando (Guerrero, 2009), dicho de otra

forma, determinará la “máxima variación que puede tener el valor de la función objetivo (Z), cuando se aumenta o disminuye en una unidad, el recurso limitante”. Por ejemplo, si se dispusiera de 1 ha más de tierra, Z se incrementaría en \$ 300; dicho de otro modo, si se renunciara a 1 ha de tierra en el plan óptimo, Z se reduciría en \$ 300. (Davis & Johnson, 1987, citado por Coronel de Renolfi & Araujo, 2004).

La interpretación económica nos ayuda identificar la cantidad máxima que se puede estar dispuesto a pagar por incrementar la disponibilidad del recurso una unidad más y en caso de que el recurso no sea totalmente utilizado en el óptimo del problema, implica que el precio sombra del recurso es cero (De la Fuente, 1997), es decir, el precio sombra indica en cuánto variaría el valor de la función objetivo si la cantidad de esos recursos se incrementaran en una unidad y será cero en el caso de los insumos sobrantes (Coronel de Renolfi & Araujo, 2004).

El precio dual y sombra son lo mismo para todos los problemas de maximización; sin embargo, en un problema de minimización, el precio sombra es el negativo del precio dual correspondiente. Ambos proporcionan información económica que ayuda a tomar decisiones para la administración de recursos adicionales. (Palacios, 2017).

3.4.9. Análisis de sensibilidad

Una vez resuelto el modelo de programación lineal, se espera que las soluciones obtenidas sean estables, es decir poco sensibles a las variaciones en los datos (Coronel de Renolfi & Araujo, 2004), sin embargo, la solución óptima obtenida el día de hoy; puede no ser la óptima para un tiempo futuro, ya que de acuerdo con Palacios (2017), nadie garantiza que:

1. Los precios de la materia prima utilizada en la producción no cambien con el transcurso del tiempo.
2. La oferta y la demanda en la venta de un producto o un servicio no varíen.
3. El costo de distribución del producto no disminuya o aumente.
4. Adición de nuevas restricciones.
5. Adición de nuevos productos o actividades.

Afortunadamente, no es necesario plantear nuevamente el problema para obtener una nueva solución óptima cuando existe un cambio en la información; pues para ello existe el análisis de sensibilidad (Guerrero, 2009).

El análisis de sensibilidad se evalúa a partir de la solución óptima de la información inicial y permite estudiar en qué medida la solución es sensible a modificaciones, es decir medir la estabilidad de la solución frente a los cambios (Frank, 2001, citado por Coronel de Renolfi & Araujo, 2004). El análisis de sensibilidad se utiliza para determinar cómo afectan un cambio en los coeficientes de las variables que originaron y dieron, en su momento, una solución óptima a un problema (Palacios, 2017).

De manera más específica, de acuerdo con Palacios (2017), aplicando el análisis de sensibilidad podemos analizar:

1. Cómo uno o dos cambios simultáneos (aumento y/o disminución) en los coeficientes de la función objetivo pueden afectar o no la solución óptima; es decir, cambios en el primer miembro de la restricción (lado izquierdo).
2. Cómo uno o dos cambios simultáneos (aumento y/o disminución) del lado derecho de las restricciones pueden o no afectar a la solución óptima; es decir, cambios en el segundo miembro de la restricción (lado derecho).

El análisis de sensibilidad incluye la interpretación del rango de validez de los coeficientes, el costo de sustitución de las actividades, el costo de oportunidad de los recursos y su rango de validez, que son resultados adicionales al modelo de programación lineal (Coronel de Renolfi & Araujo, 2004).

3.5. Probabilidad aplicada en la Hidrología

3.5.1. La variable aleatoria

En la producción agrícola existen una multitud de factores que suelen variar de un ciclo a otro sin ninguna causa aparente, por ejemplo, precipitaciones muy por debajo de la media observada o, por el contrario, con una intensidad y frecuencia fuera de lo común que provoca inundaciones. Cuando estos factores tienen una variabilidad difícil de

explicar, se dice que sus variaciones son atribuibles al azar y generalmente se les denomina variaciones aleatorias (Palacios & Exebio., 1989).

Además de la variabilidad atribuible al azar, existe otra variabilidad de tipo cíclico en el continuo del tiempo, se dice que la variable estocástica; un claro ejemplo de una variable aleatoria estocástica es la cantidad de agua que conduce un río anualmente, o las precipitaciones mensuales observada en un sitio, que, de un año a otro, para un mismo mes, hay variaciones atribuidas al azar (Palacios & Exebio, 1989).

3.5.2. Distribuciones de probabilidad

Una función matemática que expresa las probabilidades de presentación de una variable aleatoria, se denomina función de distribución de probabilidad. Las distribuciones de probabilidad son herramientas que ayudan a describir el comportamiento de variables discretas y continuas. Para tal propósito, se ha establecido que una variable debe ser representada con una letra mayúscula y el valor de la misma, con una letra minúscula (Infante & Zárate, 2011).

De acuerdo con lo anterior, se entenderá $P(X = a)$ como la probabilidad de que la variable X asuma el valor de a y será equivalente a escribir $f(x)$, es decir:

$$f(x) = P(X = a) \quad (3.1)$$

En el mismo sentido, debe entenderse que $P(a \leq X \leq b)$ es la probabilidad de que el valor de la variable X se encuentre dentro del intervalo de los valores de a y b . Así mismo, será denominado Distribución de Probabilidades de la variable X a todos los valores que puede tomar X dentro del intervalo (a, b) .

Quedará definido como función de distribución acumulada o acumulativa, $F(x)$, como:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (3.2)$$

Y se entiende que, para el caso de una variable discreta, el valor de $F(x)$ se obtendrá de hacer una suma de los valores de $f(x)$ y en el caso de una variable continua, el valor de $F(x)$ resultará de hacer una integración de $f(x)$ en el rango de interés. (Infante *et al.*, 2011).

3.5.3. Momentos de las variables aleatorias

En estadística el método de momentos es un método utilizado para estimar parámetros poblacionales y pueden emplearse para caracterizar la función de probabilidad de una variable aleatoria. De acuerdo con Infante & Zárate (2011) podemos clasificarla en dos tipos: momentos con respecto al origen y momentos con respecto a la media.

3.5.3.1. r-ésimo momento respecto al origen.

Sea X una variable aleatoria con función de probabilidades $f(x)$, y sea r un entero positivo. El r -ésimo momento respecto al origen se denota por $E(X^r)$ y tiene por ecuación:

$$E(X^r) = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx \quad \text{para variable continua} \quad (3.3)$$

$$E(X^r) = \sum_{i=1}^n x^r f(x) \quad \text{para variable discreta} \quad (3.4)$$

Cuando $r = 1$, el primer momento respecto al origen lleva por nombre Media o Esperanza matemática de la distribución teórica y se denota por la letra μ .

3.5.3.2. r-ésimo momento respecto a la media

Sea X una variable aleatoria con función de probabilidades $f(x)$, con media μ y sea r un entero positivo. El r -ésimo momento respecto a la media se denota por $E(X - \mu)^r$ y tiene por ecuación:

$$E(X - \mu)^r = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^r f(x) dx \quad \text{para variable continua} \quad (3.5)$$

$$E(X - \mu)^r = \sum_{i=1}^n (x - \mu)^r f(x) \quad \text{para variable discreta} \quad (3.6)$$

Cuando $r = 2$, el segundo momento respecto a la media lleva por nombre varianza poblacional y se denota por σ^2 .

3.5.4. Parámetros y estimadores estadísticos

Para evaluar el tipo de una curva de distribución de frecuencias y para comparar las distribuciones es necesario calcular media aritmética, desviación estándar y coeficiente de asimetría (Díaz, 2010). Para lo cual hacemos uso de los parámetros estadísticos, los

cuales nos sirven para indicar características de la población y son: media, varianza y asimetría. En un muestreo los parámetros de población son desconocidos, por lo que tenemos que determinarlos a partir de estimadores.

3.5.4.1. Media aritmética o Esperanza matemática μ

Es el valor esperado de la variable y muestra la tendencia central de la distribución. Es el primero momento respecto al origen, $r = 1$.

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx \quad (3.7)$$

El valor estimado de la media a partir de una muestra será calculado mediante:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.8)$$

Donde

- $\bar{x}$ = media aritmética o promedio aritmético.
- x = valor de la variable.
- n = numero total de datos de la muestra.
- $i = : 1, 2, \dots, n$.

3.5.4.2. Varianza poblacional σ^2

Mide la variabilidad de los datos. Es el segundo momento respecto a la media. $r = 2$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx \quad (3.9)$$

El valor estimado de la varianza a partir de una muestra será calculado mediante:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.10)$$

Donde:

- $s^2 =$ varianza.
- $\bar{x} =$ promedio aritmético.
- $x_i =$ valor de la i -ésima variable aleatoria.
- $n =$ número total de datos de la muestra.
- $i = 1, 2, \dots, n$.

En donde el divisor es $n-1$ en lugar de n , se usa para asegurar que la estadística de la muestra no sea sesgada, es decir, que no tenga una tendencia, en promedio, a ser mayor o menor que el valor verdadero.

La desviación estándar σ , mide la variabilidad de datos y será la raíz cuadrada de la varianza y el valor estimado de la desviación estándar a partir de una muestra será s :

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (3.11)$$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (3.12)$$

El coeficiente de variación Cv es una medida adimensional de la variabilidad y es calculado mediante:

$$Cv = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3.13)$$

Su valor estimado se calcula mediante:

$$Cv = \frac{s}{\bar{x}} \quad (3.14)$$

La desviación estándar y la variancia son estadísticas de variación absoluta, es decir miden la cantidad real de variación en un conjunto de datos y dependen de la escala de medición (Díaz, 2010).

3.5.4.3. Coeficiente de asimetría γ

Este parámetro mide la distribución de los valores de la variable alrededor de la media. Es el tercer momento respecto a la media, $r = 3$, dividido por el cubo de la desviación estándar:

El tercer momento respecto a la media:

$$E(X - \mu)^3 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx \quad (3.15)$$

Por lo tanto:

$$\gamma = \frac{1}{\sigma^3} E(X - \mu)^3 \quad (3.16)$$

Un valor estimado del coeficiente de asimetría está dado por:

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{s^3 (n-1)(n-2)} \quad (3.17)$$

Donde:

- s = desviación estándar.
- $\bar{x}$ = promedio aritmético.
- x_i = valor de la variable.
- n = número total de datos de la muestra.
- $i = 1, 2, \dots, n$.

3.5.5. Distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad explican el comportamiento y para cada uno de los eventos se asocia con una probabilidad de ocurrencia, mediante el uso de funciones de probabilidad. De acuerdo con Diaz (2010), existen dos tipos de distribuciones de probabilidad: discreto y continuos. Es motivo de interés de esta investigación los modelos continuos, por lo cual se dará una breve explicación de los modelos probabilísticos

continuos comúnmente usados en la hidrología: normal, log-normal, Gamma y Pearson III.

3.5.5.1. Distribución normal

Esta distribución es también llamada campana de Gauss por su forma acampanada. Para poder utilizarla en datos hidrológicos, a veces es necesario transformar datos para que sigan esta distribución.

3.5.5.1.1. Función de densidad

Su función está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp -\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2 \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (3.18)$$

Donde:

- $f(x)$ = función de densidad de probabilidad.
- x = variable aleatoria.
- σ = desviación estándar de la población.
- μ = media de la población.

3.5.5.1.2. Estimación de parámetros

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.19)$$

$$s = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.20)$$

3.5.5.1.3. Factor de frecuencia

La ecuación (3.18), analíticamente no es integrable, por lo que para simplificarla se define una nueva variable llamada Z que se expresa mediante la ecuación:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.21)$$

Donde:

- Z = variable normal estándar con media cero ($\mu = 0$) y varianza uno ($\sigma^2 = 1$).

Los valores de ajustados a la distribución normal ($\hat{x}$), según el modelo probabilístico normal, se obtiene remplazando el valor de z obtenido en (3.21) , en la siguiente ecuación:

$$\hat{x} = \bar{x} + Z\sigma_x \quad (3.22)$$

Donde

- $\hat{x}$ = valor ajustado a la distribución normal, es decir $P(X \leq \hat{x})$.
- $\bar{x}$ = promedio de la muestra.
- σ_x = desviación estándar de la muestra.

3.5.5.2. Distribución Log-Normal de dos parámetros

Si X es una variable aleatoria con funciones de densidad de probabilidad asimétricas (distribución no normal) y se define una nueva variable como:

$$y = \ln x \quad (3.23)$$

Que presenta una distribución normal (simétrica) con media $\bar{y}$ y varianza σ_y^2 , entonces se afirma que la variable X tiene una distribución logarítmico normal (Díaz, 2010), de esta forma es posible aplicar el mismo método a las estadísticas para los logaritmos (Ven Te Chow *et al.*, 1994).

3.5.5.2.1. Función de densidad

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_y}} \exp^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2} \quad 0 < x < \infty \quad (3.24)$$

Donde

- $y = \ln x$.

- $x = e^y$.
- μ_y = media de los logaritmos de la población, estimado $\bar{y}$.
- σ_y = Desviación estándar de los logaritmos de la población, estimado s_y .

3.5.5.2.2. Estimación de parámetros

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \quad (3.25)$$

$$s_y = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.26)$$

3.5.5.2.3. Factor de frecuencia

Dado que la ecuación, analíticamente no es integrable, se requiere estandarizar definiendo una nueva variable Z (variable normal estándar) expresada mediante la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \quad (3.27)$$

Donde:

- Z = variable normal estándar.

Para hallar los valores de $\hat{y}$ correspondientes para diferentes probabilidades, es necesario hallar los valores mediante Z , la media de los logarítmicos y la desviación estándar de los logaritmos de la muestra.

Los valores ajustados a la distribución normal, se obtiene remplazando el valor de z obtenido en (3.27), en la siguiente ecuación:

$$\hat{y} = \bar{y} + Z\sigma_y \quad (3.28)$$

Donde

- $\hat{y}$ = valor ajustado a la distribución normal, es decir $P(X \leq \hat{x})$.

- $\bar{y}$ = promedio de los logaritmos (logaritmos de x) de la muestra.
- σ_y = desviación estándar de los logaritmos (logaritmos de x) de la muestra.

Los valores de $\hat{x}$ según el modelo probabilístico logarítmico normal son obtenidos a partir de la ecuación:

$$\hat{x} = e^{\hat{y}} \quad (3.29)$$

Donde

- $\hat{x}$ = valor de la variable aleatoria ajustada a la distribución logarítmico normal, ajustado a la distribución normal, es decir $P(X \leq \hat{x})$.

3.5.5.3. Distribución Gamma

La función de distribución gamma es muy útil para la descripción de variables hidrológicas asimétricas sin el uso de la transformación Log. Este modelo tiene la particularidad de que sus variables aleatorias no son negativas y tienen distribuciones sesgadas a la derecha, es decir, la mayor parte del área bajo la curva de la función, se encuentran cerca del origen y los valores de la función de densidad disminuyen gradualmente cuando x aumenta.

3.5.5.3.1. Función de densidad

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad 0 < x < \infty \quad (3.30)$$

Donde:

- α, β = parámetros positivos.
- α = parámetro de forma.
- β = parámetro de escala.
- $\Gamma(\alpha)$ = función gamma de α .

Donde la función Gamma está definida por:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\alpha-1} dx \quad \text{para } \alpha > 0 \quad (3.31)$$

Esta función también puede representar como:

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)! \quad (3.32)$$

Haciendo un cambio de variable:

$$y = \frac{x}{\beta} \quad (3.33)$$

Reemplazando (3.33) en la ecuación (3.30), se obtiene:

$$f(y) = \frac{y^{\alpha-1} e^{-y}}{\Gamma(\alpha)} \quad (3.34)$$

3.5.5.3.2. Estimación de parámetros

$$\bar{x} = \alpha\beta \quad (3.35)$$

$$s = \sqrt{\alpha\beta^2} \quad (3.36)$$

Los parámetros α y β se estiman a partir de datos muestrales mediante:

$$\alpha = \frac{\bar{x}}{s^2} \quad (3.37)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}^2}{s^2} = \frac{1}{CV^2} \quad (3.38)$$

Donde:

- $\bar{x}$ = media de la muestra.
- s = desviación estándar de la muestra.
- CV = Coeficiente de variación.

3.5.5.3.3. Factor de frecuencia

El valor de $\hat{x}$ ajustado a la distribución Gamma correspondientes a diferentes probabilidades se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\hat{x} = y\beta \quad (3.39)$$

3.5.5.4. Distribución Pearson Tipo III o Gamma de tres parámetros

La función Gamma se utiliza para ajustar la distribución de frecuencia de variables tales como crecientes máximos anuales, caudales mínimos, volúmenes de flujo anuales y estacionales, valores de precipitaciones extremas y volúmenes de lluvia de corta duración.

3.5.5.4.1. Función de densidad

$$f(x) = \frac{(x - x_0)^{\alpha-1} e^{\frac{-(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (3.40)$$

Donde:

- x = variable aleatoria
- x_0 = origen de la variable x , parámetro de posición (valor inicial).
- α = parámetro de forma.
- β = parámetro de escala.
- $\Gamma(\alpha)$ = función gamma de α .

Haciendo un cambio de variable se tiene:

$$y = \frac{(x - x_0)}{\beta} \quad (3.41)$$

Y sustituyendo (3.41) en la ecuación (3.40), tenemos que:

$$f(y) = \frac{y^{\alpha-1} e^{-y}}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad (3.42)$$

3.5.5.4.2. Estimación de parámetros

$$\bar{x} = x_0 + \alpha\beta \quad (3.43)$$

$$s = \sqrt{\alpha\beta^2} \quad (3.44)$$

$$C_s = \frac{2}{\sqrt{\alpha}} \quad (3.45)$$

Donde:

- $\bar{x}$ = promedio de la muestra.
- s = desviación estándar de la muestra.
- C_s = Coeficiente de sesgo de la muestra.

Resolviendo las ecuaciones, se obtiene:

$$\alpha = \left(\frac{2}{C_s}\right)^2 = \frac{4}{C_s^2} \quad (3.46)$$

$$\beta = s \frac{C_s}{2} \quad (3.47)$$

$$x_0 = \bar{x} - \frac{2s}{C_s} \quad (3.48)$$

Es importante indicar que cuando $C_s < 0$, β es negativo por lo tanto no cumple con la condición de la ecuación.

3.5.5.4.3. Factor de frecuencia

El valor de $\hat{x}$ ajustado al modelo de Pearson Tipo III para una probabilidad determinada se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{x} = y\beta + x_0 \quad (3.49)$$

3.5.6. Selección de la función de probabilidad

Para seleccionar la función de probabilidad más adecuada existen dos métodos el análisis gráfico y el método del error cuadrático mínimo.

3.5.6.1. Análisis Gráfico

Este método consiste simplemente en graficar las diferentes funciones en una escala logarítmica. Se grafican los volúmenes totales anuales en las ordenadas y las probabilidades de ocurrencia (en porcentajes) en las abscisas. De esta forma se puede seleccionar la gráfica que mejor se ajuste a los datos medidos. Este método es de alto grado de subjetividad, sin embargo, es muy ilustrativo y recomendado para usarse con otros métodos (Aparicio, 1992).

3.5.6.2. Método del error cuadrático mínimo

De acuerdo con Aparicio (1990), es un método menos subjetivo que el gráfico y consiste en calcular para cada función de distribución el error cuadrático con la siguiente formula:

$$C = \left[\sum_{i=1}^k (x_{e_i} - x_{o_i})^2 \right]^{1/2} \quad (3.50)$$

Donde:

- x_{e_i} = i-ésimo dato estimado
- x_{o_i} = i-ésimo dato calculado con la función de distribución bajo análisis

3.5.7. Pruebas de bondad de ajuste

Una forma de seleccionar el modelo probabilístico más adecuado para un conjunto de datos (muestra) es mediante pruebas estadísticas; estos métodos permiten cuantificar la bondad de ajuste (Díaz, 2010). Las pruebas más conocidas son la chi-cuadrada (χ^2) y la prueba Kolmogórov-Smirnov, y mediante estos métodos podemos verificar el ajuste de los datos a una distribución de probabilidades (Aparicio 1992).

3.5.7.1. Prueba Chi-cuadrada (χ^2)

La prueba chi-cuadrada (χ^2) es la más popular y fue propuesta por Karl Pearson en 1900. Se trata de comparar las frecuencias observadas con las frecuencias esperadas, y se define como:

$$\chi_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - \epsilon_i)^2}{\epsilon_i} \quad (3.51)$$

Donde:

- θ_i = frecuencias observadas. Número de eventos en el intervalo i .
- ϵ_i = frecuencias calculadas. Número de eventos esperados en el mismo intervalo.
- k = número de intervalos de clase.

La frecuencia calculada ϵ_i se calcula como:

$$\epsilon_i = n[F(S_i) - F(I_i)] \quad (3.52)$$

Donde:

- $F(S_i)$ = Función de distribución de probabilidad en el límite superior del intervalo i
- $F(I_i)$ = Función de distribución de probabilidad en el límite inferior del intervalo i .
- n = número de eventos.
- $i = 1, 2, \dots, k$

Para decidir si el modelo es adecuado para un conjunto de datos, se compara el chi-cuadrado calculado (χ_c^2) con el chi-cuadrado tabular (χ_t^2). El chi-cuadrado calculado (χ_c^2) se obtiene mediante la ecuación (3.51), mientras que el valor de con el chi-cuadrado tabular (χ_t^2), se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$v = k - h - 1 \quad (3.53)$$

Donde:

- v = grados de libertad.

- k = número de intervalos de clase.
- h = número de parámetros del modelo que se está probando el ajuste.

Los valores de (χ^2_t) , se hallan de tablas estadísticas. con niveles de significancia α , cuyos valores usuales son 0.10, 0.05 y 0.01.

3.5.7.1.1. Criterio de decisión

- Si $\chi^2_c \leq \chi^2_t$, se afirma que la distribución es adecuada para el conjunto de datos, al nivel de significancia asumido.
- Si $\chi^2_c > \chi^2_t$, se afirma que la distribución la distribución no se ajusta para el conjunto de datos, al nivel de significancia asumido.

3.5.7.2. Prueba Kolmogórov-Smirnov

Es una prueba estadística que compara la probabilidad acumulada empírica con la probabilidad acumulada teórica de un determinado modelo de distribución (Díaz, 2010).

La prueba consiste en calcula el valor máximo absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(x_m)$ y la estimada $F(x_m)$, Este valor (D), se compara con un valor crítico d que se encuentra en tablas (Cuadro 3.1) y que depende del número de datos n y el nivel de significancia α que usualmente es de 0.05 y 0.01 (Aparicio 1992).

Entonces la prueba Kolmogórov-Smirnov, se define como:

$$D = \max |F_o(x_m) - F(x_m)| \quad (3.54)$$

La función de distribución de probabilidad observada se calcula como:

$$P(X \geq x) = 1 - \frac{m}{n+1} = F_o(x_m) \quad (3.55)$$

Donde:

- m = número de orden del dato x_m en un alista de mayor a menor.
- n = número total de datos.

3.5.7.2.1. Criterio de decisión

- Si $D < d$, la distribución escogida se acepta, al nivel de significancia, por lo que la distribución en prueba es adecuada para el conjunto de datos.
- Si $D > d$, la distribución escogida se rechaza, al nivel de significancia, por lo que la distribución en prueba no es adecuada para el conjunto de datos.

Cuadro 3.1. Valores críticos d para la prueba Kolmogórov-Smirnov de bondad de ajuste.

Tamaño de la muestra	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.3	0.34	0.4
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
40	0.19	0.21	0.25
n grande	$1.22\sqrt{n}$	$1.36\sqrt{n}$	$1.63\sqrt{n}$

Fuente: Aparicio (1992).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción del área de estudio

4.1.1. Ubicación geográfica

El Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma se ubica al sur del estado de Guanajuato, 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 1,700 metros sobre el nivel del mar (Cruz *et al.*, 2017).

El DR011 cuenta una superficie total de 112,439.05 hectáreas, que abarcan diecisiete municipios del estado de Guanajuato: Acámbaro, Salvatierra, Santiago Maravatío, Jaral, Yuriria, Valle de Santiago, Villagrán, Cortázar, Salamanca, Irapuato, Guanajuato, Silao, Tarimoro, Pueblo Nuevo, Abasolo, Huanímaro y Pénjamo.

Administrativamente, el DR011 está conformado por once módulos de riego: I Acámbaro, II Salvatierra, III Jaral, IV Valle de Santiago, V Cortázar, VI Salamanca, VII Irapuato, VIII Abasolo, IX Huanímaro, X Corralejo y XII Purísima, los cuales tienen la finalidad de facilitar la gestión del agua y la infraestructura que componen el distrito (Figura 4.1).

Las superficie dominada y regable, hasta el 2019, así como el número de usuarios de cada módulo del Distrito de Riego 011 se muestran en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Superficie dominada, regable y número de usuarios por módulo.

No. Módulo	Módulo	Superficie total dominada (ha)	Superficie de gravedad (ha)	Número de usuarios
01	Acámbaro	8,849.05	6,070.00	1,930
02	Salvatierra	15,897.10	11,929.00	6,054
03	Jaral	6,688.80	4,529.00	1,463
04	Valle	14,156.65	9,297.00	2,309
05	Cortázar	18,448.30	12,712.00	3,162
06	Salamanca	14,156.65	10,885.00	2,712
07	Irapuato	8,210.55	4,296.00	1,269
08	Abasolo	16,365.45	9,624.00	2,418
09	Huanímaro	3,730.70	2,700.00	840
10	Corralejo	1,516.45	694.00	275
11	La Purísima	4,419.35	3,973.00	1,054
SUB-TOTAL		112,439.05	76,709.00	23,486.00

Fuente: Elaboración propia, con base en la información del Distrito de Riego 011.

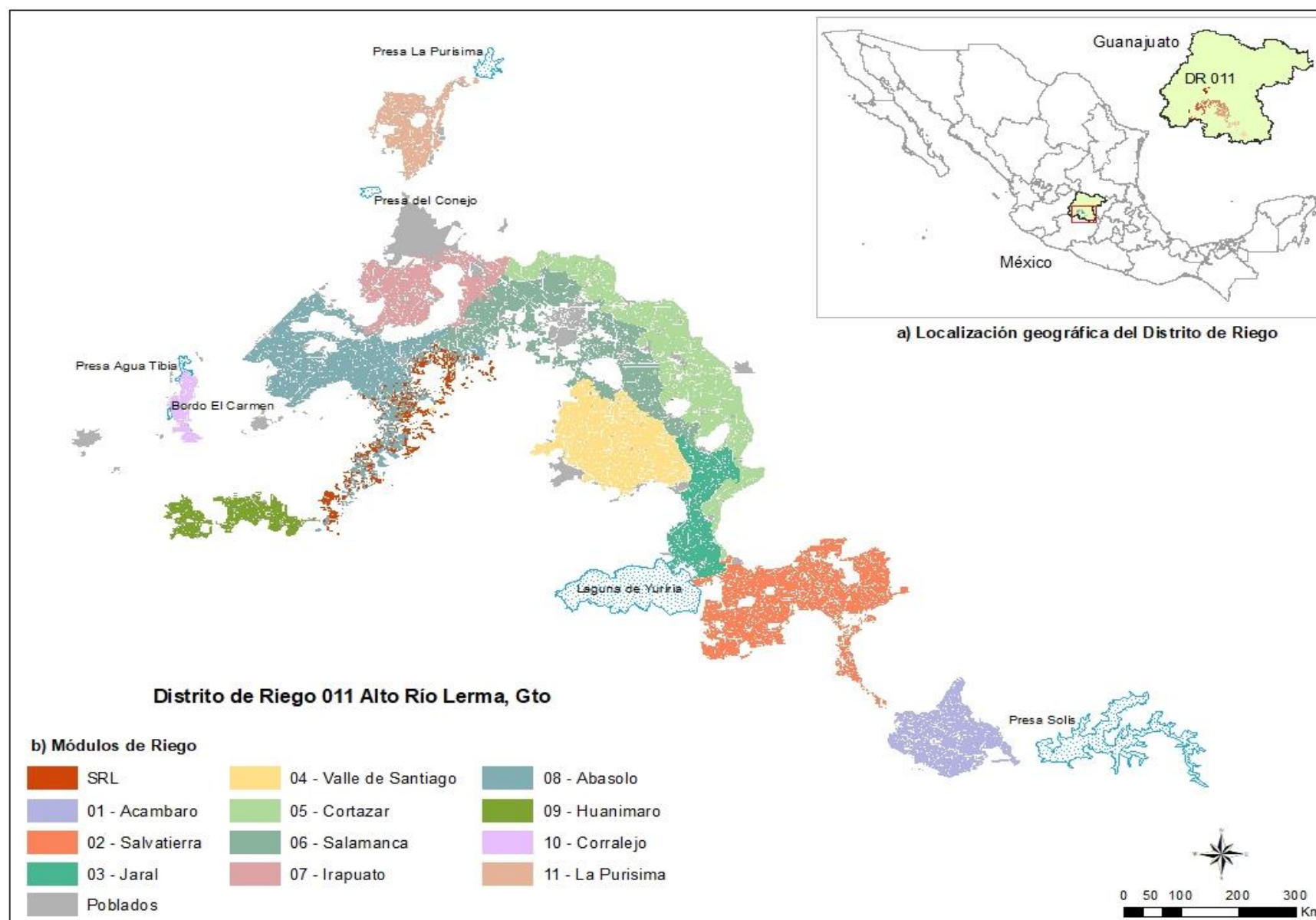


Figura 4.1. Localización geográfica del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma

4.1.2. Recursos Naturales

4.1.2.1. Clima

La región donde se encuentra el DR011, según la clasificación de Köppen modificado por García, se describe como clima templado subhúmedo con lluvias en verano, simbolizado como “Cwah”.

Dada su ubicación el clima es templado la mayor parte del año, con una temperatura media mensual en el distrito se encuentra entre 18 y 20 °C, con lluvia media anual mayor a 620 milímetros. Es posible encontrar un periodo de heladas en los meses de noviembre a febrero con una duración de 10 a 30 días, y esporádicas granizadas anuales de uno a tres días anuales (Mejía *et al*, 2003).

La región se caracteriza por un periodo de lluvias de junio a septiembre y un prolongado periodo de estiaje que va desde octubre hasta mediados de junio, el déficit de lluvia en la mayor parte del año hace indispensable, para las actividades económicas y productivas, la agricultura bajo riego (Cruz *et al*, 2016). Por lo tanto, en los ciclos otoño-invierno es necesario la agricultura bajo riego, mientras que en primavera-verano, las lluvias contribuyen a satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos (Reyes *et al*., 2019).

4.1.2.2. Fisiografía

El área del distrito queda comprendida dentro de cinco subprovincias del Eje Neovolcánico: Bajío Guanajuatense, Altos de Jalisco, Llanos de Querétaro, Sierras Volcánicas y Bajíos Michoacanos, así como Las Sierras y Lagos del Centro.

El DR011 se caracteriza como un valle abierto ligeramente plano con ondulaciones moderadas y elevaciones de baja altura en los márgenes, distinguido por el Río Lerma como su cauce de desalojo natural en las llanuras.

4.1.2.3. Suelos

Se han encontrado seis tipos de suelos en el Distrito de riego, entre los cuales el que más predomina es el tipo Vertisol (VR), el cual se caracteriza por su alto contenido de

arcillas, y un gran potencial agrícola por su alta fertilidad, no obstante, requiere un extenso manejo de laboreo, debido al endurecimiento en la época de sequía y a su anegamiento en época de lluvias (IUSS, 2014). También podemos encontrar suelo categorizado como Phaeozems (PH) o Feozems, que son ricos en materia orgánica y utilizados en la producción de hortalizas y granos como soya, trigo y cebada (Semarnat, 2019).

Existen tres tipos de textura suelos predominantes en el Distrito de Riego 011, en primer lugar encontramos los suelos arcillosos y franco-arcillosos, los cuales ocupan el 85% de la superficie del Distrito y, se caracterizan por tener un espesor de medio a profundo (entre 40 y 200 cm), un relieve predominantemente plano, pendientes menores al 20% y un drenaje interno lento; en segundo lugar, se encuentran los suelos arcillo-arenosos y franco-arcillosos-arenosos, son suelos delgados (40 centímetros), de relieve ondulado y drenaje interno moderadamente lento. Finalmente, tenemos los suelos profundos, que son de texturas medias a gruesas, relieve plano a suavemente ondulado, drenaje interno moderado a rápido y que han sido originados por los materiales acarreados por los diferentes ríos que atraviesan la zona. Los suelos pesados ocupan el 81.5% del área del distrito, los de textura media el 9.8% y los de textura ligera el 8.7% (Reyes, 2018).

4.1.2.4. Vegetación

La región del Bajío donde se ubica el Distrito de Riego 011 predominaban los bosques de pino-encino, sin embargo, actualmente sólo se aprecian en zonas circunvecinas y con un alto grado de disturbio, como consecuencia de la apertura de tierras para la actividad agrícola. En las laderas y alrededores es posible apreciar mezquitales, pastizales asociados con mezquite usualmente cubiertas por bosque de encino o matorral de especies halófitas (Reyes, 2018).

4.1.2.5. Hidrología

El Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma pertenece a la cuenca hidrológica Lerma Chapala, dentro de la región hidrológica número 12 Lerma-Santiago, integrada en la región hidrológica administrativa VIII-Lerma Santiago Pacífico.

4.1.2.6. Agua Superficial

El DR011 es el más grande dentro de la cuenca Lerma Chapala y su principal fuente de abastecimiento es el Río Lerma, el cual nace en las laderas del Nevado de Toluca, corre a lo largo de la cuenca Lerma-Chapala, tiene una longitud de 700 km, y desemboca en el Lago de Chapala (Hidalgo *et al.*, 2009).

El Río Lerma, en su recorrido por la zona de riego, es abastecido en su margen derecha por diferentes afluentes, entre los que se pueden destacar son el Río Laja, el Arroyo Temascatío y corrientes menores como el Río Guanajuato, sobre el cual se ubica la presa La Purísima, que abastece al módulo 11 “La Purísima”; y el Río Turbio, donde se han establecido los diques Agua Tibia, Dique Alto y Dique San Gabriel, que abastecen, a través de bombeo, la red de canales del módulo 10 “Corralejo” (Reyes, 2018). Finalmente es sobre el Río Lerma donde se ubican la presa Tepuxtepec y la Presa Solís, esta última es la principal fuente de abastecimiento de la zona de riego del Distrito (Reyes *et al.*, 2019).

4.1.2.7. Agua Subterránea

Los acuíferos claves en el suministro de agua subterránea para el DR011 son siete: la Ciénega Prieta-Moroleón, Irapuato-Valle, Pénjamo-Abasolo, Salvatierra-Acámbaro, Silao-Romita, Valle de Acámbaro y Valle de Celaya. La extracción del agua se realiza a través de 1962 pozos profundos distribuidos en todo el distrito de riego; de los cuales 190 son pozos oficiales y 1,772 son particulares.

4.1.3. Infraestructura hidráulica

4.1.3.1. Presas de almacenamiento

El Distrito cuenta con cuatro vasos de almacenamiento: Presa Tepuxtepec, Presa Solís, Laguna de Yuriria y Presa La Purísima, que, de acuerdo con el reglamento del Distrito de Riego, son los encargados de almacenar el volumen superficial concesionado que escurre por los causes de los ríos Lerma, Guanajuato y sus afluentes.

La presa Tuxtepec es una central hidroeléctrica que se localiza en el cauce del río Lerma dominado Salto de Tepuxtepec y funciona como control de avenidas, además de sus usos para riego agrícola, pesca y actividades turísticas. El 90% del agua extraída de la Presa Tuxtepec llega a la Presa Solís y el resto de los volúmenes derivados se evapora o infiltra en el trayecto (Reyes, 2018).

La Presa Solís es el almacenamiento más importante del sistema hidroagrícola y distribuye agua a siete Módulos del DR011: I-Acámbaro, II-Salvatierra, V-Cortázar, VII-Irapuato, VIII-Abasolo, X-Corralejo y IX-Huanímaro, así como a un módulo del Distrito de Riego 087, Rosario Mezquite, el Módulo Pastor Ortiz ubicado en Michoacán.

La Presa La Purísima se encuentra al norte del distrito sobre el Río Guanajuato y es una obra independiente que abastece al Módulo XII del mismo nombre, no obstante, forma parte del sistema hidráulico del DR011 por situarse en la misma región hidrológica.

La Laguna Yuridia es una depresión natural a la que se le hicieron adaptaciones para que sirva como almacenamiento y se sitúa sobre el Arroyo de los Sauces. Los volúmenes de la Laguna de Yuriria, riegan a los Módulos IV-Valle de Santiago y VI-Salamanca.

En el Cuadro 4.2, podemos observar las principales características de las presas previamente descritas, así como los porcentajes de aprovechamiento de agua de riego que tienen las presas.

Cuadro 4.2. Características principales de las fuentes de abastecimiento del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma.

Nombre	Capacidad N.A.M.E.	Capacidad N.A.M.O.	Capacidad para riego	Porcentaje de aprovechamiento para riego
Presa Tepuxtepec	537.530	425.00	400.000	74.41%
Presa Solís	1,071.020	800.00	728.282	68.00%
Presa Purísima	196.000	110.00	110.000	56.12%
Laguna Yuriria	325.195	188.00	187.856	57.77%
TOTAL	2,129.745	1,523.00	1,426.138	66.96%

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

4.1.3.2. Presas derivadoras y diques

Dada la sinuosidad del Río Lerma en su paso por el DR0111, las presas derivadoras tienen la función de elevar el tirante (nivel) del agua en los canales de riego, así como mantener esos niveles con pocas fluctuaciones y controlar los gastos hacia las tomas para garantizar el adecuado abasto a los módulos de riego.

El DR011 cuenta con once estructuras, entre las que encontramos las derivadoras Lomo de Toro, Chamácuaro, La Reforma, Santa Julia, Markazuza, El Diezmo y Labradores, siendo las cuatro primeras las más importantes. Así mismo cuenta con la represa Santa Rita y los Diques Braniff, San Gabriel y el Dique Alto o Agua Tibia.

4.1.3.3. Red de conducción

La red mayor de canales del DR 011, posee una longitud total de 485.88 km. La Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL) del DR011 controla 248.02 km de canales principales: Canal Principal Ing. Antonio Coria Maldonado (118.54 km), Bajo Salamanca (60.36 km), Brazo Izquierdo del Río Lerma (21.21 km), Brazo Derecho del Río Lerma (25.37 km), Canal alimentador de la Laguna de Yuriria (4.86 km) y el Canal de extracciones de la Laguna Yuriria (17.68 km). Cabe destacar que el 89% de estos canales son de tierra (219.87 km) y sólo el 11% (28.15 km) cuentan con revestimiento de concreto (Cuadro 4.4).

Los 237.87 km restantes pertenecientes a la red principal está manejado por los Módulos de Riego, de las cuales 35.35 km (15%) cuentan con revestimiento de concreto, 47.08 km (20%) revestidos con mampostería, 140.85 km (59%) sin revestir y 14.58 km (6%) está entubado (Cuadro 4.4).

4.1.3.4. Red de Distribución

La red secundaria de canales posee, de acuerdo con el Cuadro 4.3, una longitud total de 1,244.15 km, las cuales están operadas exclusivamente por los módulos. De estos, 773.32 km son laterales, 362.17 km sublaterales, 101.09 km ramales y 7.57 km son subramales; donde el 84% son canales de tierra, el 7% está revestido de concreto y el 9% revestido de mampostería (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.3. Longitud de la Red menor del DR011 a cargo de los Módulos de Riego (en kilómetros).

No. Módulo	Módulo	Lateral	Sublateral	Ramal	Subramal	Total
01	Acámbaro	59.45	46.30	7.21	1.00	113.96
02	Salvatierra	110.40	26.54			136.94
03	Jaral	48.97	11.36			60.33
04	Valle	123.68	62.28	56.66	1.77	244.39
05	Cortázar	152.35	61.41	12.28	4.80	230.83
06	Salamanca	108.30	34.22	4.31		146.83
07	Irapuato	40.03	46.99	12.16		99.19
08	Abasolo	87.69	49.41	0.57		137.67
09	Huanímaro	15.95	4.42			20.37
10	Corralejo					0.00
11	La Purísima	26.50	19.24	7.90		53.64
TOTAL		773.32	362.17	101.09	7.57	1,244.15

Fuente: Elaboración propia, con base en la información del Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011.

Cuadro 4.4. Tipo de revestimiento y longitud total de Red Distribución del Distrito (Red Mayor y Menor, en kilómetros).

Operado	Tipo Rev.	Principal	Lateral	Sublateral	Ramal	Subramal	Total
SRL	Concreto	28.15					28.15
	Tierra	219.87					219.87
	Subtotal	248.02					248.02
Módulo	Concreto	35.35	41.53	37.50	7.61		122.00
	Entubado	14.58					14.58
	Mampostería	47.08	89.69	19.71			156.48
	Tierra	140.85	642.10	304.96	93.48	7.57	1,188.97
	Subtotal	237.87	773.32	362.17	101.09	7.57	1,482.02
Total		485.88	773.32	362.17	101.09	7.57	1,730.04

Fuente: Elaboración propia, con base en la información del Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011.

4.1.3.5. Estructuras Sobre la Red de Canales

El Distrito cuenta con 13,403 estructuras y se agrupan en 5 categorías por el tipo de función que cumplen: estructuras de cruce, medición, observación, operación y de protección, donde 2,961 son de cruce, 49 de medición, 22 de observación, 9,512 de operación, 859 de protección. Las estructuras se distribuyen entre sifones, puentes-canal, alcantarillas, represas y otros; de los cuales 835 están a cargo de la SRL y 12,568 son manejados por los módulos (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Estructuras sobre la Red de canales a Cargo de la SRL y de los Módulos de Riego.

Tipo de Estructura	Estructura	SRL	Módulo	Total
Cruce	Alcantarilla	2	345	347
	Cruce de tubería	11	51	62
	Paso de agua		26	26
	Paso inferior	3	9	12
	Paso superior	20	21	41
	Puente camino	113	2,105	2,218
	Puente canal	2	61	63
	Puente férreo	2	15	17
	Sifón	40	91	131
	Sifón descarga	3	19	22
	Sifón inicio	3	19	22
	Subtotal	199	2,762	2,961
Medición	Caseta de aforo		2	2
	Estación de aforo	13	32	45
	Estación meteoróloga	1	1	2
	Subtotal	14	35	49
Observación	Observación	3	2	5
	Subtotal	3	2	5
Observación E.	Cambio de sección	2	15	17
	Subtotal	2	15	17
Operación	Bocatoma	105	288	393
	Caja repartidora			1
	Desfogue		1	1
	Entrada de agua			1
	Obra de toma		1	1
	Puente de aforo			1
	Represa	66	3,078	3,144
	Represa caída	1	55	56
	Toma directa	335	899	1,234
	Toma granja	8	4,672	4,680
	Subtotal	515	8,997	9,512
Protección	Abrevadero		3	3
	Caída	6	151	157
	Desfogue	16	144	160
	Entrada de agua	79	443	522
	Rápida	1	13	14
	Represa		1	1
	Vertedor		2	2
	Subtotal	102	757	859
Total		835	12,568	13,403

Fuente: Elaboración propia, con base en la información del Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011.

4.1.3.6. Red de caminos

La red de caminos en el distrito de riego se divide en de acceso y de operación, mientras que la primera describe a los caminos que son necesarios para circular con la maquinaria para la preparación del terreno, labores de cultivo y recolección de la cosecha, el segundo refiere a aquellos caminos utilizados para el mantenimiento y acceso de la infraestructura de distribución y drenaje (Martínez, 2013).

La longitud de caminos de operación es de 2,441.84 km y tanto por la SRL como por los Módulos de Riego. Los caminos interparcelarios que son de acceso e intercomunicación son propios de los módulos y tienen una longitud de 1,782.03 km (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Longitud de la Red de caminos a Cargo de la SRL y de los Módulos de Riego (kilómetros).

Tipo Camino	Tipo Revestimiento	SRL	Módulos	Total
Operación	Grava	32.41	713.95	746.36
	Revestido		61.31	61.31
	Tierra	129.60	1,504.57	1,634.17
	Subtotal	162.01	2,279.83	2,441.84
Acceso (interparcelario)	Asfalto		68.37	68.37
	Grava		6.21	6.21
	Tezontle		33.73	33.73
	Tierra		1673.72	1,673.72
	Subtotal		1,782.03	1,782.03
	Total	162.01	4,350.83	4,512.84

Fuente: Elaboración propia, con base en la información del Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011.

4.1.3.7. Red de drenaje

La red de drenaje del DR, tiene una longitud total de 1,029.68 km, de los cuales 309.88 km son colectores y 719.74 km son drenes secundarios (lateral, sublateral, ramal, subramal y parcelario) (Cuadro 4.7). Así mismo el Río Lerma sirve, adicionalmente como canal y dren, tiene una capacidad de 260 m³/s y recorre 59 km de la Presa Solís hasta la Derivadora Lomo de Toro, de la cual parte recorriendo 105km hasta la Derivadora Markazuza con una capacidad de 400 m³/s (Martínez, 2013).

Los colectores o drenes principales son aquellos que captan flujo de los drenes secundarios y descargan al río; mientras que un dren secundario recolecta derrames de

un grupo pequeño de parcelas, no ramifica ni tiene laterales que le confluyan y descarga al río en una distancia muy corta (Martínez, 2013).

Cuadro 4.7. Longitud de la Red de Drenaje del Distrito a Cargo de la SRL y de los Módulos de Riego (en kilómetros).

Operado	Principal		Secundarios				Total
	Colector	Lateral	Sublateral	Ramal	Subramal	Parcelario	
SRL	53.34	11.2	13.91				78.45
Modulo	256.54	383.39	195.58	53.55	0.69	61.48	951.23
Total	309.88	394.59	209.49	53.55	0.69	61.48	1,029.68

Fuente: Elaboración propia, con base en la información del Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011.

4.1.3.7.1. Estructuras Sobre la Red de Drenaje

El Distrito de Riego 011 cuenta con 3,954 estructuras para drenaje, las cuales se agrupan en 4 categorías por el tipo de función que cumplen: estructuras de cruce, de medición, operación y de protección, donde 1,270 son de cruce, 1 de medición, 2,658 de operación, 25 de protección. Así mismo, 451 están a cargo de la SRL y 3,503 son manejados por los módulos (Cuadro 4.8).

Cuadro 4.8. Estructuras de la Red de drenaje a Cargo de la SRL y de los Módulos de Riego.

Tipo estructura	Estructura	SRL	Modulo	Total
Cruce	Alcantarilla	1	201	202
	Confluencia	1	2	3
	Cruce de tubería	33	115	148
	Paso superior		23	23
	Puente camino	65	794	859
	Puente canal		11	11
	Puente férreo	2	10	12
	Sifón	2	7	9
	Vado		3	3
	Subtotal	104	1,166	1,270
Medición	Estación de aforo		1	1
	Subtotal	0	1	1
Operación	Alcantarilla		1	1
	Confluencia	19	234	253
	Entrada de agua	305	1,708	2,013
	Remate	3	143	146
	Represa	3	115	118
	Toma a cárcamo	17	20	37
	Toma granja		90	90
	Subtotal	347	2,311	2,658
Protección	Caída		21	21
	Confluencia		4	4
	Subtotal	0	25	25
Total		451	3,503	3,954

Fuente: Elaboración propia, con base en la información del Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011.

4.1.3.8. Cárcamos de Bombeo

De acuerdo con el Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011, existen 340 cárcamos bombeos de los cuales 332 pertenecen a los módulos y 8 a particulares.

Cuadro 4.9. Cárcamos de bombeo oficiales y particulares en los Módulos del Distrito de Riego 011.

No. Módulo	Módulo	Oficiales	Particular	Total
01	Acámbaro	42		42
02	Salvatierra	69	8	77
03	Jaral	16		16
04	Valle	63		63
05	Cortázar	22		22
06	Salamanca	21		21
07	Irapuato	15		15
08	Abasolo	59		59
09	Huanímaro	21		21
10	Corralejo	4		4
TOTAL		332	8	340

Fuente: Elaboración propia, con base en la información del Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011.

4.1.3.9. Pozos

Con base en el Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011, se cuenta con 2,173 pozos profundos y se clasifican en pozos particulares y pozos oficiales, actualmente existen 186 pozos oficiales y 1,987 particulares.

Los pozos particulares son aquellos que fueron construidos con recursos del usuario y es éste quien se encarga del control y mantenimiento, mientras que los pozos oficiales son aquellos que fueron gestionados por el DR y son los Módulos quienes se encargan del mantenimiento (Martínez, 2013).

Cuadro 4.10. Pozos oficiales y particulares en los Módulos del Distrito de Riego 011.

No. Módulo	Módulo	Pozos Oficiales	Pozos Particular	Total
01	Acámbaro	10	97	107
02	Salvatierra	18	258	276
03	Jaral	13	196	209
04	Valle	22	263	285
05	Cortázar	37	326	363
06	Salamanca	20	228	248
07	Irapuato	15	150	165
08	Abasolo	30	227	257
09	Huanímaro	7	60	67
10	Corralejo	14	12	26
11	La Purísima		170	170
TOTAL		186	1,987	2,173

Fuente: Elaboración propia, con base en la información del Sistema de Información Geográfica proporcionado por la Jefatura del Distrito de Riego 011.

4.1.4. Cuotas en el Distrito de Riego

En el Distrito de riego, las cuotas cobrado a los usuarios por el servicio de riego y entrega de agua en bloque se realiza por hectárea-riego, por lo que para homologar con las cuotas volumétricas estimadas por la Conagua, se obtiene el presupuesto requerido para poder cubrir las necesidades de operación conservación y administración de los módulos, SRL y la correspondiente a las obras de cabeza, y se divide entre la superficie a regar, dando como resultado una homologación de cuotas y una cuota promedio por hectárea, para el ciclo 2019-2020 resultó de 555 \$/ha.

En el Cuadro 4.11, se puede observar cómo ha evolucionado la cuota cobrada en el Distrito de Riego, que si bien es elevado comparada con la de otros distritos, para el DR011 no es suficiente para cubrir costos de operación y mantenimiento de cada módulo de riego, y pese a que se ha dialogado sobre un cobro por metro cubico (volumétrico) para promover un uso eficiente, el DR011 aún no cuenta con la capacidad tecnológica, ni el apoyo de los usuarios para poder implementar esta política; y dado que a nivel parcela no se cuenta con estructuras de aforo que permitan evaluar el volumen de agua otorgado a los usuarios, es usual que los usuarios utilicen el volumen que consideren necesario con base en la superficie cultivada.

Cuadro 4.11. Evolución de la Cuota de Riego en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

Año agrícola	\$/ ha
2008-2009	330
2009-2010	340
2010-2011	355
2011-2012	365
2012-2013	420
2013-2014	435
2014-2015	455
2015-2016	465
2016-2017	480
2017-2018	510
2019-2020	555
2020-2021	660

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la Jefatura del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

4.1.5. Operación del Distrito de Riego 011

La operación del Distrito de Riego 011 es anual y en él se detalla la superficie a sembrar y los volúmenes autorizados mensualmente. En la Figura 4.2 y Cuadro 4.12, se anexa un resumen de la participación de los distintos organismos en la operación del riego en el Distrito de Riego 011, el cual se describe a continuación:

La planeación de la operación del distrito de Riego o “planeación del riego”, inicia cuando el Consejo de Cuenca determina y asigna el volumen que podrán disponer los usuarios de la cuenca a lo largo del año. Para el caso del DR011, el volumen es calculado con base en el agua almacenada en la Presa Solís, Laguna de Yuriria y Presa La Purísima.

Posteriormente, el Comité Hidráulico del DR011 propone la superficie a sembrar y la cantidad de agua a utilizar por mes, todo en función del volumen de extracción anual autorizado por la Conagua. Las necesidades de agua de cada módulo de riego se hacen llegar a la Jefatura del Distrito a través de la Directiva de las Asociaciones de Usuarios del Agua (AUA) de cada Módulo, mediante la SRL.

Una vez autorizado el plan de riegos del año agrícola, se inicia la fase de programación del riego de acuerdo con la fecha fijada a por el Comité Hidráulico. La programación inicia cuando el usuario, que previamente ha cubierto su cuota de riego y tiene preparado su

terreno para el riego, pide agua al jefe de sección de riego (regador) firmando una solicitud de riego. A su vez, el jefe de sección reúne todos los pedidos de los usuarios y calcula las pérdidas de agua, para solicitar al gerente de operación del módulo de riego (jefe de zona) el agua requerida para entregar a los usuarios. Los módulos de riego concentran la información de riego, más las pérdidas estimadas, y solicitan, a su vez, los volúmenes requeridos (gasto hidráulico, flujo volumétrico) a la SRL. El jefe de DR evalúa los pedidos, y ordena los movimientos de la fuente de abastecimiento a la obra de toma. En esta instancia finaliza la fase de programación del riego.

La fase de distribución del riego empieza cuando el operador de la fuente de abastecimiento, siguiendo las indicaciones del DR011, aumenta o disminuye el volumen de extracción y, en forma análoga a la programación del riego, pero en forma inversa, el agua se va entregando del DR a la SRL, a los módulos, a las secciones de riego y, finalmente, a los agricultores-usuarios, quienes aplican el agua de riego dentro de sus parcelas.

Cabe mencionar que el plan de riegos considera únicamente el uso de aguas superficiales (presas), y dado que no existe un acuerdo formal de asignación de aguas subterráneas, además de los volúmenes concesionados por el REDPA, los usuarios pueden decidir libremente el aprovechamiento de los pozos.

Cuadro 4.12. Componentes operativos de la administración y manejo del DR011.

Actores Responsables	Proceso para la distribución y uso del agua superficial.	Comentarios
Organismo de Cuenca Lerma-Chapala. (Conagua)	▪ Determina el volumen de agua autorizado a cada usuario de la cuenca, entre ellos al DR011. ▪ Da seguimiento a los usos y aprovechamientos del agua.	Con base en el Reglamento para la Disponibilidad, Distribución y Usos de las Aguas Superficiales de la cuenca Decretado el 08 de abril del 2014.
Consejo de Cuenca Lerma-Chapala. (Conagua-Gobierno del Estado-Usuarios)	▪ Valida el cálculo del volumen de agua autorizado a cada usuario de la cuenca, entre ellos al DR011. ▪ Da seguimiento a los usos y aprovechamientos del agua.	Con base en el Reglamento para la Disponibilidad, Distribución y Usos de las Aguas Superficiales de la cuenca Decretado el 08 de abril del 2004.
Comité Hidráulico del DR 011. (Conagua-SRL- Módulos) Invitados: SDA, SADER, INIFAP y otros.	▪ Establece la asignación de volumen de agua para cada módulo de riego.	Usa como criterio de distribución la parte proporcional a la superficie consignada en los Títulos de Concesión de Agua Superficial.
Módulos de Riego	▪ Elaboran un Plan de Riego.	▪ SRL: revisa e integra. ▪ Comité Hidráulico: Valida. ▪ CONAGUA: Autoriza.
▪ Jefatura de Distrito. ▪ SRL. ▪ Módulos de riego. ▪ Comité Hidráulico.	▪ Ejecutan y dan seguimiento al plan de riegos.	▪ La entrega de volumen de agua es en bloque. ▪ El sistema de demanda y suministro de agua se realiza por semana.

Fuente: Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

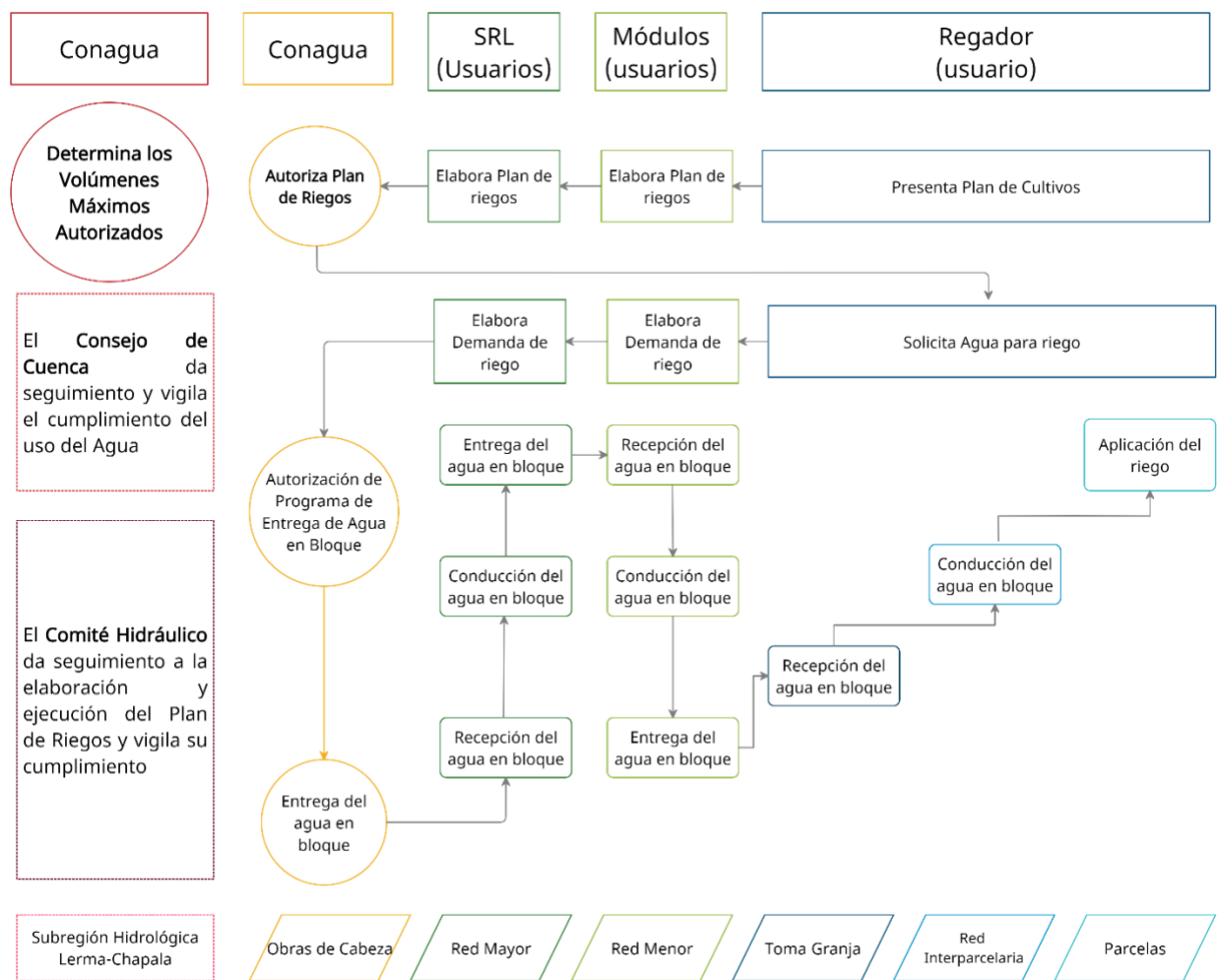


Figura 4.2. Participación del Gobierno Federal, SRL y los Usuarios en la Operación del Distrito de Riego 011 "Alto Río Lerma, Guanajuato.

4.1.6. Organización del Distrito de Riego 011

4.1.6.1. Inicios

El Distrito de Riego nació en la época colonial, cuando en 1548, Gray Diego de Chávez conformó la primera gran obra importante de irrigación en América Latina, con aguas de la Laguna de Yuriria, posteriormente, en marzo de 1939 se publicó el Decreto de creación del Distrito de Riego No. 11 Alto Río Lerma, Guanajuato y Michoacán.

Hasta antes de la transferencia de los distritos de riego a los usuarios, la administración y operación de los distritos era en Unidades de riego, las que a su vez se subdividían en Zonas de Aforador y estas en Secciones de Riego. La delimitación y

subdivisión estaba en función de la superficie bajo riego y la cantidad de usuarios que recibían el servicio. Bajo este sistema se buscaban condiciones adecuadas que permitieran la correcta operación, distribución y entrega del agua en la parcela, así como el desalojo de aguas sobrantes y trabajos de conservación de obra. El esquema funcionaba, sin embargo, se enfrentaba a infraestructura en deplorable estado y la falta de fondos para su mantenimiento.

En 1990, la Comisión Nacional del Agua inició el proceso de transferencia, lo que demandó que los distritos de riego se dividieran en “Módulos”, de esta forma estos se encargarían de la infraestructura y facilitarían la entrega, medición y distribución del agua, así como la conservación de las obras. Los usuarios de cada Módulo se organizaron en Asociaciones Civiles, para hacerse cargo de la operación, conservación y administración de las redes secundarias de canales y drenes, de sus caminos y demás infraestructura comprendida dentro de los límites del módulo, así como de la maquinaria que se le asignó para la conservación de obras. Y finalmente, a cada Asociación Civil se le entregó un título de concesión para el uso de obras de infraestructura hidráulica, quedando en condiciones legales para operar, conservar y administrar sus obras.

4.1.6.2. Estructura de los Módulos de Riego del DR011

En noviembre de 1992, después de múltiples reuniones con líderes y miembros de los ejidos y pequeños propietarios, se concesiona la red menor de la infraestructura hidráulica del Distrito de Riego 011 a los usuarios, los cuales se organizaron en once Asociaciones Civiles de Usuarios (Módulos).

Con la finalidad salvaguardar la heterogeneidad de los módulos, la división se realizó con base en la infraestructura, la superficie y el número de usuarios, garantizando de esta forma que el equipo técnico junto con la mesa directiva fuese capaz de manejar la infraestructura y asegurar el funcionamiento del módulo, sin embargo, por imposiciones del relieve y condiciones físicas existieron módulos más grandes que otros, como es el caso Salvatierra, Cortázar, Salamanca y Abasolo mientras que los módulos La Purísima, Huanímaro y Corralejo resultaron con una superficie limitada.

El nombramiento de los once módulos en el Distrito se realizó acorde a su localización hidráulica, es decir comenzando de aguas arriba hacia aguas abajo, quedando de esta forma: I-Acámbaro, II-Salvatierra, III-Jaral, IV-Valle de Santiago, V-Cortázar, VI-Salamanca, VII-Irapuato, VIII-Abasolo, IX-Huanímaro, X-Corralejo y XI-La Purísima. Los primeros nueve se riegan por gravedad con agua originaria de la Presa Solís; el módulo X- Corralejo, se abastece de las aguas del Río Turbio; con permanentes riegos auxiliares provenientes de la Presa Solís, haciendo uso del Canal Coria y el Dren Munguía, y finalmente, el módulo XI-La Purísima, se abastece de las aportaciones del Río Guanajuato y la Presa del mismo nombre.

4.1.6.3. Organización operativa de los Módulos de Riego

Dentro de las Asociaciones Civiles (Módulos), se integraron cinco niveles que desde el punto de vista organizacional de la siguiente forma:

- **Primer nivel:** Asamblea General de delegados de los Sectores Ejidal y de la Pequeña Propiedad, funge como el órgano máximo de autoridad y su asamblea se renueva periódicamente. Los “delegados” son los representantes de cada ejido o pequeña propiedad que conforman el Módulo de riego.
- **Segundo nivel:** Consejo Directivo, está integrado por un presidente, un secretario, un tesorero y tres vocales. El Consejo acata los acuerdos de la Asamblea General y atiende las funciones de gestión, organización, administración y desarrollo del Módulo.
- **Tercer nivel:** Gerente operativo.
- **Cuarto nivel:** Jefatura de Operación, la Jefatura de Conservación y la Jefatura de Administración.
- **Quinto nivel:** Equipo técnico y administrativo, en este se encuentra el staff administrativo, así como canaleros, operadores de maquinaria, brigadistas, peones y demás personal que hace posible el funcionamiento del Distrito de Riego, bajo la supervisión y vigilancia de la Mesa Directiva.

Cabe señalar que el Consejo Directivo (segundo nivel), en busca hacer más democrática la participación de los usuarios del módulo, se renueva cada tres años, sin embargo, esta operación ha frenado el desarrollo del Módulo, pues al contratarse nuevo personal se rompe con el seguimiento y aprendizaje adquirido por la administración pasada.

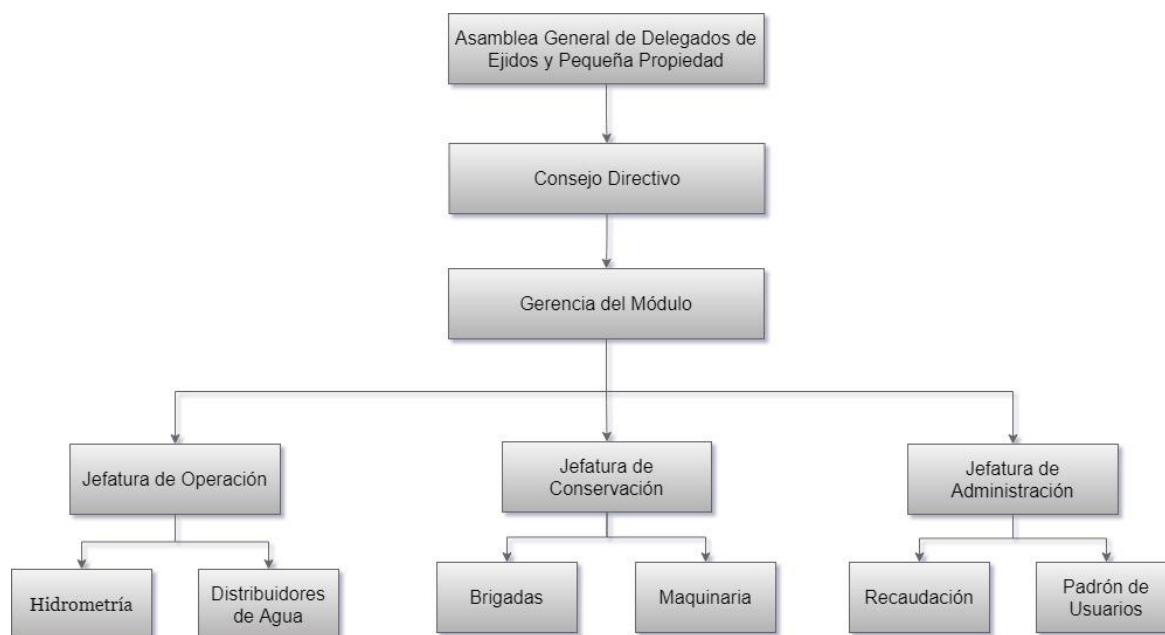


Figura 4.3. Organización de las Asociaciones Civiles de Usuarios (Módulos de Riego) del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

4.1.6.4. Estructura operativa de la Sociedad de Responsabilidad Limitada

Poco más de cuatro años después de la transferencia del Distrito de Riego a los usuarios, el 10 de diciembre de 1996, se constituye la Responsabilidad Limitada (SRL): D.R.011 Río Lerma, Gto., Sociedad de Responsabilidad Limitada de Interés Público y Capital Variable (S.R.L., de IP. de C.V.), la cual, a partir de febrero de 1997, se le otorga por parte de la Comisión Nacional del Agua, la concesión de la red mayor (presas derivadoras, canales y drenes principales) de la infraestructura hidráulica, quedando la Conagua como responsable únicamente de las obras de cabeza del Distrito de Riego, de esta forma se consolida el proceso de transferencia, siendo el DR011 el primer distrito transferido en el país (Torres *et al*, 2018), de esta forma la SRL asume la operación conservación y administración de la red mayor para la entrega de agua en bloque a cada una de las asociaciones.

La Sociedad de Responsabilidad Limitada tiene una organización operativa similar a la de los Módulos de riego, donde la máxima autoridad es la Asamblea General de Directivos (usuarios delegados), la cual es representada por los tres integrantes del Consejo de Administración (Presidente, Secretario y Tesorero) de cada uno de los once módulos del Distrito de Riego y de estos miembros se deriva el Consejo de Administración del DR011, es decir, para ser parte del Consejo Directivo de la SRL, es requisito pertenecer al Consejo de Administración de algún Módulo y estos pueden durar a su cargo cuatro años pudiendo reelegirse un periodo más (Torres *et al.*, 2018)

La organización de la SRL cuenta de igual forma con una Gerencia y sus departamentos de operación, conservación y administrativo que se encargan de distribuir el agua entre los once módulos, dar conservación y el mantenimiento a las redes mayores de canales y drenes, así como de cobrar las cuotas por servicio de riego y administrarlas, para pagar a la Conagua la parte que le corresponde por el suministro del agua en bloque.

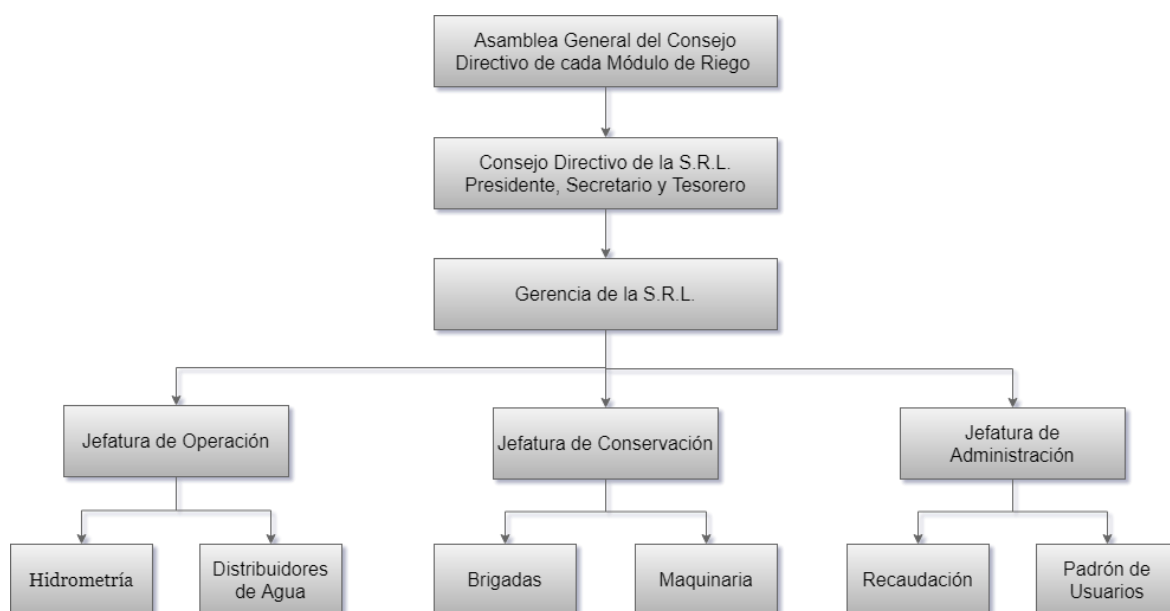


Figura 4.4. Organización de las Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL) del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

4.2. Materiales

El proyecto de investigación se generó a partir de la siguiente información para el ciclo agrícola 2019-2020:

Cuadro 4.13. Información requerida para elaboración del proyecto de investigación.

Tipo de Información	Datos requeridos
Hidrológica	• Serie histórica de aportaciones mensuales del Río Lerma para un periodo de sesenta y seis años.
Operación de los Distritos de Riego:	• Características de Diseño de las Presas, canales principales y zonas de riego. • Fuentes de abastecimiento. • Capacidad de almacenamiento de las presas (hm³). • Superficie total de riego (ha). • Volumen de agua disponible en el año agrícola (hm³). • Volúmenes de Riego mensuales (m³). • Láminas servidas mensualmente a los cultivos (cm). • Áreas regadas mensualmente (ha) • Eficiencias de Conducción mensuales (%)
Producción Agrícola y Costos de producción	• Patrón de cultivos explotados en los últimos 15 años. • Rendimientos (ton/ha). • Superficies cosechadas (ha). • Precios Medios Rurales (\$). • Valor de la producción (\$). • Costos de Producción (\$).

Fuente: Elaboración propia.

El material recabado, así como informes y bases de datos utilizados en la investigación, fueron proporcionados por la Coordinación de Operación Hidráulica de la Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL) y la Jefatura del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato.

4.3. Metodología

El planteamiento del MPL inició con la estructuración de la información e identificación de variables de salida y entrada, en este caso, el área de cada cultivo, se definió, en hectáreas, con la variable X_i . Una vez definidas las variables a optimizar, se prosiguió a

establecer la función objetivo y calcular sus coeficientes, la función objetivo se representó con la ecuación matemática (4.1) que se detalla más adelante. Posteriormente, se determinaron las restricciones en el uso de recursos, las cuales se representaron como desigualdades del tipo mayor o igual que ($\geq$) y menor o igual que ($\leq$), así como restricciones de no negatividad.

Una vez formulado el MPL, se resolvió con el método simplex haciendo uso de la herramienta SOLVER instalada en la hoja de cálculo de Microsoft Excel®. Para encontrar una solución óptima del sistema, el MPL se corrió en un proceso iterativo hasta encontrar la solución que cumplió con todas las restricciones. La solución del MPL nos proporcionó el precio sombra del agua, y que representa, según Palacios & Exebio (2012), así como Caballer & Guadalajara (1998), la máxima cantidad de dinero que un usuario estaría dispuesto a pagar, sin que le genere pérdidas, por tener disponible una unidad de volumen adicional para la producción agrícola.

Con la finalidad de analizar cómo afectan los cambios de niveles de disponibilidad del agua en la planeación de la operación del Distrito de Riego 011 y los precios sombra, se plantearon tres escenarios donde se varió la disponibilidad de agua de acuerdo a tres niveles de probabilidad de excedencia esperadas como escurrimientos.

Para estimar los volúmenes disponibles a diferentes niveles de probabilidad de ocurrencia, se usó de la serie histórica de volúmenes anuales del Río Lerma de sesenta y seis años, acto seguido y con ayuda de la herramienta Excel se calcularon las funciones probabilidad Normal, Log-Normal, Gamma y Pearson III. Para seleccionar la función de distribución más adecuada, se calculó el error cuadrado mínimo de las distribuciones y se aplicaron las pruebas de bondad de ajuste chi cuadrada y Kolmogórov-Smirnov que, en su conjunto, determinaron que la función que mejor se ajustó a los valores empíricos fue la distribución Log Normal.

Finalmente, a partir de la función de distribución Log Normal, se estimaron los volúmenes disponibles al 25%, 50% y 75% de probabilidad de ocurrencia. De esta forma, al resolver el modelo para estos volúmenes, se obtuvieron: 1) Los beneficios esperados para cada volumen disponible a una determinada probabilidad; 2) El área total regada a partir de

un patrón de cultivos óptimos que maximizaba el ingreso neto de los productores; y finalmente, 3) Un conjunto de precios sombra a distintos niveles de disponibilidad. Establecimiento del modelo base.

4.3.1. Metodología para la elaboración del modelo de optimización del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma

La finalidad de este trabajo de investigación fue estimar el valor marginal del agua de riego, para lo cual se planteó un modelo de programación lineal (MPL) que optimizó el patrón de cultivos del año agrícola 2019-2020 en Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma (DR011), Guanajuato, el cual tuvo como objetivo maximizar el beneficio neto de los agricultores, sujeto a un conjunto de restricciones de disponibilidad de agua y tierra.

4.3.1.1. Función Objetivo

Matemáticamente el modelo puede representarse con la siguiente expresión:

$$(Max)BN = \sum_{i=1}^{30} (IB_i - C_i) X_i \quad (4.1)$$

Donde:

BN = Beneficio Neto (pesos, \$).

IB_i = Ingreso bruto por concepto de la venta de la cosecha del cultivo i por área unitaria, esto es el rendimiento por hectárea del cultivo i por el precio unitario del producto cosechado (pesos/ha).

C_i = Costo de producción por unidad de superficie del cultivo i (pesos/ha).

X_i = Área sembrada del cultivo i (ha).

i = número de cultivo en el plan de riego, $i = 1, 2, 3, \dots, 30$ (adimensional).

$IB_i - C_i$ = Utilidad neta, por hectárea del cultivo i (pesos/ha).

4.3.1.2. Restricciones

4.3.1.2.1. Restricción de superficie física en el Distrito de Riego

La restricción de disponibilidad de tierra se expresa con las ecuaciones (4.2) y (4.3). La ecuación (4.2) asegurará que la superficie de primeros cultivos (O-I, P-V y perennes) no cubran un área mayor que la disponible en el distrito; mientras que la ecuación (4.3) garantizará que la superficie de segundos cultivos, los cuales remplazarán a los cultivos de otoño-invierno, más la superficie de los primeros cultivos que continúen regándose cuando ya se han establecido los segundos cultivos, sea menor que la superficie total del distrito.

$$\sum_{i=1}^m X_i \leq T \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=k+1}^n X_i \leq T \quad (4.3)$$

Donde:

X_i = Área sembrada del cultivo i (ha).

T = Área total irrigable en el Distrito de Riego 011 (ha).

m = Número de primeros cultivos considerados en el DR011 (adimensional).

n = Número total de cultivos que se establecen en el DR011 (adimensional).

k = Número de cultivos de invierno en el DR011 (adimensional).

4.3.1.2.2. Restricciones de disponibilidad de agua

Las restricciones de uso de agua se representan con las ecuaciones (4.4) y (4.5). La primera asegura que, en ningún mes, la demanda de los cultivos sea mayor que la capacidad de derivación de agua de la obra de toma de la presa Solís a la red de conducción y, la segunda desigualdad restringe que el uso de agua total anual por los cultivos, sea mayor al agua disponible en el distrito.

$$\sum_{i=1}^{30} a_{ij} X_i \leq CO, (j = 1, 2, 3, \dots, 12) \quad (4.4)$$

$$\sum_{j=1}^{12} \sum_{i=1}^{30} A_i X_i \leq V_a \quad (4.5)$$

Donde:

X_i = Área sembrada del cultivo i (ha).

a_{ij} = Coeficientes unitarios de requerimiento de riego mensuales del cultivo i , en el mes j , expresado como una lámina (dm, que al multiplicar por el área en ha, resultan millares de m^3 , dam^3).

A_i = Requerimiento total anual de riego del cultivo i , resultado de la suma de los requerimientos mensuales de agua del cultivo i . expresado como una lámina (dm, que al multiplicar por el área en ha, resultan millares de m^3 , dam^3).

CO = Capacidad máxima mensual de la obra de toma (millares de m^3 , dam^3).

V_a = Volumen anual de agua disponible en el distrito de riego (millares de m^3 , dam^3).

j = número del mes ($j = 1, 2, \dots, 12$)

4.3.1.2.3. Restricción en la producción de los cultivos

Finalmente, la expresión (4.6), representa las diferentes restricciones a la producción de los cultivos, ya sea por condiciones de mercado y/o capacidad de procesamiento del DR011.

$$X_i \begin{matrix} > \\ = \\ < \end{matrix} R_i \quad (4.6)$$

Donde:

X_i = Área sembrada del cultivo i (ha).

R_i = Restricción en la producción del cultivo i , expresado en unidades de área (ha).

4.3.2. Metodología para la obtención de la demanda y disponibilidad en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma

4.3.2.1. Demanda

La planificación del riego en los distritos, implica un balance entre dos factores: la disponibilidad de agua y la demanda por parte de los usuarios y, dado que en el distrito la principal y mayor demanda de agua es el riego de los cultivos, se puede estimar la demanda de agua para riego en función de un patrón de cultivos y requerimientos de riego de cada cultivo a través de los coeficientes unitarios de riego.

4.3.2.1.1. Coeficientes unitarios de requerimiento de riego (CURR)

De acuerdo con Palacios & Exebio (1989), es posible estimar la demanda mensual de riego a través del patrón de cultivos haciendo uso de los coeficientes unitarios de requerimiento de riego bruto, los cuales se calculan con expresión (4.7) como la relación entre el volumen aplicado en un cultivo i en el mes j y la superficie total regada de dicho cultivo, afectada por la eficiencia de conducción del Distrito para el mes en cuestión.

$$a_{ij} = \frac{V_{ij} / \overline{ST}_{ij}}{\overline{Ec}_j} \quad (4.7)$$

Donde:

a_{ij} : Coeficiente de requerimiento de riego del cultivo i en el mes j (lámina de riego, m).

V_{ij} : Volumen mensual que en promedio se ha servido al cultivo i en el mes j (millares de m³).

$\overline{ST}_{ij}$: Superficie total que en promedio se ha regado del cultivo i por ciclo agrícola (ha).

$\overline{Ec}_j$: Eficiencia promedio de conducción del distrito en el mes j .

4.3.2.2. Disponibilidad

Dada la naturaleza aleatoria de los escurrimientos, no es posible conocer la disponibilidad de agua con la anticipación necesaria para la planeación del riego, situación crítica sobre todo en la época de estiaje que es cuando los reducidos caudales coinciden con la máxima demanda de riego (Palacios & Exebio, 2012). Dicho lo anterior, lo más que se puede hacer con fines de planeación, es estimar, a un nivel de probabilidad, el volumen que se puede disponer en el ciclo agrícola mediante probabilidades de escurrimiento.

4.3.2.2.1. Estimación de los volúmenes esperados a diferentes niveles de probabilidad

Para estimar los volúmenes disponibles para el DR011, a diferentes niveles de probabilidad, se siguió la metodología definida por Palacios y Exebio (1989).

4.3.2.2.1.1. Probabilidad Empírica.

Como es de mayor interés conocer la probabilidad de esperar un volumen total anual, el primer paso fue encontrar la probabilidad empírica de los volúmenes acumulados anualmente de la serie histórica del Río Lerma. El cálculo de la probabilidad empírica se realizó ordenando los volúmenes acumulados de mayor al menor para posteriormente estimar su probabilidad de ocurrencia, es decir, la probabilidad de un volumen sea menor o igual al observado, utilizando la fórmula de Weibull, la cual se representa con la ecuación (4.8) como:

$$Pb = \frac{m}{n + 1} \quad (4.8)$$

Donde:

- Pb = probabilidad de ocurrencia ($P(x \leq X)$).
- m = número de orden del dato x en una lista de mayor a menor.
- n = número total de datos.

4.3.2.2.1.2. Cálculo de las funciones de distribución de probabilidad

Una vez calculadas las probabilidades empíricas, se prosiguió a ajustar las aportaciones acumuladas a cuatro modelos de distribuciones estadística más comunes en hidrología: Normal, Log Normal, Gamma incompleta y Pearson III. El cálculo de las funciones de distribución de probabilidad, se realizó mediante funciones estadísticas incorporadas en la hoja de cálculo de Microsoft Excel®:

1. Para estimar la función de distribución de probabilidad Normal, se usó la función `DISTR.NORM.N(x,media,desv_estándar,acum)`, donde x es el valor cuya distribución desea obtener, *media*, es la media aritmética de la distribución, *desv_estándar*, es la desviación estándar de la distribución y *acum*, es un valor lógico que determina la forma de la función, para calcular la función de distribución acumulativa se usó el argumento *VERDADERO*.
2. Para estimar la función de distribución de probabilidad Log Normal, se usó la función `DISTR.LOGNORM(x,media,desv_estándar,acum)`, donde x es el valor cuya distribución desea obtener, *media*, es la media aritmética de los logaritmos naturales de X ; *desv_estándar*, es la desviación estándar de la distribución y *acum*, es un valor lógico que determina la forma de la función, para calcular la función de distribución acumulativa se usó el argumento *VERDADERO*.
3. Para estimar la función de distribución de probabilidad Gamma y Pearson III, se usó la función `DISTR.GAMMA.N(x,alfa,beta,acumulado)`, donde x es el valor cuya distribución desea obtener; *alfa* y *beta* son un parámetro de la distribución y *acum*, es un valor lógico que determina la forma de la función, para calcular la función de distribución acumulativa se usó el argumento *VERDADERO*.

El cálculo de los parámetros estadísticos de media, desviación estándar, coeficiente de variación y coeficiente de sesgo, así como los estimadores α y β , se realizaron con forme a las ecuaciones mostradas en la revisión de literatura título 3.5 *Probabilidad aplicada en la Hidrología*, secciones 3.5.4 *Parámetros y estimadores estadísticos* y 3.5.5 *Distribuciones de probabilidad*

4.3.2.2.1.3. Selección de la función de distribución

Para seleccionar la función de distribución que mejor se ajuste a los datos observados, se aplicaron cuatro evaluaciones: 1) Método gráfico; 2) Método del error cuadrático mínimo, así como las pruebas de bondad de ajuste 3) Chi cuadrada y prueba 5) Kolmogórov-Smirnov, ambos con un nivel de significancia 0.05. Para la ejecución de cada evaluación, se siguió el procedimiento y ecuaciones descritas en la revisión de literatura en la sección 3.5.6 *Selección de la función de probabilidad*.

Posteriormente, para seleccionar la función de distribución más adecuada se siguió la metodología descrita por Aparicio (1951), donde a cada prueba realizada se ha calificado, en este caso, con una escala del uno al cuatro, según el orden de acoplamiento que indicó cada evaluación, dando 1 al “mejor ajuste” y 4 al de “peor ajuste”.

4.3.2.2.1.4. Estimación del volumen disponible a partir de un nivel de probabilidad definido

Una vez seleccionada la función de distribución que mejor se ajusta a la serie histórica de datos del Río Lerma, se calculan los volúmenes correspondientes a los tres niveles de probabilidad de ocurrencia más comunes en hidrología, que son los cuartiles del 25, 50 y 75%.

Para el cálculo del volumen a partir de los niveles de probabilidad definidos (cuartiles), se usaron las siguientes funciones estadísticas incorporadas en la hoja de cálculo de Microsoft Excel®:

1. Para estimar los volúmenes con la función de distribución Normal, se usó la función `DISTR.NORM.INV(probabilidad,media,desv_estándar)`, donde *probabilidad*, es la probabilidad definida, *media*, es la media aritmética de la distribución y *desv_estándar*, es la desviación estándar de la distribución.
2. Para estimar los volúmenes con la función de distribución Log Normal, se usó la función `EXP(DISTR.NORM.INV (probabilidad,media,desv_estándar))`, donde `EXP()`, devuelve el inverso de los logaritmos.

3. Para estimar los volúmenes con la función de distribución Gamma y Pearson III, se usó la función `DISTR.GAMMA.INV( prob,alfa,beta)` donde *probabilidad*, es la probabilidad definida, *alfa* y *beta* son un parámetro de la distribución.

Los parámetros estadísticos de media, desviación estándar, coeficiente de variación y coeficiente de sesgo, así como los estimadores α y β utilizados, son los mismos que los estimados en el cálculo de las funciones de distribución de probabilidad.

4.3.3. Modelo Base y escenarios contruidos

Una vez recopilada y clasificada la información del ciclo agrícola 2019-2020 se definió al patrón de cultivos real del DR011 como *Real 2019-2020*, y a partir de este, se construye el Modelo de Programación Lineal Base, al cual se catalogó como *MPL Base*, entonces:

Real 2019-2020	Patrón real de cultivos en el año agrícola 2019-2020, sujeto a la disponibilidad real de tierra y agua en el DR011.
MPL Base	Patrón de cultivos optimizado a través del modelo de programación lineal.

Con la finalidad de analizar cómo afectan las variaciones de disponibilidad del agua en la valoración económica del agua y la planeación de la operación del Distrito de Riego 011, se plantearon tres escenarios, los cuales partiendo del MPL Base, la restricción de volumen anual de agua disponible en el DR011 se varió de acuerdo a los volúmenes estimados con los cuartiles 25%, 50% y 75%, los escenarios se definieron como MPL 01, MPL 02 y MPL03 correspondientemente, tal como se muestra a continuación:

- MPL 01** La restricción de volumen anual se remplaza por un volumen disponible anual estimado a una probabilidad de ocurrencia del 25%. Simula un año seco.
- MPL 02** La restricción de volumen anual se remplaza por un volumen disponible anual estimado a una probabilidad de ocurrencia del 50%. Supone un año normal.

MPL 03 La restricción de volumen anual se reemplaza por un volumen disponible anual estimado a una probabilidad de ocurrencia del 75%. Describe un año húmedo.

De esta forma, el MPLBase se resuelve considerando, en las restricciones, el volumen anual esperado para cada cuartil, obteniendo una secuencia de beneficios netos, el área total regada, un patrón de cultivos óptimos que maximiza el ingreso neto de los productores; y un conjunto de precios sombra a distintos niveles de disponibilidad.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL

El capítulo de resultados y discusión se divide en siete secciones. En el primer apartado se presentan los resultados sobre el patrón de cultivos y estadísticas de producción del Distrito de Riego Alto Rio Lerma 011 y en el segundo, se describe el planteamiento de programación lineal.

En el tercer segmento, se muestran las estadísticas de volúmenes de agua correspondientes al año agrícola 2019-2020 del Distrito de Riego Alto Rio Lerma 011, información que corresponde a un año de escasez de agua. Así mismo se detallan los resultados de la estimación de la demanda a partir de los coeficientes de unitarios de requerimientos de riego del patrón de cultivos a nivel mensual, así como los de la estimación de disponibilidad de agua con base en la probabilidad de ocurrencia de los volúmenes disponibles de aportaciones al vaso a un 25, 50 y 75% que corresponden a un año seco normal y húmedo.

En el cuarto apartado se compara la situación del año agrícola con escasez de agua 2019-2020 contra los resultados del mismo año optimizados con el modelo de programación lineal (MPLBase). En el quinto y sexto, se analiza el beneficio neto obtenido, así como los patrones de cultivos resultantes, con los volúmenes mensuales y totales correspondientes a un nivel de probabilidad Log Normal de ocurrencia del 25, 50 y 75%. Por último, se aborda el valor del producto marginal o valor económica del agua estimado con MPL para cada uno de los escenarios, frente a la cuota por servicio de riego de 0.186 \$/m³ cobrado por el Distrito de Riego 011.

5.1. Patrón de cultivos y estadísticas de producción

Del análisis de la información recabada sobre superficies sembradas en los últimos quince años en el DR011, se obtuvo que los cultivos más representativos son, en el ciclo Otoño-Invierno (O-I), el trigo y cebada, para el ciclo Primavera-Verano (P-V), el maíz y sorgo; en caso de los cultivos perennes, los más importantes son alfalfa y espárrago, mientras que los segundos cultivos más significativos son el maíz y sorgo; en su conjunto estos cultivos abarcan cerca del 96.33% superficie. En el Cuadro 5.1 se puede apreciar con más detalle en el porcentaje de participación de los principales cultivos del DR011.

Cuadro 5.1. Superficie Sembrada (ha) y porcentaje de participación de los principales cultivos del Distrito de Riego 011.

Ciclo	Cultivo	Superficie sembrada (ha)	Participación en el DR011 (%)
OTOÑO – INVIERNO (O-I)	Trigo	295,125.12	21.63%
	Cebada	215,505.12	15.79%
	Frijol	4,752.89	0.35%
	Garbanzo	4,302.51	0.32%
	Tomate	3,733.01	0.27%
	Avena f.	2,199.48	0.16%
	Maíz	1,404.89	0.10%
	Zanahoria	946.74	0.07%
	Brócoli	931.20	0.07%
	Cebolla	822.97	0.06%
	Camote	260.29	0.02%
	Cacahuete	230.02	0.02%
	Calabacita	192.62	0.01%
	Chile	165.32	0.01%
	Cilantro	113.13	0.01%
	Lechuga	86.42	0.01%
	Ajo	29.96	0.00%
	Otros	74.26	0.01%
	TOTAL O-I	530,875.95	38.90%
PRIMAVERA-VERANO (P-V)	Maíz	160,641.09	11.77%
	Sorgo	152,274.89	11.16%
	Trigo	5,546.35	0.41%
	Cebada	4,519.78	0.33%
	Cacahuete	4,486.37	0.33%
	Frijol	4,258.94	0.31%
	Tomate	2,060.14	0.15%
	Garbanzo	1,697.45	0.12%
	Camote	917.99	0.07%
	Avena f.	398.05	0.03%
	Cebolla	383.79	0.03%
	Zanahoria	283.13	0.02%
	Brócoli	205.60	0.02%
	Calabacita	175.40	0.01%
	Otros	432.89	0.03%
	TOTAL P-V	338,281.86	24.79%
PERENNES (P)	Alfalfa	20,682.06	1.52%
	Esparrago	19,387.04	1.42%
	Nopal	2,103.14	0.15%
	Otros	271.13	0.02%
	TOTAL PERENNES	42,443.37	3.11%
SEGUNDOS CULTIVOS	Sorgo	281,442.34	20.62%

Ciclo	Cultivo	Superficie sembrada (ha)	Participación en el DR011 (%)
(SC)	Maíz	169,576.94	12.43%
	Frijol	1,158.29	0.08%
	Otros	889.47	0.07%
	TOTAL SC	453,067.04	33.20%
TOTAL GENERAL		1,364,668.22	100.0%

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

Del mismo análisis, al graficar las superficies regadas, Figura 5.1, se encontró que en promedio la superficie regada, del 2005 al 2020, fue de 90,977.88.

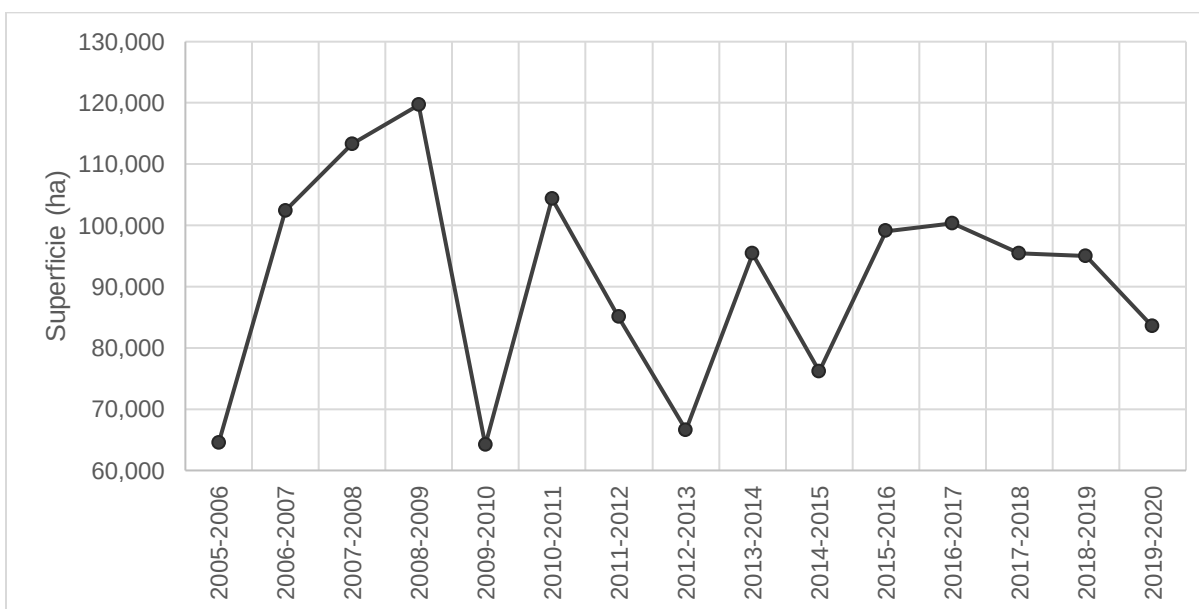


Figura 5.1. Relación histórica de la superficie sembrada en el DR011 Alto Río Lerma.

En la Figura 5.1, se muestra que en los ciclos 2005-2006, 2009-2010 y 2012-2013, las superficies sembradas fueron menores a 70 mil hectáreas, lo cual se debió a las sequías que afrontó el país durante esos años, recordemos que, la superficie regada en el Distrito está en función del volumen de agua almacenado en las presas, y esto depende a su vez de las precipitaciones en cada año, por lo que un periodo de sequía afecta seriamente la superficie sembrada en el DR011.

5.2. Establecimiento de modelo de programación lineal

5.2.1. Elección del patrón de cultivos del MPL

Para construir el MPL, se eligieron los veintiún cultivos de mayor importancia económica y superficie dominada del año agrícola 2019-2020, que de acuerdo al análisis del comportamiento de la superficie sembrada en un periodo de quince años (2005-2020), son representativos del DR011 y no atípicos dentro del ciclo agrícola seleccionado.

Se seleccionaron doce cultivos del ciclo Otoño-Invierno (OI): ajo, avena forrajera, brócoli OI, cacahuete OI, cebada, cebolla OI, frijol OI, garbanzo OI, lechuga, tomate OI, trigo y zanahoria OI. De igual forma, doce cultivos del ciclo Primavera-Verano (PV): brócoli PV, cacahuete PV, calabacita, camote, cebolla PV, cilantro, frijol PV, garbanzo PV, maíz PV, sorgo PV, tomate PV y zanahoria PV. En el caso de perennes cuatro cultivos: alfalfa, espárrago, fresa y nopal; y finalmente, se consideraron como segundos cultivos (SC): maíz SC y sorgo SC. Los cultivos seleccionados se definieron con la variable X_i , donde i osciló de 1 a 30 de acuerdo al cultivo establecido, tal como se muestra en el Cuadro 5.2.

Un plan de riego convencional del DR011 inicia con los cultivos de O-I y al término de este, se replantea para cultivos de P-V y segundos cultivos, por lo tanto, en el MPL la superficie a sembrar en el DR011 se divide en dos áreas: superficies de primeros cultivos y superficies de segundos cultivos. Las superficies de primeros cultivos son aquellas que son ocupadas por primera vez en un año agrícola; en este caso los ciclos agrícolas O-I, P-V y perennes, por otra parte, las superficies de segundos cultivos, son aquellas que son ocupadas en un mismo año agrícola después de que se cosechó un cultivo de otoño-invierno.

Cuadro 5.2. Variables de decisión del modelo de programación lineal.

Ciclo	Variable	Cultivo
Otoño Invierno	X_1	Ajo
	X_2	Avena F.
	X_3	Brócoli OI
	X_4	Cacahuete OI
	X_5	Cebada
	X_6	Cebolla OI
	X_7	Frijol OI
	X_8	Garbanzo OI
	X_9	Lechuga
	X_{10}	Tomate OI
	X_{11}	Trigo
	X_{12}	Zanahoria OI
Primavera Verano	X_{13}	Brócoli PV
	X_{14}	Cacahuete PV
	X_{15}	Calabacita
	X_{16}	Camote
	X_{17}	Cebolla PV
	X_{18}	Cilantro
	X_{19}	Frijol PV
	X_{20}	Garbanzo PV
	X_{21}	Maíz PV
	X_{22}	Sorgo PV
	X_{23}	Tomate PV
	X_{24}	Zanahoria PV
Perennes	X_{25}	Alfalfa
	X_{26}	Espárrago
	X_{27}	Fresa
Segundos Cultivos	X_{28}	Nopal
	X_{29}	Maíz SC
	X_{30}	Sorgo SC

Fuente: Elaboración propia, con información del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma para el ciclo 2019-2020.

5.2.1. Cálculo de los coeficientes de la función objetivo

A cada cultivo seleccionado para construir el MPL se le estimó la utilidad neta, la cual se calculó, como la diferencia entre el ingreso bruto generado por cada cultivo y el costo total de producción de cada uno. El ingreso bruto es el producto del rendimiento promedio por el precio de mercado regional mensual promedio durante el mes de la cosecha; mientras que el costo total se obtiene de sumar los costos de preparación del terreno, siembra o plantación, fertilización, labores culturales, riego y drenaje y cosecha y

acarreo. En todos los casos se le restó el costo de los servicios del riego por ser uno de los parámetros a estimar con el modelo.

Para el cálculo del ingreso bruto y costos, se utilizaron precios, rendimientos y costos de producción proporcionados por la SRL del DR011 durante ciclo agrícola 2019-2020. En el Cuadro 5.3 se muestran los valores medios, así como los precios medios rurales y beneficio neto esperado por cultivo.

Cuadro 5.3. Precios netos de las actividades de cultivo del modelo.

Cultivo	Costos de Producción (\$)	Rendimiento (ton/ha)	Precio Medio Rural (\$/ton)	Ingreso Bruto (\$/ha)	Beneficio Neto (\$/ha)
Ajo	130,848.00	11.34	26,122.36	296,227.56	165,379.56
Avena F.	17,417.50	12.95	2,058.82	26,656.49	9,238.99
Brócoli OI	59,191.58	14.64	\$6,100.00	89,275.26	30,083.68
Cacahuatate OI	43,210.00	3.65	17,856.80	65,177.32	21,967.32
Cebada	24,523.00	5.35	5,500.00	29,418.29	4,895.29
Cebolla OI	64,919.43	29.57	4,453.87	131,693.99	66,774.56
Frijol OI	28,060.00	1.68	26,699.18	44,937.46	16,877.46
Garbanzo OI	15,306.67	1.80	18,000.00	32,400.00	17,093.33
Lechuga	36,990.00	20.00	2,500.00	50,000.00	13,010.00
Tomate OI	61,865.00	20.00	8,000.00	160,000.00	98,135.00
Trigo	25,134.50	5.50	5,800.00	31,900.00	6,765.50
Zanahoria OI	25,100.06	34.93	1,161.98	40,590.06	15,490.00
Brócoli PV	59,308.00	29.94	3,400.00	101,796.00	42,488.00
Cacahuatate PV	45,225.00	4.17	15,212.62	63,436.63	18,211.63
Calabacita	57,090.00	11.90	6,000.00	71,400.00	14,310.00
Camote	21,920.00	15.49	4,835.00	74,896.46	52,976.46
Cebolla PV	57,368.00	35.44	3,745.86	132,768.52	75,400.52
Cilantro	15,340.00	4.00	10,000.00	40,000.00	24,660.00
Frijol PV	26,837.00	1.89	22,745.28	43,006.52	16,169.52
Garbanzo PV	13,362.17	1.80	16,000.00	28,800.00	15,437.83
Maíz PV	29,882.50	11.00	4,501.25	49,513.78	19,631.28
Sorgo PV	23,800.00	8.21	4,300.00	35,282.26	11,482.26
Tomate PV	61,865.00	25.00	9,000.00	225,000.00	163,135.00
Zanahoria PV	25,470.00	25.00	1,700.00	42,500.00	17,030.00
Alfalfa	28,637.33	12.00	3,500.00	42,000.00	13,362.67
Espárrago	117,140.00	3.14	47,820.00	150,154.80	33,014.80
Fresa	189,700.00	31.24	9,000.00	281,164.72	91,464.72
Nopal	73,195.00	13.00	12,000.00	156,000.00	82,805.00
Maíz SC	27,222.50	9.91	4,500.00	44,596.96	17,374.46
Sorgo SC	23,732.22	7.21	4,400.00	31,709.70	7,977.48

Fuente: Elaboración propia, con información del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma para el ciclo 2019-2020.

5.2.1.1. Establecimiento de restricciones

Con la finalidad de crear escenarios lo más cercano posible a la realidad, se han incluido 62 restricciones que condicionan la disponibilidad de recursos, la cuales enumeran a continuación:

- 2 restricciones de uso de superficie, que aseguran que los primeros y segundos cultivos, no sobrepasen el área disponible en el Distrito de Riego.
- 12 restricciones de requerimiento de riego mensuales, que asegurarán que en ningún mes la demanda de agua será mayor que la capacidad de derivación de agua a la red de conducción.
- 1 restricción de volumen de agua anual, la cual evita que el uso de agua de los cultivos rebase el volumen disponible en el año agrícola.
- 47 restricciones de producción de cultivo, las cuales representan la superficie máxima y mínima sembrada por cultivo en el ciclo agrícola.

5.2.1.1.1. Restricción de superficie física en el Distrito

De acuerdo con la información proporcionada por DR011, la superficie total dominada es de 112,439.05 hectáreas, de las cuales 76,709 hectáreas se encuentran bajo riego por gravedad, por lo que ésta última será la superficie máxima a sembrar en el Distrito.

5.2.1.1.2. Restricción de volumen de agua disponible anual

El MPL Base se construyó con el total de volumen bruto extraído (hm^3) en el año agrícola 2019-2020, que de acuerdo con las estadísticas proporcionadas por el SRL del Distrito de Riego 011, fue de 505.351 hm^3 .

La restricción de volumen disponible anual de los escenarios planteados, se construyeron con los volúmenes estimados a un nivel de probabilidad del 25, 50 y 75%, los cuales se presentarán más adelante.

5.2.1.1.3. Restricciones de volumen disponible mensual

La demanda mensual de riego se determinó con base en la capacidad de la obra de toma de la Presa Solís que de acuerdo con el Sistema de Seguridad de Presas es de 90 m^3/s

(Conagua, 2021), que equivalen a 233.280 hm³ al mes, el cual será el volumen máximo mensual que conduce la red de canales del Distrito de Riego 011.

5.2.1.1.4. Restricciones a la producción de cultivos

Para evitar sesgos en los resultados arrojados por el MPL, se optó por establecer restricciones de máximos y mínimos en la producción de cultivos. En cultivos básicos, como la avena forrajera, cebada, frijol, sorgo y trigo, se estableció una superficie mínima que aseguré el suministro de dichos cultivos en el DR011. Por otro lado, para garantizar que el MPL no destine toda la superficie disponible a un cultivo en particular, se colocaron restricciones de tope, es decir, se limitó la superficie máxima que se le puede asignar a cada cultivo. Así mismo, dado que ciertos cultivos se siembran en dos ciclos, ya sea O-I y P-V o P-V y SC, se han colocado, en el caso de frijol y sorgo una superficie mínima a asignar por el modelo para garantizar abasto y, un tope de superficie máxima para los cultivos de brócoli, cacahuete, cebolla, garbanzo, maíz, tomate y zanahoria, con el fin de que la suma de ambos ciclos no sobrepase la máxima superficie sembrada a lo largo de los últimos cinco años en el DR011.

Las restricciones de superficie máxima y mínima, se realizaron con base en la tendencia histórica registrada en los últimos cinco años en el Distrito de Riego 011, lo anterior con la finalidad de obtener congruencia en las superficies sembradas en los últimos años dentro de la zona dominada por el DR011 Alto Río Lerma.

Cuadro 5.4. Superficie (ha) máximas y mínimas a sembrar el siguiente ciclo agrícola.

Var	Cultivo	Mínimo	Máximo	Var	Cultivo	Mínimo	Máximo
X ₁	Ajo	0.00	100.20	X ₂₁	Maíz PV	0.00	28,827.02
X ₂	Avena F.	291.02	291.02	X ₂₂	Sorgo PV	1,787.32	3,219.70
X ₃	Brócoli OI	0.00	62.10	X ₂₃	Tomate PV	0.00	240.84
X ₄	Cacahuete OI	0.00	55.39	X ₂₄	Zanahoria PV	0.00	51.69
X ₅	Cebada	4,838.32	23,661.17	X ₂₅	Alfalfa	1,896.64	2,146.55
X ₆	Cebolla OI	0.00	139.45	X ₂₆	Espárrago	0.00	2,456.63
X ₇	Frijol OI	0.00	880.27	X ₂₇	Fresa	0.00	372.86
X ₈	Garbanzo OI	0.00	423.16	X ₂₈	Nopal	0.00	215.59
X ₉	Lechuga	0.00	24.87	X ₂₉	Maíz SC	0.00	24,702.09
X ₁₀	Tomate OI	0.00	437.83	X ₃₀	Sorgo SC	6,829.78	18,245.04
X ₁₁	Trigo	15,731.14	29,959.82	-	Brócoli Total	0.00	71.05
X ₁₂	Zanahoria OI	0.00	172.44	-	Cacahuete Total	0.00	399.38
X ₁₃	Brócoli PV	0.00	23.31	-	Cebolla Total	0.00	76.01
X ₁₄	Cacahuete PV	0.00	551.39	-	Frijol Total	462.23	1,186.47
X ₁₅	Calabacita	0.00	26.52	-	Garbanzo Total	0.00	546.25
X ₁₆	Camote	0.00	62.60	-	Maíz Total	0.00	44,697.72
X ₁₇	Cebolla PV	0.00	59.64	-	Sorgo Total	10,049.48	20,910.83
X ₁₈	Cilantro	0.00	14.75	-	Tomate Total	0.00	654.00
X ₁₉	Frijol PV	0.00	338.91	-	Zanahoria Total	0.00	189.78
X ₂₀	Garbanzo PV	0.00	265.83				

Fuente: Elaboración propia, con información del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma para el ciclo 2019-2020.

5.2.1.2. Matriz de coeficientes técnicos

El modelo completo, con todos sus coeficientes resumidos se muestran en el Cuadro A.2, en el cual se exponen las 30 variables y 62 restricciones, además de la función objetivo. Este cuadro almacena los distintos parámetros usados tanto en la función objetivo como en las restricciones y al ser la matriz de coeficientes técnicos, nos permite actualizar rápida y convenientemente la información, así como aumentar o eliminar restricciones según sea el caso.

5.3. Estimación de la demanda y disponibilidad de agua

5.3.1. Demanda

La estimación de la demanda volumétrica de agua que será necesario derivar de la fuente de abastecimiento para cada periodo y en todo el año agrícola, se realizó a partir de los

coeficientes unitarios de requerimiento de riego. El cálculo de los coeficientes se realizó con base en la información estadística de los volúmenes servidos por cultivo, las superficies totales anuales de cada cultivo y eficiencias de conducción mensuales en el Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma.

En el Cuadro 5.5 se muestra los coeficientes netos obtenidos, así como las eficiencias mensuales reportadas en el DR011 en el periodo 2019-2020, mientras que en el Cuadro 5.6, se muestran los coeficientes a_{ij} para cada mes y A_i anuales del patrón de cultivos seleccionado.

Cuadro 5.5. Coeficientes mensuales de requerimiento neto de riego en el DR011. Ciclo agrícola 2019-2020.

Var.	Cultivo	Oct	Nov	Dic	Ene	M Feb	E Mar	S Abr	E May	S Jun	Jul	Ago	Sep	Total Anual
X ₁	Ajo			2.122	2.070	2.496	1.676							8.364
X ₂	Avena F.			0.823	1.581	1.420	0.642	0.046	0.037					4.549
X ₃	Brócoli OI			2.332	2.033	2.000	2.113	0.937	0.202	0.207				9.825
X ₄	Cacahuatate OI				2.416	0.184	0.110	0.562	0.299					3.570
X ₅	Cebada			1.277	1.090	1.532	1.928	0.084						5.911
X ₆	Cebolla OI			0.623	2.661	0.897	1.190	0.221	0.219	0.210				6.023
X ₇	Frijol OI			0.501	1.734	0.207	2.303	3.530	1.938	0.096				10.308
X ₈	Garbanzo OI			0.673	1.530	0.033	0.158	0.042	0.024	0.031				2.489
X ₉	Lechuga			1.475	0.630	1.072	0.407							3.583
X ₁₀	Tomate OI			1.029	1.331	0.781	3.655	2.088	0.157					9.041
X ₁₁	Trigo			1.213	1.225	1.375	2.510	0.725	0.006					7.055
X ₁₂	Zanahoria OI			2.077	1.925	2.534	2.271	0.581	0.147					9.536
X ₁₃	Brócoli PV					1.710	1.731	1.293	0.536					5.270
X ₁₄	Cacahuatate PV					0.341	0.786	1.378	0.359	0.738				3.603
X ₁₅	Calabacita					0.220	0.122	2.042	1.537	1.002				4.923
X ₁₆	Camote						0.262	2.216	0.702	0.536				3.715
X ₁₇	Cebolla PV					0.907	2.079	1.163	1.151	0.024				5.325
X ₁₈	Cilantro						0.472	0.854	1.589	1.571				4.487
X ₁₉	Frijol PV					0.425	0.934	3.063	1.754	0.699				6.876
X ₂₀	Garbanzo PV					1.189	0.637	0.691	0.299	0.016				2.832
X ₂₁	Maíz PV					0.016	0.408	1.154	1.289	0.853	0.313	0.082		4.115
X ₂₂	Sorgo PV						0.102	1.296	1.217	0.760	0.352	0.126		3.854
X ₂₃	Tomate PV					0.214	1.279	2.879	0.282	0.015				4.670
X ₂₄	Zanahoria PV					1.778	0.963	1.141	0.351					4.234
X ₂₅	Alfalfa			0.468	0.658	0.665	1.097	1.397	0.995	0.533	0.005	0.001		5.819
X ₂₆	Espárrago			0.006	0.039	0.119	0.039	0.588	0.708	1.152	0.107	0.030		2.788
X ₂₇	Fresa			3.507	2.874	3.904	4.070	2.127	2.835	1.448	1.252	1.263		23.280
X ₂₈	Nopal			0.135	0.056	0.076	0.093	1.045	0.872	0.133	0.004			2.413
X ₂₉	Maíz SC						0.004	0.064	1.429	0.773	0.306	0.045		2.620
X ₃₀	Sorgo SC							0.010	1.355	0.755	0.163	0.015		2.298

Var.	Cultivo	Oct	Nov	Dic	Ene	M Feb	E Mar	S Abr	E May	S Jun	Jul	Ago	Sep	Total Anual
	Total mensual	0.0	0.0	18.261	23.852	26.095	34.041	33.218	22.290	11.554	2.501	1.563	0.0	173.376
	Eficiencia	0%	0%	73%	82%	79%	75%	66%	71	79%	65%	62%	0%	

Fuente: Elaboración propia, con información del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma para el ciclo 2019-2020.

Cuadro 5.6. Coeficientes mensuales de requerimiento bruto de riego en el DR011. Ciclo agrícola 2019-2020.

Variable	Cultivo	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	M Feb.	E Mar.	S Abr	E May.	S Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Total Anual
X ₁	Ajo			2.893	2.537	3.141	2.249							10.821
X ₂	Avena F.			1.122	1.938	1.787	0.862	0.069	0.052					5.831
X ₃	Brócoli OI			3.179	2.492	2.518	2.836	1.415	0.285	0.263				12.988
X ₄	Cacahuatate OI				2.961	0.231	0.148	0.848	0.423					4.612
X ₅	Cebada			1.740	1.336	1.929	2.587	0.127						7.720
X ₆	Cebolla OI			0.850	3.262	1.129	1.597	0.334	0.310	0.266				7.749
X ₇	Frijol OI			0.683	2.125	0.260	3.091	5.332	2.742	0.121				14.354
X ₈	Garbanzo OI			0.917	1.875	0.041	0.212	0.063	0.034	0.040				3.181
X ₉	Lechuga			2.010	0.772	1.349	0.546							4.677
X ₁₀	Tomate OI			1.403	1.632	0.983	4.905	3.154	0.223					12.299
X ₁₁	Trigo			1.654	1.502	1.731	3.369	1.095	0.009					9.360
X ₁₂	Zanahoria OI			2.831	2.360	3.190	3.048	0.878	0.208					12.515
X ₁₃	Brócoli PV					2.152	2.324	1.954	0.758					7.187
X ₁₄	Cacahuatate PV					0.429	1.054	2.082	0.508	0.935				5.009
X ₁₅	Calabacita					0.277	0.163	3.084	2.175	1.268				6.969
X ₁₆	Camote						0.351	3.347	0.993	0.678				5.369
X ₁₇	Cebolla PV					1.142	2.791	1.757	1.629	0.031				7.349
X ₁₈	Cilantro						0.634	1.290	2.248	1.990				6.162
X ₁₉	Frijol PV					0.536	1.254	4.625	2.482	0.886				9.783
X ₂₀	Garbanzo PV					1.497	0.855	1.044	0.423	0.020				3.839
X ₂₁	Maíz PV					0.021	0.547	1.744	1.824	1.080	0.481	0.132		5.828
X ₂₂	Sorgo PV						0.137	1.958	1.722	0.962	0.541	0.204		5.524
X ₂₃	Tomate PV					0.270	1.717	4.349	0.399	0.019				6.754
X ₂₄	Zanahoria PV					2.238	1.293	1.724	0.497					5.752
X ₂₅	Alfalfa			0.638	0.806	0.837	1.472	2.109	1.409	0.676	0.008	0.001		7.956
X ₂₆	Espárrago			0.008	0.048	0.150	0.053	0.889	1.002	1.458	0.164	0.048		3.820
X ₂₇	Fresa			4.780	3.523	4.914	5.463	3.212	4.012	1.834	1.925	2.035		31.697
X ₂₈	Nopal			0.184	0.069	0.095	0.125	1.578	1.234	0.169	0.006			3.459
X ₂₉	Maíz SC						0.005	0.096	2.021	0.979	0.470	0.073		3.645
X ₃₀	Sorgo SC							0.015	1.917	0.956	0.251	0.025		3.163

Variable	Cultivo	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	M Feb.	E Mar.	S Abr	E May.	S Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Total Anual
	Total mensual	0.00	0.00	24.89	29.24	32.85	45.69	50.17	31.54	14.63	3.85	2.52	0.00	235.371

Fuente: Elaboración propia, con información del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma para el ciclo 2019-2020.

5.3.1. Disponibilidad

El volumen entregado a los usuarios (volumen bruto), está en función de la superficie regada y del patrón de cultivos, mientras que el volumen en punto de control, canal lateral y toma directa (volumen neto), depende directamente de la eficiencia de conducción y de distribución en la red menor del Distrito de riego, es decir de los canales laterales, sublaterales y ramales.

En un análisis de los volúmenes brutos y netos en los últimos quince años en el DR011, se observó que el volumen bruto es notablemente inferior al volumen neto (Figura 5.2), lo cual se debe a tres razones principales, la primera y más importante, es la baja eficiencia de conducción y distribución de los canales de riego, la segunda son las pérdidas de agua por infiltración y evaporación, y finalmente, el alto uso consuntivo de los cultivos producidos en el distrito que en su mayoría son forrajes y granos.

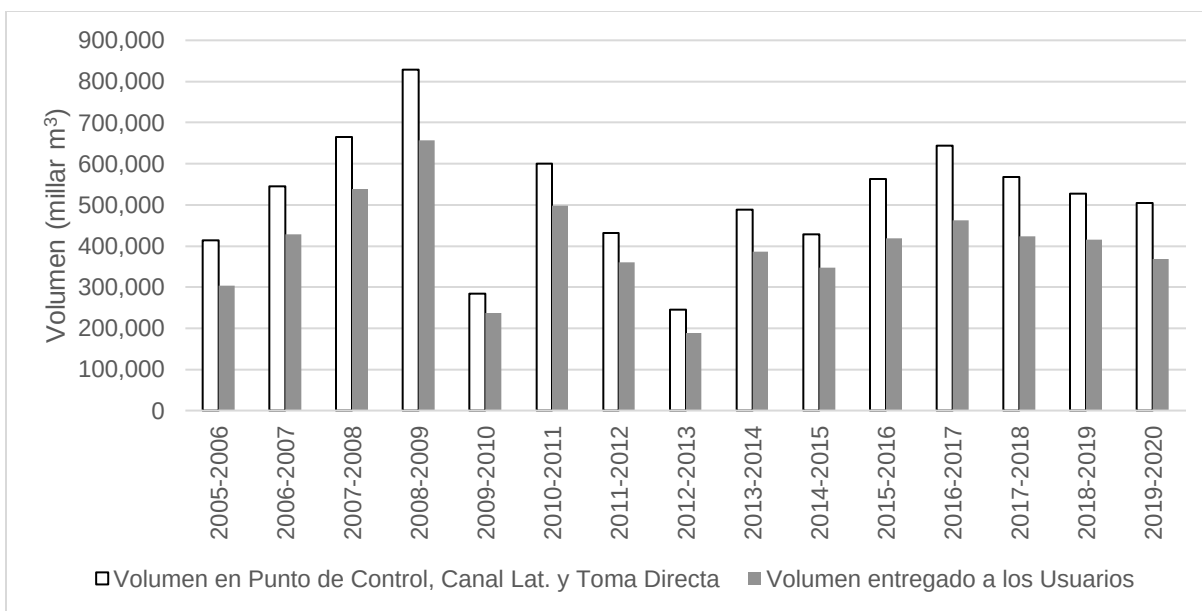


Figura 5.2. Relación histórica de volúmenes de agua superficial empleados en el DR011.

5.3.1.1. Estimación de volúmenes

La estimación de los volúmenes en el DR011 se calculó la probabilidad empírica de la serie histórica de volúmenes escurridos en el Río Lerma observados en un periodo de 66 años, los cuales se muestran en el Anexo II Cuadro A.7.

Los resultados del cálculo de probabilidad de ocurrencia empíricas junto con sus probabilidades complementarias de que $x \leq X$ o $x \geq X$, se muestran en el Cuadro 5.7.

Cuadro 5.7. Probabilidades complementarias de los volúmenes anuales.

m	<i>Pb</i> ($x \leq X$)	<i>Pb</i> ($x \geq X$)	Vol. Total Anual
1	98.51	1.49	1,571.20
2	97.01	2.99	1,459.90
3	95.52	4.48	1,270.00
4	94.03	5.97	1,117.80
5	92.54	7.46	1,056.60
6	91.04	8.96	985.20
7	89.55	10.45	949.40
8	88.06	11.94	938.20
9	86.57	13.43	937.00
10	85.07	14.93	931.60
11	83.58	16.42	916.80
12	82.09	17.91	886.20
13	80.60	19.40	883.30
14	79.10	20.90	879.00
15	77.61	22.39	851.30
16	76.12	23.88	842.20
17	74.63	25.37	818.30
18	73.13	26.87	802.50
19	71.64	28.36	784.70
20	70.15	29.85	779.40
21	68.66	31.34	777.30
22	67.16	32.84	767.80
23	65.67	34.33	749.60
24	64.18	35.82	718.30
25	62.69	37.31	716.80
26	61.19	38.81	696.00
27	59.70	40.30	683.50
28	58.21	41.79	683.40
29	56.72	43.28	674.20
30	55.22	44.78	665.20
31	53.73	46.27	660.80
32	52.24	47.76	649.20
33	50.75	49.25	641.60
34	49.25	50.75	634.90
35	47.76	52.24	627.50
36	46.27	53.73	609.30
37	44.78	55.22	589.80
38	43.28	56.72	566.90
39	41.79	58.21	547.00
40	40.30	59.70	546.50
41	38.81	61.19	545.40
42	37.31	62.69	545.40
43	35.82	64.18	544.20
44	34.33	65.67	530.70
45	32.84	67.16	530.60
46	31.34	68.66	521.90

m	<i>Pb</i> ($x \leq X$)	<i>Pb</i> ($x \geq X$)	Vol. Total Anual
47	29.85	70.15	511.10
48	28.36	71.64	495.30
49	26.87	73.13	489.40
50	25.37	74.63	478.00
51	23.88	76.12	472.00
52	22.39	77.61	470.90
53	20.90	79.10	459.70
54	19.40	80.60	448.50
55	17.91	82.09	446.80
56	16.42	83.58	446.40
57	14.93	85.07	442.10
58	13.43	86.57	404.50
59	11.94	88.06	401.60
60	10.45	89.55	387.40
61	8.96	91.04	342.50
62	7.46	92.54	305.50
63	5.97	94.03	291.50
64	4.48	95.52	290.10
65	2.99	97.01	284.10
66	1.49	98.51	261.20

Fuente: Elaboración propia con base en Cuadro A.7.

5.3.1.1.1. Cálculo de las funciones de distribución de probabilidad

Una vez calculadas las probabilidades empíricas, se prosiguió a ajustar las aportaciones acumuladas a cuatro modelos de distribuciones estadística, las cuales fueron: Normal, Log Normal, Gamma incompleta y Pearson III, a cada distribución se determinaron los parámetros estadísticos de media, desviación estándar, coeficiente de variación y coeficiente de sesgo, así como los estimadores α y β , los cuales se muestran en el Cuadro 5.8.

Cuadro 5.8. Parámetros estadísticos necesarios para cálculo de las funciones de distribución.

Estadísticas		
Parámetro	Normal	Log Normal
n	66	66
μ	669.89	6.43
σ	265.173	0.389
<i>Media Geometrica</i>	622.265	6.422
<i>C.V.</i>	0.396	0.061
<i>C.S.</i>	1.084	-0.083
Estimador	Gamma incompleta	Pearson III
α	6.382	3.40
β	104.967	143.72
ε		180.64

Fuente: Elaboración propia con base en la serie histórica de volúmenes escurridos en el Río Lerma.

Las probabilidades de ocurrencia de los volúmenes acumulados anuales que se muestran en el Cuadro 5.9, fueron estimados mediante las funciones de probabilidad Empírica, Normal, Log Normal, Gamma incompleta y Pearson III.

Cuadro 5.9. Probabilidad de ocurrencia (%) de los volúmenes anuales, obtenidos mediante Distribución empírica, Normal, Log Normal, Gamma y Pearson III.

m	Total Mm³	Pb (%) ($x \leq X$)	Pb (%) ($x \geq X$)	Dist. Normal	Dist. Log Normal	Dist. Gamma	Dist. Pearson III
1	1,571.20	98.51	1.49	99.97	99.13	99.57	99.37
2	1,459.90	97.01	2.99	99.86	98.58	99.14	98.85
3	1,270.00	95.52	4.48	98.82	96.66	97.34	96.94
4	1,117.80	94.03	5.97	95.44	93.38	93.82	93.52
5	1,056.60	92.54	7.46	92.76	91.31	91.51	91.34
6	985.20	91.04	8.96	88.28	88.10	87.88	87.99
7	949.40	89.55	10.45	85.41	86.11	85.63	85.91
8	938.20	88.06	11.94	84.42	85.42	84.85	85.20
9	937.00	86.57	13.43	84.31	85.35	84.77	85.12
10	931.60	85.07	14.93	83.82	85.00	84.38	84.76
11	916.80	83.58	16.42	82.41	84.02	83.28	83.75
12	886.20	82.09	17.91	79.27	81.81	80.80	81.47
13	883.30	80.60	19.40	78.95	81.59	80.56	81.24
14	879.00	79.10	20.90	78.48	81.25	80.18	80.90
15	851.30	77.61	22.39	75.30	78.96	77.65	78.55
16	842.20	76.12	23.88	74.21	78.15	76.76	77.73
17	818.30	74.63	25.37	71.21	75.91	74.32	75.46
18	802.50	73.13	26.87	69.15	74.32	72.60	73.86
19	784.70	71.64	28.36	66.75	72.43	70.58	71.96
20	779.40	70.15	29.85	66.02	71.85	69.96	71.37
21	777.30	68.66	31.34	65.73	71.61	69.71	71.14
22	767.80	67.16	32.84	64.40	70.53	68.56	70.06
23	749.60	65.67	34.33	61.81	68.37	66.30	67.91
24	718.30	64.18	35.82	57.24	64.38	62.17	63.95
25	716.80	62.69	37.31	57.02	64.18	61.97	63.76
26	696.00	61.19	38.81	53.92	61.32	59.06	60.94
27	683.50	59.70	40.30	52.05	59.53	57.27	59.18
28	683.40	58.21	41.79	52.03	59.51	57.25	59.17
29	674.20	56.72	43.28	50.65	58.16	55.90	57.84
30	665.20	55.22	44.78	49.29	56.80	54.57	56.52
31	660.80	53.73	46.27	48.63	56.13	53.91	55.86
32	649.20	52.24	47.76	46.89	54.33	52.15	54.11
33	641.60	50.75	49.25	45.75	53.13	50.98	52.94
34	634.90	49.25	50.75	44.75	52.06	49.95	51.90
35	627.50	47.76	52.24	43.65	50.86	48.79	50.73
36	609.30	46.27	53.73	40.96	47.84	45.92	47.80
37	589.80	44.78	55.22	38.13	44.53	42.81	44.59
38	566.90	43.28	56.72	34.89	40.54	39.12	40.73
39	547.00	41.79	58.21	32.15	37.03	35.91	37.32
40	546.50	40.30	59.70	32.08	36.94	35.83	37.23
41	545.40	38.81	61.19	31.94	36.74	35.66	37.04
42	545.40	37.31	62.69	31.94	36.74	35.66	37.04
43	544.20	35.82	64.18	31.77	36.53	35.46	36.83
44	530.70	34.33	65.67	29.98	34.13	33.30	34.50
45	530.60	32.84	67.16	29.97	34.12	33.28	34.49

46	521.90	31.34	68.66	28.84	32.57	31.90	32.98
47	511.10	29.85	70.15	27.46	30.66	30.19	31.12
48	495.30	28.36	71.64	25.51	27.89	27.73	28.40
49	489.40	26.87	73.13	24.80	26.86	26.83	27.39
50	478.00	25.37	74.63	23.46	24.91	25.10	25.46
51	472.00	23.88	76.12	22.77	23.89	24.20	24.45
52	470.90	22.39	77.61	22.65	23.70	24.04	24.27
53	459.70	20.90	79.10	21.40	21.84	22.39	22.41
54	448.50	19.40	80.60	20.19	20.01	20.79	20.59
55	446.80	17.91	82.09	20.01	19.74	20.55	20.31
56	446.40	16.42	83.58	19.97	19.68	20.50	20.25
57	442.10	14.93	85.07	19.52	19.00	19.89	19.56
58	404.50	13.43	86.57	15.85	13.43	14.95	13.89
59	401.60	11.94	88.06	15.58	13.03	14.60	13.48
60	387.40	10.45	89.55	14.34	11.18	12.92	11.54
61	342.50	8.96	91.04	10.85	6.26	8.29	6.29
62	305.50	7.46	92.54	8.47	3.38	5.31	3.15
63	291.50	5.97	94.03	7.68	2.57	4.39	2.26
64	290.10	4.48	95.52	7.60	2.50	4.31	2.18
65	284.10	2.99	97.01	7.29	2.20	3.95	1.85
66	261.20	1.49	98.51	6.16	1.29	2.76	0.89

Fuente: Elaboración propia con base en Cuadro A.7.

Así mismo en el Cuadro 5.10, se muestran los volúmenes anuales esperados (en hm³) calculados con las funciones de probabilidad Normal, Log Normal, Gamma incompleta y Pearson III; cada uno de estos volúmenes se calculó a partir de la probabilidad de ocurrencia definida.

Cuadro 5.10. Volúmenes anuales esperados en hm³, estimados con una probabilidad definida, a partir de las funciones de distribución Normal, Log Normal, Gamma y Pearson III.

m	Pb (%) ($x \leq X$)	Pb (%) ($x \geq X$)	Volumen Observado	Normal Vol. (Hm ³)	Log-Normal Vol. (Hm ³)	Gamma Vol. (Hm ³)	P-III Vol. (Hm ³)
1	98.51	1.49	1,571.20	1,245.87	1,449.53	1,368.81	1,409.81
2	97.01	2.99	1,459.90	1,169.21	1,295.24	1,249.98	1,275.14
3	95.52	4.48	1,270.00	1,120.10	1,205.13	1,177.38	1,193.90
4	94.03	5.97	1,117.80	1,082.84	1,140.99	1,124.15	1,134.89
5	92.54	7.46	1,056.60	1,052.32	1,090.98	1,081.70	1,088.18
6	91.04	8.96	985.20	1,026.16	1,049.87	1,046.15	1,049.32
7	89.55	10.45	949.40	1,003.07	1,014.88	1,015.40	1,015.92
8	88.06	11.94	938.20	982.26	984.34	988.19	986.53
9	86.57	13.43	937.00	963.22	957.20	963.71	960.22
10	85.07	14.93	931.60	945.58	932.73	941.39	936.34
11	83.58	16.42	916.80	929.08	910.41	920.81	914.44
12	82.09	17.91	886.20	913.53	889.86	901.69	894.18
13	80.60	19.40	883.30	898.78	870.79	883.79	875.29
14	79.10	20.90	879.00	884.70	852.98	866.92	857.57
15	77.61	22.39	851.30	871.20	836.24	850.95	840.86
16	76.12	23.88	842.20	858.21	820.44	835.75	825.03
17	74.63	25.37	818.30	845.65	805.45	821.24	809.97
18	73.13	26.87	802.50	833.47	791.18	807.33	795.59
19	71.64	28.36	784.70	821.63	777.55	793.95	781.81
20	70.15	29.85	779.40	810.09	764.48	781.05	768.58
21	68.66	31.34	777.30	798.81	751.92	768.57	755.82
22	67.16	32.84	767.80	787.75	739.81	756.47	743.51
23	65.67	34.33	749.60	776.90	728.12	744.71	731.58
24	64.18	35.82	718.30	766.22	716.79	733.27	720.02
25	62.69	37.31	716.80	755.69	705.80	722.10	708.78
26	61.19	38.81	696.00	745.30	695.12	711.19	697.84
27	59.70	40.30	683.50	735.03	684.71	700.50	687.16
28	58.21	41.79	683.40	724.85	674.55	690.02	676.74
29	56.72	43.28	674.20	714.75	664.63	679.73	666.53
30	55.22	44.78	665.20	704.72	654.91	669.60	656.54
31	53.73	46.27	660.80	694.73	645.38	659.63	646.73
32	52.24	47.76	649.20	684.78	636.02	649.79	637.09
33	50.75	49.25	641.60	674.85	626.81	640.07	627.60
34	49.25	50.75	634.90	664.93	617.75	630.45	618.25
35	47.76	52.24	627.50	655.00	608.81	620.93	609.04
36	46.27	53.73	609.30	645.06	599.98	611.48	599.93
37	44.78	55.22	589.80	635.07	591.25	602.09	590.92
38	43.28	56.72	566.90	625.04	582.60	592.76	582.00
39	41.79	58.21	547.00	614.94	574.03	583.47	573.16
40	40.30	59.70	546.50	604.76	565.52	574.20	564.39
41	38.81	61.19	545.40	594.48	557.05	564.95	555.66
42	37.31	62.69	545.40	584.09	548.61	555.69	546.98
43	35.82	64.18	544.20	573.57	540.20	546.42	538.33
44	34.33	65.67	530.70	562.89	531.80	537.13	529.69
45	32.84	67.16	530.60	552.04	523.39	527.79	521.06

m	Pb (%) ($x \leq X$)	Pb (%) ($x \geq X$)	Volumen Observado	Normal Vol. (Hm ³)	Log-Normal Vol. (Hm ³)	Gamma Vol. (Hm ³)	P-III Vol. (Hm ³)
46	31.34	68.66	521.90	540.98	514.97	518.39	512.42
47	29.85	70.15	511.10	529.70	506.50	508.92	503.76
48	28.36	71.64	495.30	518.15	497.99	499.35	495.07
49	26.87	73.13	489.40	506.31	489.41	489.66	486.32
50	25.37	74.63	478.00	494.14	480.74	479.84	477.50
51	23.88	76.12	472.00	481.58	471.96	469.84	468.59
52	22.39	77.61	470.90	468.59	463.04	459.66	459.57
53	20.90	79.10	459.70	455.09	453.95	449.24	450.41
54	19.40	80.60	448.50	441.01	444.67	438.55	441.09
55	17.91	82.09	446.80	426.26	435.14	427.53	431.56
56	16.42	83.58	446.40	410.71	425.32	416.13	421.79
57	14.93	85.07	442.10	394.21	415.14	404.26	411.72
58	13.43	86.57	404.50	376.57	404.53	391.84	401.29
59	11.94	88.06	401.60	357.53	393.37	378.73	390.41
60	10.45	89.55	387.40	336.72	381.54	364.76	378.96
61	8.96	91.04	342.50	313.63	368.82	349.69	366.80
62	7.46	92.54	305.50	287.47	354.92	333.15	353.68
63	5.97	94.03	291.50	256.94	339.37	314.55	339.24
64	4.48	95.52	290.10	219.69	321.31	292.87	322.83
65	2.99	97.01	284.10	170.57	298.95	265.95	303.16
66	1.49	98.51	261.20	93.92	267.13	227.56	276.62

Fuente: Elaboración propia a partir de las funciones de distribución Normal, Log Normal, Gamma incompleta y Pearson II.

5.3.1.1.2. Selección de la función de distribución

Para seleccionar la función de distribución que mejor se ajuste a los datos observados, se aplicaron cuatro evaluaciones:

5.3.1.1.2.1. Método gráfico

Con este método se examinan las gráficas de los volúmenes anuales esperados estimados a partir de las funciones de distribución Normal, Log Normal, Gamma y Pearson III, y se trata de seleccionar la que se apegue visualmente mejor a los datos medidos.

En la Figura 5.3 es posible apreciar que la función de distribución Normal es la que menos se apega a los datos del Río Lerma, y las demás distribuciones son gráficamente similares a los datos observados. Dado que se trata de un método subjetivo, se aplicarán más pruebas para seleccionar la función de distribución de mejor ajuste.

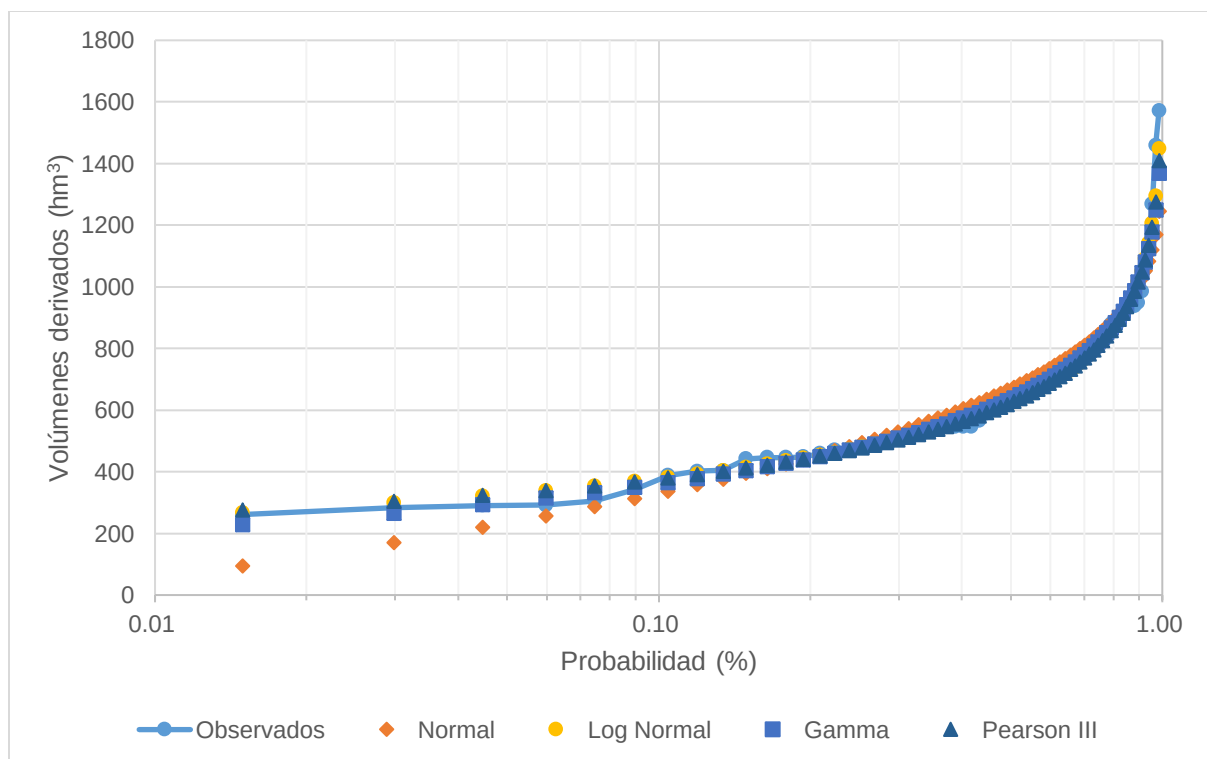


Figura 5.3. Método Gráfico para la selección de Función de distribución de Probabilidad.

5.3.1.1.2.2. Método del error cuadrático mínimo

En el Cuadro 5.11 se muestran los volúmenes acumulados observados y los estimados para cada una de las funciones de distribución y los errores cuadráticos correspondientes; las funciones se han calificado según el orden de preferencia indicado por cada prueba, dando 1 a la “mejor” y 4 a la de “peor” ajuste y cuyos resultados se muestran en la última fila del Cuadro 5.11.

De los resultados obtenidos, se observa que las funciones que parecen más adecuadas son Log Norma, Gamma incompleta y Pearson III, y de ellas la Log Normal es la que tiene el error cuadrático más pequeño, por lo tanto, de acuerdo al método del error cuadrático mínimo, la función que mejor se ajusta a los datos observados es la Log Normal.

Cuadro 5.11. Método error cuadrado medio.

F	Observados	Normal		Log-Normal		Gamma		P-III	
($x \leq X$)	x_o Hm ³	x_e Hm ³	$(x_e - x_o)^2$	x_e Hm ³	$(x_e - x_o)^2$	x_e Hm ³	$(x_e - x_o)^2$	x_e Hm ³	$(x_e - x_o)^2$
0.985	1,571.2	1,245.9	105,840.9	1,449.5	14,803.6	1,368.8	40,960.7	1,409.8	26,045.5
0.970	1,459.9	1,169.2	84,498.7	1,295.2	27,112.4	1,250.0	44,068.5	1,275.1	34,136.2
0.955	1,270.0	1,120.1	22,471.2	1,205.1	4,208.6	1,177.4	8,578.2	1,193.9	5,790.9
0.940	1,117.8	1,082.8	1,221.9	1,141.0	537.6	1,124.2	40.4	1,134.9	291.9
0.925	1,056.6	1,052.3	18.3	1,091.0	1,182.1	1,081.7	630.1	1,088.2	997.2
0.910	985.2	1,026.2	1,677.6	1,049.9	4,182.6	1,046.1	3,714.8	1,049.3	4,111.6
0.896	949.4	1,003.1	2,880.4	1,014.9	4,287.5	1,015.4	4,356.0	1,015.9	4,424.7
0.881	938.2	982.3	1,941.5	984.3	2,129.3	988.2	2,499.5	986.5	2,335.6
0.866	937.0	963.2	687.4	957.2	408.2	963.7	713.5	960.2	539.0
0.851	931.6	945.6	195.4	932.7	1.3	941.4	95.8	936.3	22.5
0.836	916.8	929.1	150.8	910.4	40.8	920.8	16.1	914.4	5.6
0.821	886.2	913.5	747.0	889.9	13.4	901.7	239.9	894.2	63.7
0.806	883.3	898.8	239.5	870.8	156.4	883.8	0.2	875.3	64.1
0.791	879.0	884.7	32.5	853.0	677.1	866.9	145.9	857.6	459.1
0.776	851.3	871.2	396.1	836.2	226.7	850.9	0.1	840.9	108.9
0.761	842.2	858.2	256.2	820.4	473.5	835.8	41.5	825.0	294.7
0.746	818.3	845.6	748.0	805.5	165.0	821.2	8.7	810.0	69.3
0.731	802.5	833.5	959.4	791.2	128.1	807.3	23.3	795.6	47.7
0.716	784.7	821.6	1,364.2	777.5	51.1	794.0	85.6	781.8	8.3
0.701	779.4	810.1	941.9	764.5	222.5	781.0	2.7	768.6	117.2
0.687	777.3	798.8	462.5	751.9	644.1	768.6	76.3	755.8	461.2
0.672	767.8	787.8	398.0	739.8	783.2	756.5	128.4	743.5	590.2
0.657	749.6	776.9	745.1	728.1	461.5	744.7	23.9	731.6	324.5
0.642	718.3	766.2	2,296.2	716.8	2.3	733.3	224.0	720.0	3.0
0.627	716.8	755.7	1,512.8	705.8	120.9	722.1	28.1	708.8	64.3
0.612	696.0	745.3	2,430.9	695.1	0.8	711.2	230.6	697.8	3.4
0.597	683.5	735.0	2,655.1	684.7	1.5	700.5	289.0	687.2	13.4
0.582	683.4	724.8	1,718.0	674.6	78.3	690.0	43.8	676.7	44.4
0.567	674.2	714.8	1,644.3	664.6	91.7	679.7	30.6	666.5	58.8
0.552	665.2	704.7	1,561.5	654.9	106.0	669.6	19.4	656.5	75.0
0.537	660.8	694.7	1,151.4	645.4	237.9	659.6	1.4	646.7	198.1

F $(x \leq X)$	Observados x_o Hm ³	Normal x_e Hm ³	$(x_e - x_o)^2$	Log-Normal x_e Hm ³	$(x_e - x_o)^2$	Gamma x_e Hm ³	$(x_e - x_o)^2$	P-III x_e Hm ³	$(x_e - x_o)^2$
0.522	649.2	684.8	1,266.1	636.0	173.8	649.8	0.3	637.1	146.7
0.507	641.6	674.9	1,105.9	626.8	218.6	640.1	2.3	627.6	196.0
0.493	634.9	664.9	902.0	617.7	294.1	630.5	19.8	618.3	277.1
0.478	627.5	655.0	756.5	608.8	349.3	620.9	43.2	609.0	340.9
0.463	609.3	645.1	1,278.5	600.0	86.8	611.5	4.7	599.9	87.8
0.448	589.8	635.1	2,049.5	591.3	2.1	602.1	151.1	590.9	1.3
0.433	566.9	625.0	3,380.0	582.6	246.6	592.8	668.8	582.0	228.1
0.418	547.0	614.9	4,615.7	574.0	730.7	583.5	1,329.9	573.2	684.5
0.403	546.5	604.8	3,394.2	565.5	361.6	574.2	767.3	564.4	319.9
0.388	545.4	594.5	2,409.2	557.0	135.7	564.9	382.0	555.7	105.3
0.373	545.4	584.1	1,497.2	548.6	10.3	555.7	105.9	547.0	2.5
0.358	544.2	573.6	862.6	540.2	16.0	546.4	4.9	538.3	34.5
0.343	530.7	562.9	1,036.3	531.8	1.2	537.1	41.3	529.7	1.0
0.328	530.6	552.0	459.6	523.4	51.9	527.8	7.9	521.1	91.0
0.313	521.9	541.0	364.1	515.0	48.1	518.4	12.3	512.4	89.8
0.299	511.1	529.7	345.9	506.5	21.1	508.9	4.8	503.8	53.8
0.284	495.3	518.2	522.3	498.0	7.2	499.3	16.4	495.1	0.1
0.269	489.4	506.3	286.1	489.4	0.0	489.7	0.1	486.3	9.5
0.254	478.0	494.1	260.5	480.7	7.5	479.8	3.4	477.5	0.3
0.239	472.0	481.6	91.8	472.0	0.0	469.8	4.6	468.6	11.6
0.224	470.9	468.6	5.4	463.0	61.8	459.7	126.4	459.6	128.4
0.209	459.7	455.1	21.3	454.0	33.0	449.2	109.4	450.4	86.3
0.194	448.5	441.0	56.1	444.7	14.7	438.5	99.1	441.1	55.0
0.179	446.8	426.3	422.0	435.1	136.0	427.5	371.4	431.6	232.3
0.164	446.4	410.7	1,274.0	425.3	444.5	416.1	916.5	421.8	605.8
0.149	442.1	394.2	2,293.5	415.1	726.9	404.3	1,431.6	411.7	923.1
0.134	404.5	376.6	780.1	404.5	0.0	391.8	160.3	401.3	10.3
0.119	401.6	357.5	1,942.5	393.4	67.7	378.7	523.0	390.4	125.3
0.104	387.4	336.7	2,568.6	381.5	34.4	364.8	512.5	379.0	71.2
0.090	342.5	313.6	833.5	368.8	692.7	349.7	51.7	366.8	590.5
0.075	305.5	287.5	325.2	354.9	2,442.6	333.1	764.3	353.7	2,321.3
0.060	291.5	256.9	1,194.2	339.4	2,291.3	314.6	531.4	339.2	2,278.9

F ($x \leq X$)	Observados x_o Hm³	Normal x_e Hm³ $(x_e - x_o)^2$	Log-Normal x_e Hm³ $(x_e - x_o)^2$	Gamma x_e Hm³ $(x_e - x_o)^2$	P-III x_e Hm³ $(x_e - x_o)^2$
0.045	290.1	219.7 4,957.3	321.3 973.8	292.9 7.7	322.8 1,071.5
0.030	284.1	170.6 12,888.0	299.0 220.6	266.0 329.4	303.2 363.4
0.015	261.2	93.9 27,982.6	267.1 35.2	227.6 1,131.3	276.6 237.9
	$\sum (x_e - x_o)^2$	328272.9	328,272.9	74,473.7	117,953.9
	C	573.0	272.9	343.4	305.9
	4		1	3	2

Fuente: Elaboración propia con base en Cuadro 5.10.

5.3.1.1.2.1. Prueba de bondad de ajuste Chi cuadrada χ^2

Para aplicar la prueba de bondad chi-cuadrada χ^2 , el primer paso es dividir los datos en un número k de intervalos de clase, como se muestra en el Cuadro 5.12, para los datos del trabajo de investigación, se ha escogido un intervalo de clase de $k=6$.

Cuadro 5.12. Tabla de frecuencias y selección de intervalos para la prueba de Bondad Chi-Cuadrada.

Intervalo	Límite Inferior I_i	Límite Superior S_i	Marca Clase	Frecuencia observada θ_i
1	0.00	300.00	150.00	4.00
2	301.00	600.00	450.50	26.00
3	601.00	900.00	750.50	25.00
4	901.00	1,200.00	1,050.50	8.00
5	1,201.00	1,500.00	1,350.50	2.00
6	1,501.00	1,800.00	1,650.50	1.00
$\sum = n = 66$				

Fuente: Elaboración propia con base en Cuadro A.7.

Una vez calculado el parámetro chi- cuadrado calculado (χ_c^2), se determina el valor de chi-cuadrada tabular χ_t^2 y a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, de esta forma se tiene que para funciones de dos parámetros (normal, log-normal y gamma incompleta) se tiene que:

$$\chi_{0.95,3}^2 = 7.81$$

Para funciones de tres parámetros:

$$\chi_{0.95,2}^2 = 5.99$$

Una vez obtenido χ_t^2 , se compra con los valores de χ_c^2 de cada distribución estadística. De acuerdo con el Cuadro 5.13, en las distribuciones Log Normal, Gamma y Pearson III, resultó que $\chi_c^2 < \chi_t^2$; mientras que, en la función normal $\chi_c^2 > \chi_t^2$, por lo cual se rechaza la función de distribución normal.

En la última fila del Cuadro 5.13 se han calificado las funciones según el orden de preferencia indicado por cada prueba, dando 1 a la “mejor” y 4 a la de “peor” ajuste. Se concluye que de acuerdo a la prueba de Bondad Chi-Cuadrada con un $k=6$, la distribución estadística que mejor se ajusta a los datos es la Distribución Gamma.

Cuadro 5.13. Prueba Bondad Chi-Cuadrada.

Función de distribución	Intervalo i	θ_i	Inferior $F(I_i)$	Superior $F(S_i)$	ϵ_i	$\frac{(\theta_i - \epsilon_i)^2}{\epsilon_i}$	χ^2_c
Normal	1	4.00	0.01	0.08	5.00	0.20	
	2	26.00	0.08	0.40	20.72	1.34	
	3	25.00	0.40	0.81	27.04	0.15	
	4	8.00	0.81	0.98	11.15	0.89	
	5	2.00	0.98	1.00	1.43	0.22	
	6	1.00	1.00	1.00	0.06	15.85	
					65.40		18.66
							Se rechaza
Log-Normal	1	4.00	0.00	0.03	2.01	1.97	
	2	26.00	0.03	0.46	28.49	0.22	
	3	25.00	0.46	0.83	24.02	0.04	
	4	8.00	0.83	0.95	8.25	0.01	
	5	2.00	0.95	0.99	2.22	0.02	
	6	1.00	0.99	1.00	0.57	0.32	
					65.57		2.57
							2
Gamma	1		0.00	0.05	3.26	0.17	
	2		0.05	0.44	26.03	0.00	
	3		0.45	0.82	24.65	0.00	
	4		0.82	0.96	9.25	0.17	
	5		0.96	0.99	2.15	0.01	
	6		0.99	1.00	0.38	1.03	
					65.72		1.39
							1
Pearson III	1		0.00	0.03	1.83	2.57	
	2		0.03	0.46	28.67	0.25	
	3		0.46	0.83	23.82	0.06	
	4		0.83	0.96	8.61	0.04	
	5		0.96	0.99	2.24	0.03	
	6		0.99	1.00	0.49	0.53	
					65.66		3.47
							3

Fuente: Elaboración propia con base en Cuadro A.7.

5.3.1.1.2.2. Prueba de bondad Kolmogórov-Smirnov

Esta prueba tiene la ventaja sobre la χ^2 , que es posible comparar los datos del modelo estadístico sin la necesidad de agruparlos. De acuerdo con el Cuadro 5.14, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, todas las funciones de distribución se aceptan, sin embargo, la función de distribución con menor valor de D es la Pearson III, por lo que, según esta prueba, esta función sería la preferible.

Cuadro 5.14. Prueba Bondad Kolmogórov-Smirnov.

m	Total	Dist. empírica	$x \leq X$	Distribución Normal		Distribución Log Normal		Distribución Gamma		Distribución Pearson III	
	Hm³	$x \geq X$	Fo	F_N	Fo-F_N	F_{Ln}	Fo- F_{Ln}	Mm³	Fo	F_N	Fo-F_N
1	1571.20	0.015	0.985	1.000	0.015	0.991	0.006	0.996	0.011	0.994	0.009
2	1459.90	0.030	0.970	0.999	0.028	0.986	0.016	0.991	0.021	0.989	0.018
3	1270.00	0.045	0.955	0.988	0.033	0.967	0.011	0.973	0.018	0.969	0.014
4	1117.80	0.060	0.940	0.954	0.014	0.934	0.007	0.938	0.002	0.935	0.005
5	1056.60	0.075	0.925	0.928	0.002	0.913	0.012	0.915	0.010	0.913	0.012
6	985.20	0.090	0.910	0.883	0.028	0.881	0.029	0.879	0.032	0.880	0.031
7	949.40	0.104	0.896	0.854	0.041	0.861	0.034	0.856	0.039	0.859	0.036
8	938.20	0.119	0.881	0.844	0.036	0.854	0.026	0.849	0.032	0.852	0.029
9	937.00	0.134	0.866	0.843	0.023	0.853	0.012	0.848	0.018	0.851	0.014
10	931.60	0.149	0.851	0.838	0.013	0.850	0.001	0.844	0.007	0.848	0.003
11	916.80	0.164	0.836	0.824	0.012	0.840	0.004	0.833	0.003	0.837	0.002
12	886.20	0.179	0.821	0.793	0.028	0.818	0.003	0.808	0.013	0.815	0.006
13	883.30	0.194	0.806	0.790	0.016	0.816	0.010	0.806	0.000	0.812	0.006
14	879.00	0.209	0.791	0.785	0.006	0.813	0.021	0.802	0.011	0.809	0.018
15	851.30	0.224	0.776	0.753	0.023	0.790	0.013	0.776	0.000	0.786	0.009
16	842.20	0.239	0.761	0.742	0.019	0.782	0.020	0.768	0.006	0.777	0.016
17	818.30	0.254	0.746	0.712	0.034	0.759	0.013	0.743	0.003	0.755	0.008
18	802.50	0.269	0.731	0.691	0.040	0.743	0.012	0.726	0.005	0.739	0.007
19	784.70	0.284	0.716	0.667	0.049	0.724	0.008	0.706	0.011	0.720	0.003
20	779.40	0.299	0.701	0.660	0.041	0.718	0.017	0.700	0.002	0.714	0.012
21	777.30	0.313	0.687	0.657	0.029	0.716	0.030	0.697	0.010	0.711	0.025
22	767.80	0.328	0.672	0.644	0.028	0.705	0.034	0.686	0.014	0.701	0.029
23	749.60	0.343	0.657	0.618	0.039	0.684	0.027	0.663	0.006	0.679	0.022
24	718.30	0.358	0.642	0.572	0.069	0.644	0.002	0.622	0.020	0.640	0.002
25	716.80	0.373	0.627	0.570	0.057	0.642	0.015	0.620	0.007	0.638	0.011
26	696.00	0.388	0.612	0.539	0.073	0.613	0.001	0.591	0.021	0.609	0.003
27	683.50	0.403	0.597	0.520	0.077	0.595	0.002	0.573	0.024	0.592	0.005
28	683.40	0.418	0.582	0.520	0.062	0.595	0.013	0.573	0.010	0.592	0.010
29	674.20	0.433	0.567	0.506	0.061	0.582	0.014	0.559	0.008	0.578	0.011
30	665.20	0.448	0.552	0.493	0.059	0.568	0.016	0.546	0.007	0.565	0.013
31	660.80	0.463	0.537	0.486	0.051	0.561	0.024	0.539	0.002	0.559	0.021

32	649.20	0.478	0.522	0.469	0.053	0.543	0.021	0.521	0.001	0.541	0.019
33	641.60	0.493	0.507	0.458	0.050	0.531	0.024	0.510	0.002	0.529	0.022
34	634.90	0.507	0.493	0.448	0.045	0.521	0.028	0.499	0.007	0.519	0.026
35	627.50	0.522	0.478	0.436	0.041	0.509	0.031	0.488	0.010	0.507	0.030
36	609.30	0.537	0.463	0.410	0.053	0.478	0.016	0.459	0.003	0.478	0.015
37	589.80	0.552	0.448	0.381	0.066	0.445	0.002	0.428	0.020	0.446	0.002
38	566.90	0.567	0.433	0.349	0.084	0.405	0.027	0.391	0.042	0.407	0.026
39	547.00	0.582	0.418	0.322	0.096	0.370	0.048	0.359	0.059	0.373	0.045
40	546.50	0.597	0.403	0.321	0.082	0.369	0.034	0.358	0.045	0.372	0.031
41	545.40	0.612	0.388	0.319	0.069	0.367	0.021	0.357	0.031	0.370	0.018
42	545.40	0.627	0.373	0.319	0.054	0.367	0.006	0.357	0.017	0.370	0.003
43	544.20	0.642	0.358	0.318	0.040	0.365	0.007	0.355	0.004	0.368	0.010
44	530.70	0.657	0.343	0.300	0.043	0.341	0.002	0.333	0.010	0.345	0.002
45	530.60	0.672	0.328	0.300	0.029	0.341	0.013	0.333	0.004	0.345	0.016
46	521.90	0.687	0.313	0.288	0.025	0.326	0.012	0.319	0.006	0.330	0.016
47	511.10	0.701	0.299	0.275	0.024	0.307	0.008	0.302	0.003	0.311	0.013
48	495.30	0.716	0.284	0.255	0.028	0.279	0.005	0.277	0.006	0.284	0.000
49	489.40	0.731	0.269	0.248	0.021	0.269	0.000	0.268	0.000	0.274	0.005
50	478.00	0.746	0.254	0.235	0.019	0.249	0.005	0.251	0.003	0.255	0.001
51	472.00	0.761	0.239	0.228	0.011	0.239	0.000	0.242	0.003	0.244	0.006
52	470.90	0.776	0.224	0.226	0.003	0.237	0.013	0.240	0.016	0.243	0.019
53	459.70	0.791	0.209	0.214	0.005	0.218	0.009	0.224	0.015	0.224	0.015
54	448.50	0.806	0.194	0.202	0.008	0.200	0.006	0.208	0.014	0.206	0.012
55	446.80	0.821	0.179	0.200	0.021	0.197	0.018	0.206	0.026	0.203	0.024
56	446.40	0.836	0.164	0.200	0.035	0.197	0.033	0.205	0.041	0.202	0.038
57	442.10	0.851	0.149	0.195	0.046	0.190	0.041	0.199	0.050	0.196	0.046
58	404.50	0.866	0.134	0.158	0.024	0.134	0.000	0.150	0.015	0.139	0.005
59	401.60	0.881	0.119	0.156	0.036	0.130	0.011	0.146	0.027	0.135	0.015
60	387.40	0.896	0.104	0.143	0.039	0.112	0.007	0.129	0.025	0.115	0.011
61	342.50	0.910	0.090	0.108	0.019	0.063	0.027	0.083	0.007	0.063	0.027
62	305.50	0.925	0.075	0.085	0.010	0.034	0.041	0.053	0.021	0.031	0.043
63	291.50	0.940	0.060	0.077	0.017	0.026	0.034	0.044	0.016	0.023	0.037
64	290.10	0.955	0.045	0.076	0.031	0.025	0.020	0.043	0.002	0.022	0.023
65	284.10	0.970	0.030	0.073	0.043	0.022	0.008	0.039	0.010	0.019	0.011
66	261.20	0.985	0.015	0.062	0.047	0.013	0.002	0.028	0.013	0.009	0.006

d	0.096	0.048	0.059	0.046
	<	<	<	<
D	0.167	0.167	0.167	0.167
	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta
	4	2	3	1

Fuente: Elaboración propia con base en Cuadro 5.10.

5.3.1.1.1. Selección de la función de distribución

En el Cuadro 5.15 se resumen los resultados de las pruebas efectuadas. De estos resultados se concluye que las aportaciones anuales se ajustaron mejor a una función probabilística Log-Normal, sin embargo, es necesario indicar que la diferencia de esta función con la Pearson III es poco significativa.

Cuadro 5.15. Resumen Selección de la función de distribución.

Distribución	Error Cuadrado mínimo	Chi Cuadrada χ^2	Kolmogórov-Smirnov
Normal	4	Se rechaza	4
Log-Normal	1	2	2
Gamma incompleta	3	1	3
Pearson III	2	3	1

Fuente: Elaboración propia con base en Cuadro 5.11, Cuadro 5.13 y Cuadro 5.14..

5.3.1.1.2. Estimación del volumen disponible a partir de un nivel de probabilidad definido.

Dado que se las aportaciones anuales del Río Lerma se ajustaron mejor a una función probabilística Log-Normal, los volúmenes correspondientes a los cuartiles seleccionados, se estimaron con esta función, tal como se muestra en el Cuadro 5.16.

Cuadro 5.16. Volumen esperado para las diferentes probabilidades de Excedencia seleccionados.

Probabilidad de ocurrencia (%) $P(x \leq X)$	Volumen estimado (hm³)
25	478.556
50	622.265
75	809.129

Fuente: Elaboración propia a partir de la función de probabilidad Log Normal.

Las probabilidades presentadas en el Cuadro 5.16, se interpretan de la siguiente manera: Existe una probabilidad del 25% de que se presente un volumen menor o igual a 478.556 hm³, lo que, al ser un nivel de probabilidad de ocurrencia bajo, simula un escenario seco. En el segundo caso, se traduce como la probabilidad del 50% de que se presente un volumen menor o igual a 622.265 hm³, que supone el escenario de un año normal; y, finalmente en el tercer caso, se expresa como la probabilidad del 75% de que se presente un volumen menor o igual a 809.129 hm³, que infiere el escenario de un año húmedo.

5.4. Modelo base (MPL Base) vs Situación Actual de Sequía (Año agrícola 2019-2020)

En esta sección se compararon los parámetros de beneficio neto, patrón de cultivos y volumen utilizado, del ciclo agrícola 2019-202 (Real 2019-2020) contra los resultados obtenidos en el MPL Base.

5.4.1. Beneficio neto y área total regada

Con base en el Cuadro 5.17, el MPL Base determinó que, con un volumen de 505,351.04 millares de metros cúbicos, se espera un ingreso neto de \$ 1,294.68 millones de pesos (precios del ciclo agrícola 2019-2020), así como un área total regada de 89,742.14 hectáreas, mientras que el ciclo agrícola Real 2019-2020 se obtuvo un beneficio neto de 1,191.95 millones de pesos y, una superficie total de 83,230.36 hectáreas. Lo anterior

indica que los productores dejaron de percibir \$102.72 millones de pesos, por lo tanto, al no implementar de manera óptima el patrón de cultivos, generó una disminución del 7.93% en el ingreso. Los resultados anteriores concuerdan con los reportados por Torres *et al.* (2020) en el Distrito de Riego 028 Tulancingo, Hidalgo, quien encontró que al reasignar de manera óptima los recursos, el beneficio neto incrementó un 2.23% y por su parte, Martínez *et al.* (2021) halló en el Distrito de Riego 100 Alfajayucan, Hidalgo que, con la aplicación de un MPL, los beneficios netos incrementaron un 29% en comparación con el patrón original. Por lo tanto, es posible afirmar que aplicar un patrón de cultivos óptimo, puede maximizar el ingreso neto de los productores en función del agua como recurso escaso.

Cuadro 5.17. Comparación de las variables del modelo Real 2019-2020 contra el MPL Base.

MODELO	Volumen Utilizado (Millar m ³)	Beneficio Neto (Millones \$)	Superficie Regada (ha)
Real 2019-2020	505,351.04	1,191.95	83,230.36
MPL Base	505,351.04	1,294.68	89,742.14

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del modelo base.

5.4.2. Patrón de cultivos

5.4.2.1. Año agrícola

De acuerdo con el Cuadro 5.18, al comparar el patrón del año agrícola en condiciones de sequía 2019 (Real 2019-2020) contra el MPL Base, se observa una disminución del 4.27% y 30.10% de superficie en los ciclos O-I y P-V, y un incremento en el área del 75.44% SC y 6.14% en Perennes; lo que concuerda con los requerimientos de riego del DR011, puesto que en otoño, los cultivos se abastecen principalmente del riego, mientras que en primavera-verano y segundos cultivos, los requerimientos hídricos se satisfacen, en gran medida, por la lluvia. De igual forma, estos resultados concuerdan con Martínez *et. al* (2021), cuyo patrón óptimo disminuyó cultivos de O-I para destinarlos a un ciclo con menor requerimiento de riego, como lo es P-V.

Cuadro 5.18. Superficie sembrada en el MPL Base vs año agrícola Real 2019-2020.

Ciclo	Real 2019-2020	MPL Base	Variación Porcentual
Otoño-invierno (O-I)	22,911.28	21,931.87	-4.27%
Primavera-Verano (P-V)	32,962.73	23,041.77	-30.10%
Perennes	4,655.87	4,941.72	6.14%
Segundos Cultivos (SC)	22,700.48	39,826.78	75.44%
Total	83,230.36	89,742.14	

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del modelo base.

5.4.2.2. Comparación entre patrones de cultivo

De acuerdo con las estadísticas agrícolas brindadas por el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, los cultivos más importantes en el ciclo Real 2019-2020 fueron maíz, trigo y sorgo, los cuales abarcaron el 86.18% de la superficie cultivada y, por su parte el MPLBase mostró una tendencia similar, asignando el 93.09% del área total a los mismos cultivos. En la Figura 5.4 se puede observar una reducción en la superficie de maíz y sorgo del ciclo P-V para asignarla a segundos cultivos, lo cual se explica, como se había mencionado anteriormente, porque los SC requieren menor número de riegos al coincidir con el periodo de lluvia, lo que permite al MPL con el mismo volumen incrementar la superficie, maximizando así, el beneficio neto. En la misma gráfica, se puede observar una reducción de 1,534.58 ha en el trigo, estos resultados corresponden con los determinados por Martínez *et al.* (2021), para el DR100 Alfajayucan, en donde el modelo optimizado disminuye la cantidad sembrada de trigo, debido a su alta demanda de agua y baja rentabilidad.

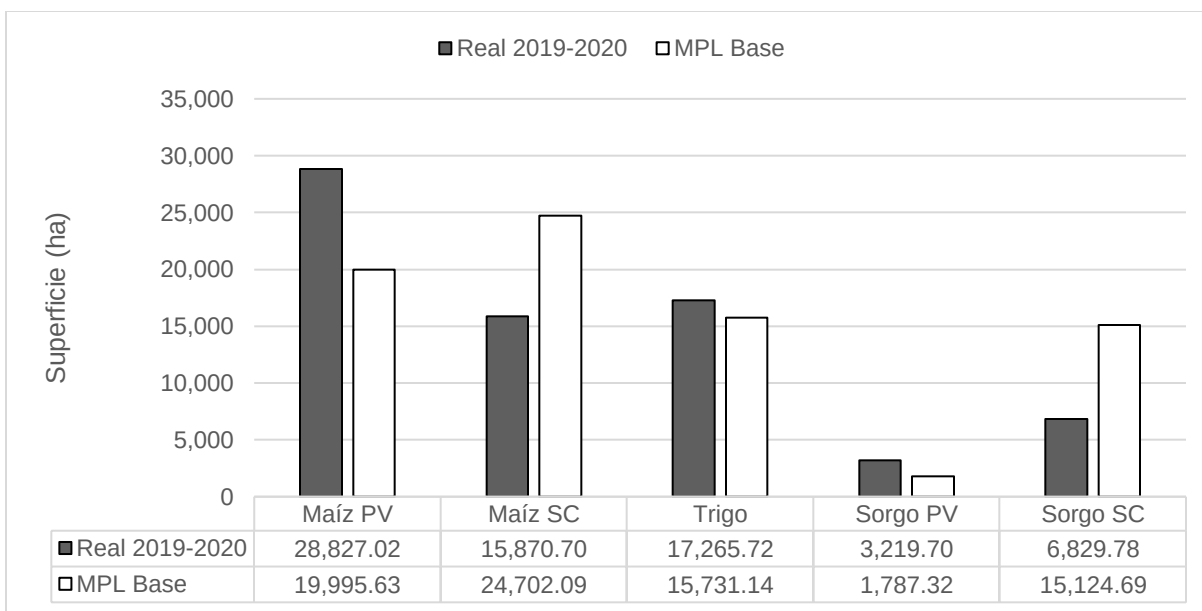


Figura 5.4. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de maíz, trigo y sorgo.

Los cultivos de cebada, espárrago y alfalfa forrajera, representaron el 11.15% de la superficie cultivada en el ciclo Real 2019-2020, tendencia que fue respetada por el MPLBase, el cual asignó el 10.24% de la superficie total a estos cultivos. Conforme a la Figura 5.5, es posible apreciar que el MPL no varió la superficie de cebada, mientras que el espárrago experimentó un aumento del 7.10%; por otra parte, es posible apreciar que la alfalfa disminuyó en un 11.64% su superficie, lo cual coincide con lo reportado por Torres *et al.* (2020) y Martínez *et al.* (2021), que, al ser un cultivo de alta demanda de agua y baja rentabilidad, el MPL opta por destinar el mismo volumen a cultivos de mayor beneficio económico como el espárrago.

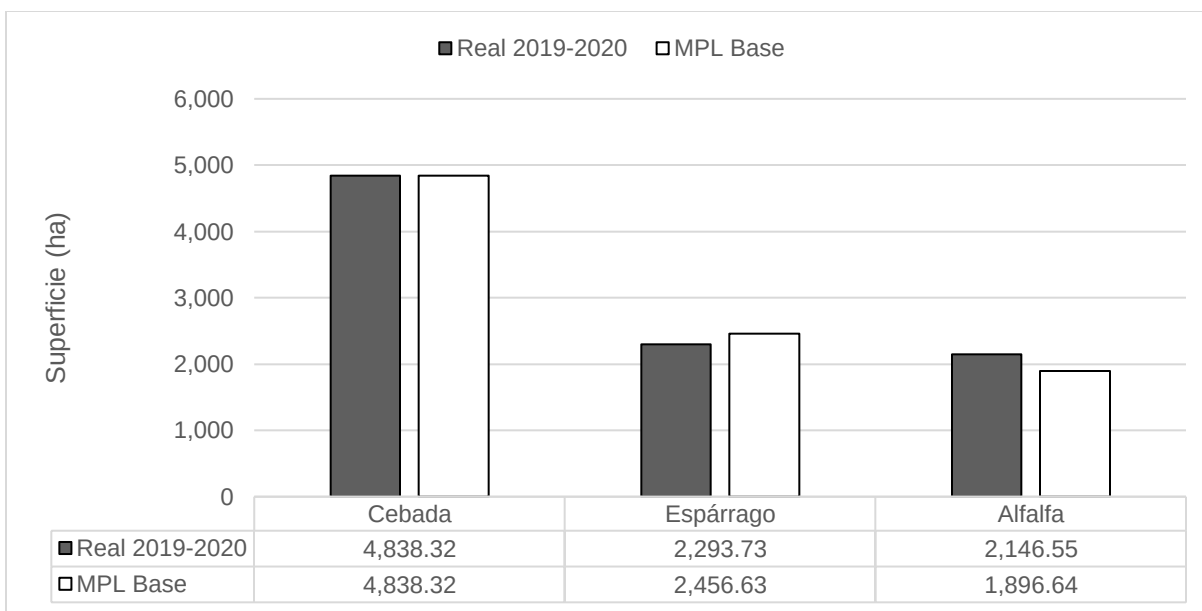


Figura 5.5. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de maíz, trigo y sorgo.

El 1.2% del área cultivada en el DR011 está representado por los cultivos de frijol, garbanzo y cacahuate, por su parte, el MPLBase mostró una proporcionalidad similar, destinando el 1.57% del área total a los mismos cultivos. En la Figura 5.6, es posible contemplar que el cultivo de frijol no tuvo variación en ninguno de sus dos ciclos; lo cual coincide con Godínez *et al.* (2006) en la Región Lagunera, donde el modelo optimizado respetó la superficie mínima fijada para para el frijol por ser un cultivo básico.

Por su parte, el garbanzo tuvo un incremento del 46.29% en el ciclo O-I y de 51.72% en el ciclo P-V, lo mismo ocurrió con el cacahuate, el cual aumentó de más de tres veces en el ciclo O-I y de casi el doble en el ciclo P-V, en ambos cultivos se debe a que, sus bajos requerimientos de riego y el competente beneficio económico que brindan por unidad de hectárea, los hacen candidatos viables para incrementar su superficie sembrada y de esta forma elevar el beneficio neto total del DR011.

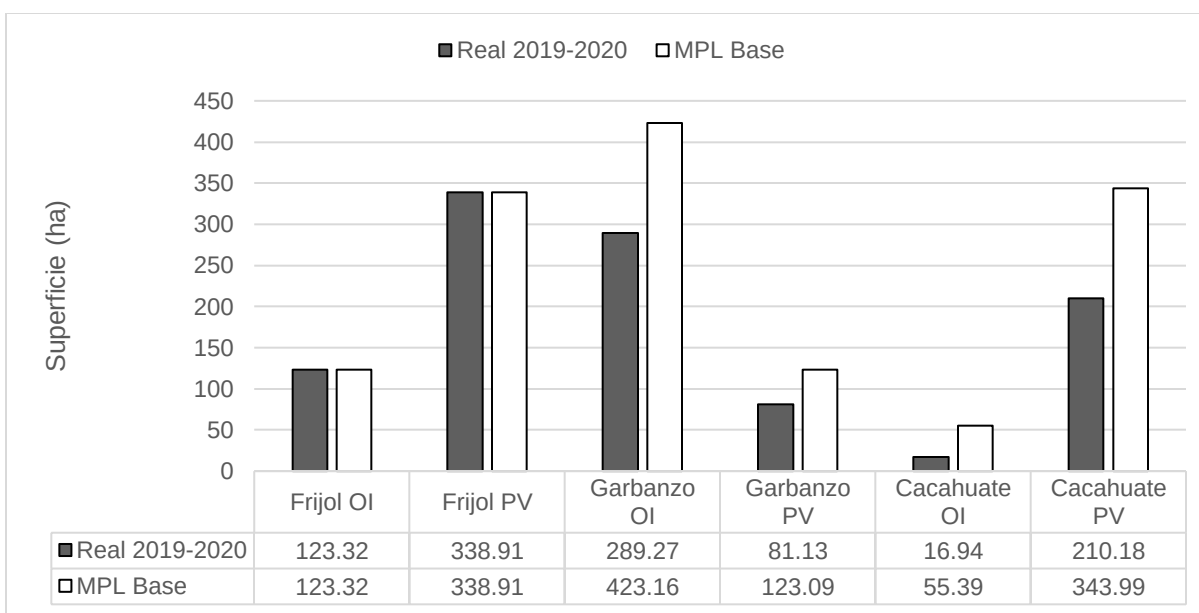


Figura 5.6. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de frijol, garbanzo y cacahuete.

Los cultivos de nopal, avena forrajera, tomate, ajo y fresa representaron el 0.75% de la superficie total del ciclo Real 2019-2020, mientras que en el MPLBase abarcaron el 1.73% del área. En la Figura 5.7, podemos observar que no existen cambios en la superficie destinada a nopal y avena forrajera, por lo que el MPL únicamente destina la mínima superficie fijado en las restricciones, ya que no considera que elevar su superficie incrementa el beneficio neto en el DR011, lo anterior coincide con Ortega *et al.* (2013), en el DR005 Delicias, Chihuahua, que en diferentes escenarios la avena permanece constante.

Por su parte el tomate incrementa casi siete veces su superficie en el ciclo O-I, y casi el doble en P-V, este ascenso en ambos ciclos se debe a que el modelo prioriza cultivos que producen el mayor beneficio económico, particularmente cuando los suministros de agua son restringidos, y coincide con la tendencia del patrón de cultivos del DR011 a incrementar la superficie de hortalizas con demanda y precio del mercado, así mismo, concuerda con lo reportado por Martínez *et al.* (2021) donde el tomate incrementó más del doble en el DR0100 Alfajayucan.

Finalmente, en la Figura 5.7, es posible notar que el patrón Real 2019-2020 no incluyó el cultivo del ajo y fresa, no obstante, al ser cultivos de gran impacto económico en el

DR011, se incluyeron en el MPLBase, cuya importancia en rentabilidad se refleja en la asignación de superficie, puesto que pasa de cero hectáreas a 100.20 ha en ajo y, a 372.82 ha en fresa.

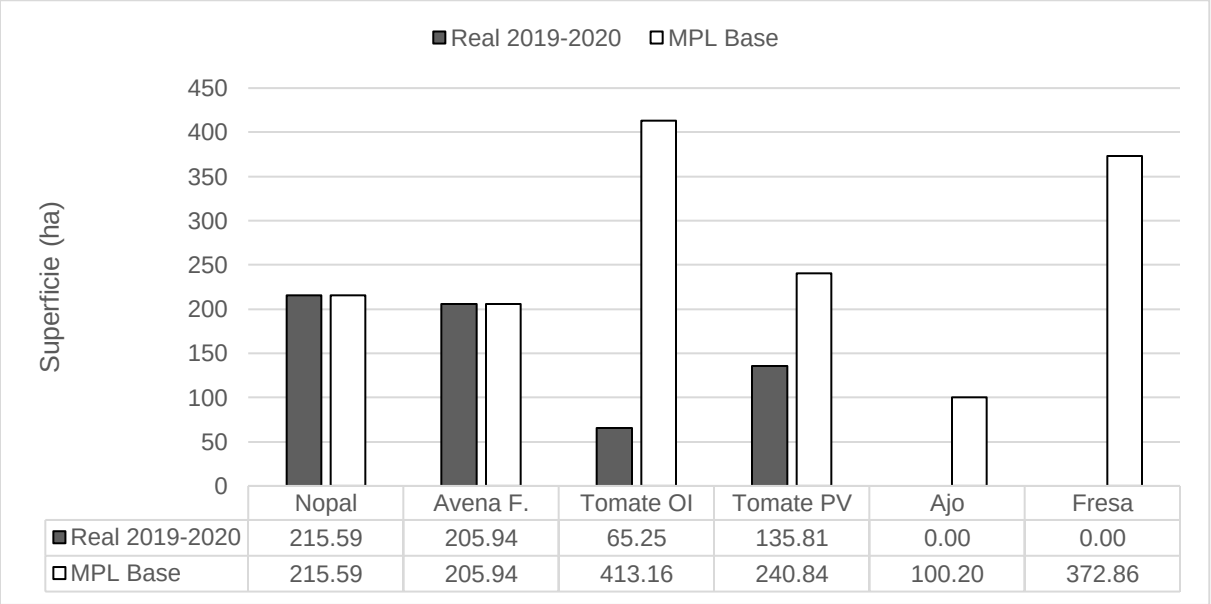


Figura 5.7. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de nopal, avena forrajera, tomate, ajo y fresa.

Ahora bien, los cultivos de zanahoria, brócoli y camote, representan tan sólo el 0.22% de la superficie asignada para riego en el DR011 y, por su parte el MPL asignó sólo el 0.15% del área total a estos cultivos. Como se puede observar en la Figura 5.8, el MPL excluyó los cultivos de zanahoria y brócoli en el ciclo O-I, superficie que fue asignada, en mayor parte, al tomate de O-I por ser un cultivo más redituable; sin embargo, también es posible ver un aumento en el ciclo P-V del 72.53% en zanahoria y de casi el cuádruple en brócoli, ya que en P-V, que coincide con la tendencia del Distrito a disminuir el número de ciclos de riego en periodos de poca disponibilidad de agua, propiciando la desaparición de los cultivos de otoño-invierno. También es posible notar un incremento del 16.21% en el camote.

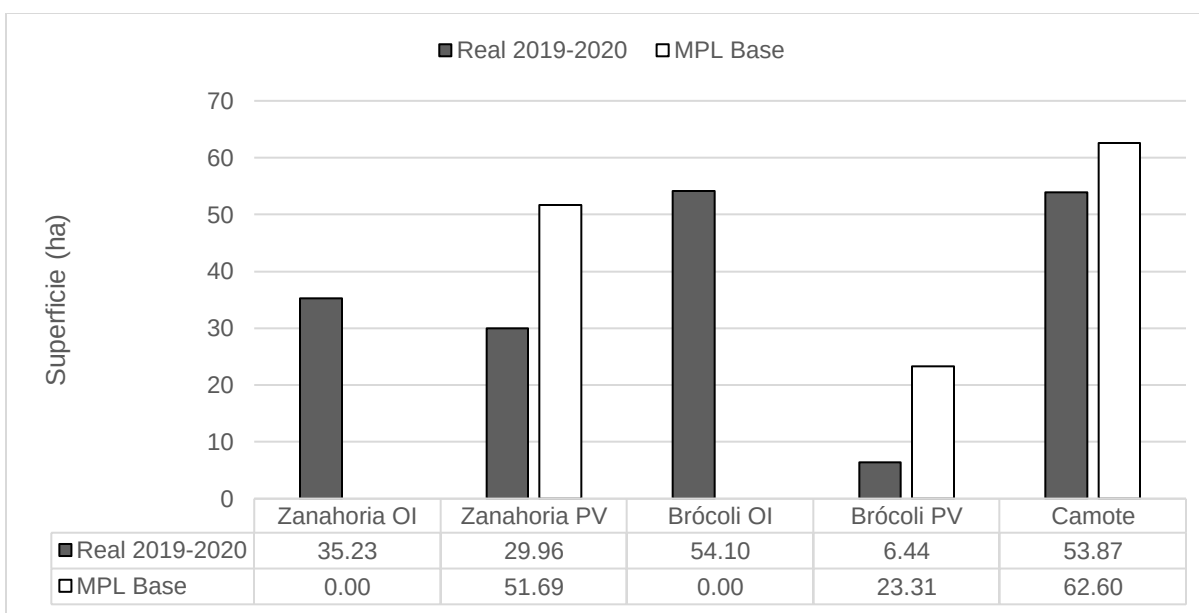


Figura 5.8. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de zanahoria, brócoli y camote.

Finalmente, los cultivos de cebolla, cilantro y lechuga representaron tan sólo el 0.09% de la superficie asignada para riego en el DR011, mientras que en el MPL les asignó el 0.13% del área total. Como se puede observar en la Figura 5.9, el MPL excluyó al cultivo de calabacita pues pasó de 25.46 hectáreas a cero, lo que significa que, dado su bajo a rentabilidad, asignar un volumen para riego a estos cultivos, no permitiría alcanzar un óptimo económico, permitiendo que se destine un volumen de agua mayor al cultivo del tomate de O-I. En la misma gráfica podemos observar que la cebolla de O-I, permaneció aproximadamente igual, mientras que para el ciclo de P-V aumentó un 175%, que es un ejemplo que, el modelo busca optimizar el agua, de modo que se pueda obtener el mismo beneficio de la cebolla, pero con un menor consumo de agua de riego. Por último, el cultivo de cilantro tuvo un ligero incremento del 16.88%, mientras que la lechuga tuvo un aumento de más de treinta veces, lo que coincide con Godínez *et al.* (2007) donde las hortalizas pasaron de representar el 0.9% de la superficie de la Comarca Lagunera al 5.2% con la optimización, dado que son cultivos más rentables y generan mayor ganancia con la disponibilidad de agua del ciclo agrícola.

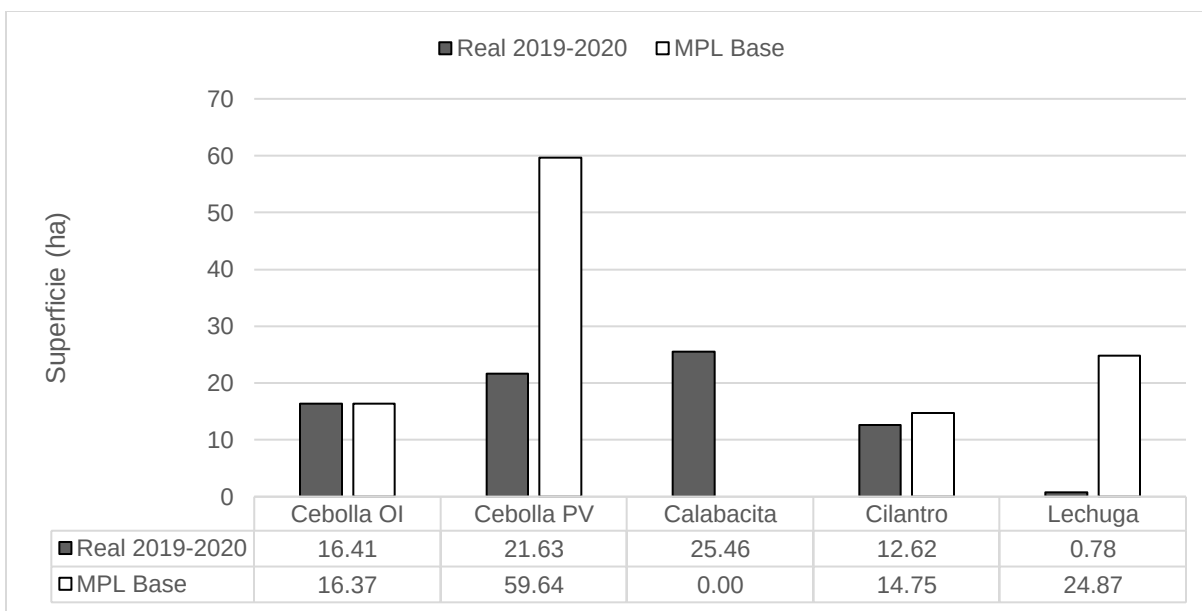


Figura 5.9. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs año agrícola 2019-2020, para los cultivos de cebolla, cilantro y lechuga.

Cuadro 5.19. Comparación del patrón real 2019-2020 contra el patrón óptimo de cultivos del modelo base (MPL Base), para el ciclo 2019-2020.

Ciclo	Variable	Cultivo	Real 2019-2020 Superficie (ha)	MPL Base Superficie (ha)	Variación (%)
Otoño- Invierno	X ₁	Ajo	0.00	100.20	100.00%
	X ₂	Avena F.	205.94	205.94	0.00%
	X ₃	Brócoli OI	54.10	0.00	-100.00%
	X ₄	Cacahuatate OI	16.94	55.39	226.98%
	X ₅	Cebada	4,838.32	4,838.32	0.00%
	X ₆	Cebolla OI	16.41	16.37	-0.24%
	X ₇	Frijol OI	123.32	123.32	0.00%
	X ₈	Garbanzo OI	289.27	423.16	46.29%
	X ₉	Lechuga	0.78	24.87	3088.46%
	X ₁₀	Tomate OI	65.25	413.16	533.20%
	X ₁₁	Trigo	17,265.72	15,731.14	-8.89%
	X ₁₂	Zanahoria OI	35.23	0.00	-100.00%
Primavera- Verano	X ₁₃	Brócoli PV	6.44	23.31	261.96%
	X ₁₄	Cacahuatate PV	210.18	343.99	63.66%
	X ₁₅	Calabacita	25.46	0.00	-100.00%
	X ₁₆	Camote	53.87	62.60	16.21%
	X ₁₇	Cebolla PV	21.63	59.64	175.73%
	X ₁₈	Cilantro	12.62	14.75	16.88%
Primavera- Verano	X ₁₉	Frijol PV	338.91	338.91	0.00%
	X ₂₀	Garbanzo PV	81.13	123.09	51.72%
	X ₂₁	Maíz PV	28,827.02	19,995.63	-30.64%
	X ₂₂	Sorgo PV	3,219.70	1,787.32	-44.49%
	X ₂₃	Tomate PV	135.81	240.84	77.34%
	X ₂₄	Zanahoria PV	29.96	51.69	72.53%
Perennes	X ₂₅	Alfalfa	2,146.55	1,896.64	-11.64%
	X ₂₆	Espárrago	2,293.73	2,456.63	7.10%
	X ₂₇	Fresa	0.00	372.86	100.00%
	X ₂₈	Nopal	215.59	215.59	0.00%
Segundos Cultivos	X ₂₉	Maíz SC	15,870.70	24,702.09	55.65%
	X ₃₀	Sorgo SC	6,829.78	15,124.69	121.45%
Superficie O-I			22,911.28	21,931.87	-4.27%
Superficie P-V			32,962.73	23,041.77	-30.10%
Superficie Perennes			4,655.87	4,941.72	6.14%
Superficie SC			22,700.48	39,826.78	75.44%
SUPERFICIE TOTAL			83,230.36	89,742.14	7.82%
SUPERFICIE DEL DR011			76,709.00	76,709.00	

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del modelo base.

5.4.3. Volumen utilizado

Respecto al uso del agua, el volumen de 505,351 millares de m³, que se desglosa en el Cuadro 5.20, corresponde al volumen mensual observado en la operación del año agrícola 2019-2020, y fue el mismo que se utilizó en la implementación y calibración del MPL Base. En el mismo cuadro, se puede apreciar que, existen diferencias notables en los meses de mayo, junio y julio, provocado por la asignación de mayor superficie al ciclo P-V y Segundos cultivos en la optimización del MPL, lo cual, originó que el requerimiento de riego en dichos meses, sea mayor.

Cuadro 5.20. Relación de volúmenes mensuales derivados y estimados. Año agrícola 2019-202 (Millares m³, dam³).

Mes	MPL Base (Estimados)	Real 2019-2020 (Observados)
Vol. Octubre	0.00	0.00
Vol. Noviembre	0.00	0.00
Vol. Diciembre	39,128.69	39,372.00
Vol. Enero	35,685.29	35,985.56
Vol. Febrero	42,806.39	43,884.32
Vol. Marzo	86,373.12	93,099.27
Vol. Abril	72,505.77	89,333.43
Vol. Mayo	127,385.72	110,748.96
Vol. Junio	68,288.80	61,847.50
Vol. Julio	27,128.60	25,179.18
Vol. Agosto	6,048.66	5,900.82
Vol. Septiembre	0.00	0.00
TOTAL (Millares m³)	505,351.04	505,351.04

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del modelo base e información del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma para el ciclo 2019-2020.

Para verificar la relación entre los volúmenes mensuales observados y los estimados con los coeficientes de requerimiento de riego, se generó un diagrama de dispersión (Figura 5.10), lo que resultó en un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9633, lo que demostró un adecuado ajuste entre el volumen observado en ciclo 2019-2020 y el estimado.

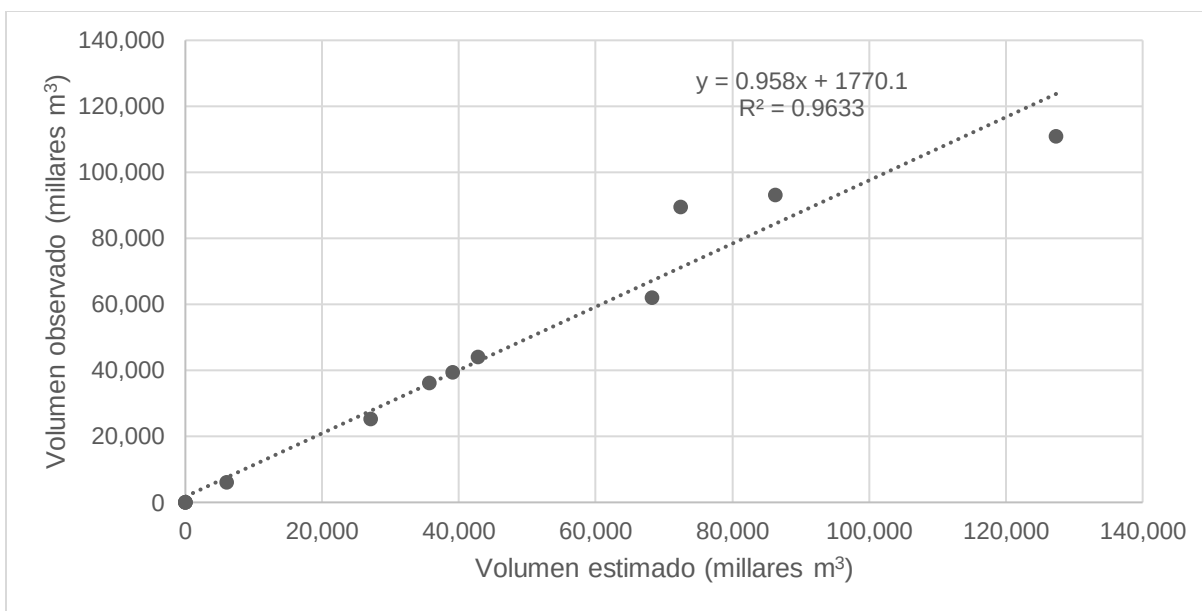


Figura 5.10. Diagrama de dispersión entre volúmenes observados y volúmenes estimados.

5.5. Escenarios contruidos a partir del MPL-Base.

Los tres escenarios analizados con respecto a disponibilidad de agua, se formularon con base a un análisis estadístico de la probabilidad de las aportaciones al vaso de almacenamiento. Para estimar los volúmenes esperados en el vaso, se usó la distribución Log Normal y se definió un nivel de probabilidad de ocurrencia del 25, 50 y 75 por ciento de aportaciones (cuartiles), correspondientes a un año seco, medio y húmedo como disponibilidad de agua en un año agrícola.

En el Cuadro 5.21, se puede observar el volumen estimado de los tres escenarios contruidos, el beneficio neto a precios del ciclo agrícola 2019-2020 y el área total regada. Así mismo se muestra el volumen de 505,531.04 millares de m³, que corresponde al 28% de probabilidad de aportaciones, el mismo utilizado para calibrar el MPL.

Cuadro 5.21. Volumen, Beneficio Neto y superficie regada en los escenarios establecidos.

Escenario Probabilidad (%)	Volumen disponible (Millar m³)	Volumen utilizado (Millar m³)	Beneficio (Millones \$)	Área Regada (ha)
MPL Base Prob (28%)	505,351.04	505,351.04	1,294.68	89,742.14
MPL01 Prob. (25%)	478,556.29	478,556.29	1,225.26	82,697.89
MPL02 Prob. (50%)	622,265.08	622,265.08	1,435.44	102,084.12
MPL03 Prob. (75%)	809,129.11	749,218.32	1,497.23	119,656.13

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del modelo base (MPL-Base) y el modelo al 25% probabilidad (MPL01), modelo al 50% (MPL02) y modelo al 75 de probabilidad (MPL03).

De acuerdo con la tabla anterior, es posible observar que conforme el nivel de probabilidad establecido es más alto, se asegura que el agua pueda satisfacer un área de riego mayor, sin embargo, también es posible apreciar que, a un nivel de probabilidad del 75%, se riega la totalidad del área disponible en el Distrito de Riego 011, pero es altamente probable que el volumen restante se desperdicie.

5.5.1. Escenario con una probabilidad del 25% de ocurrencia (MPL01)

El escenario MPL01, simuló un año seco, para lo cual se estableció una probabilidad del 25% de que ocurra un evento menor o igual a 478,566 millares de m³, el cual se comparó con el MPL Base, el cual fue calibrado con un volumen de 505,351.04 millares de m³, que corresponden al 28% de aportaciones al vaso.

De acuerdo con el Cuadro 5.21, el beneficio neto, respecto al MPL-Base, disminuye un 5.36% y la superficie decrece un 7.85%. La mayoría de los cultivos permanecen sin variación, a excepción del Sorgo SC (Figura 5.11) el cual se reduce un 45.37%, lo cual corresponde con Godínez *et al.* (2007) y Ramírez *et al* (2009) que, en sorgo, dado su alta demanda de agua y baja rentabilidad, se reduce la superficie.

Por otra parte, también es posible observar en la Figura 5.12, que se excluye el cultivo de la lechuga, lo anterior se debe a que su beneficio económico se encuentra entre los diez más bajos, y dado que el MPL al no podía destinar menos superficie a la establecida como mínima en las restricciones para cereales y granos como cebada, trigo, avena y alfalfa, optó por suprimir superficie para la lechuga. A sí mismo, la fresa tuvo una reducción del 42.07%, lo que se explica debido a que, si bien tiene un alto beneficio

económico, es el cultivo con mayor requerimiento de riego, por lo que, al disminuir su superficie, el MPL garantiza la demanda de agua en todos los ciclos sin superar la disponibilidad.

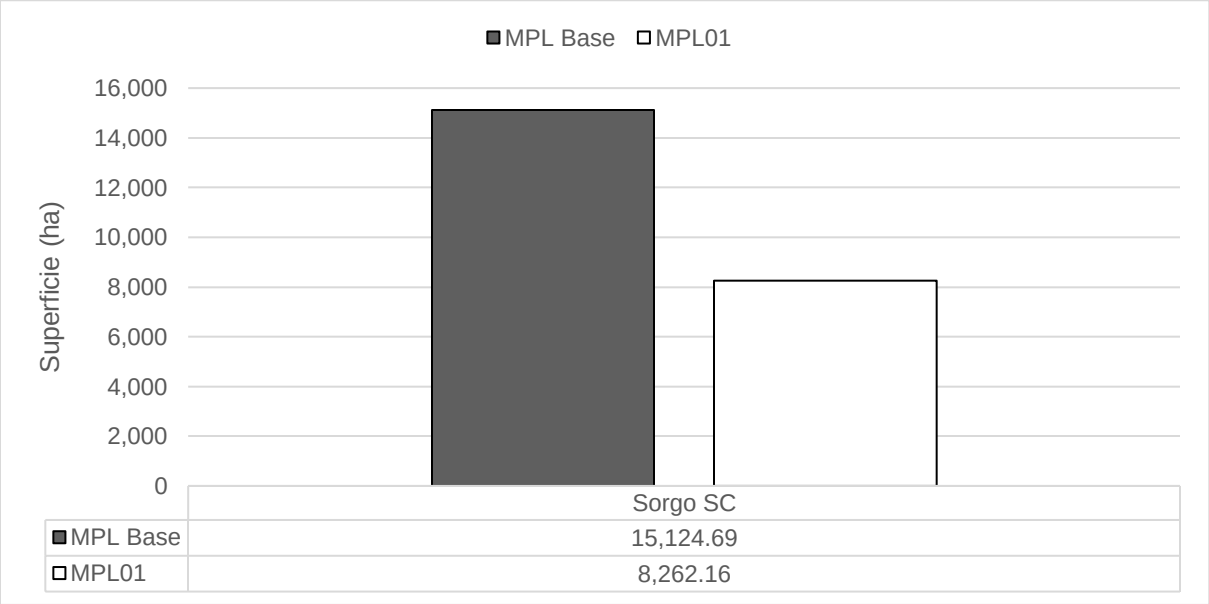


Figura 5.11. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 25% probabilidad (MPL01), para los cultivos de sorgo SC.

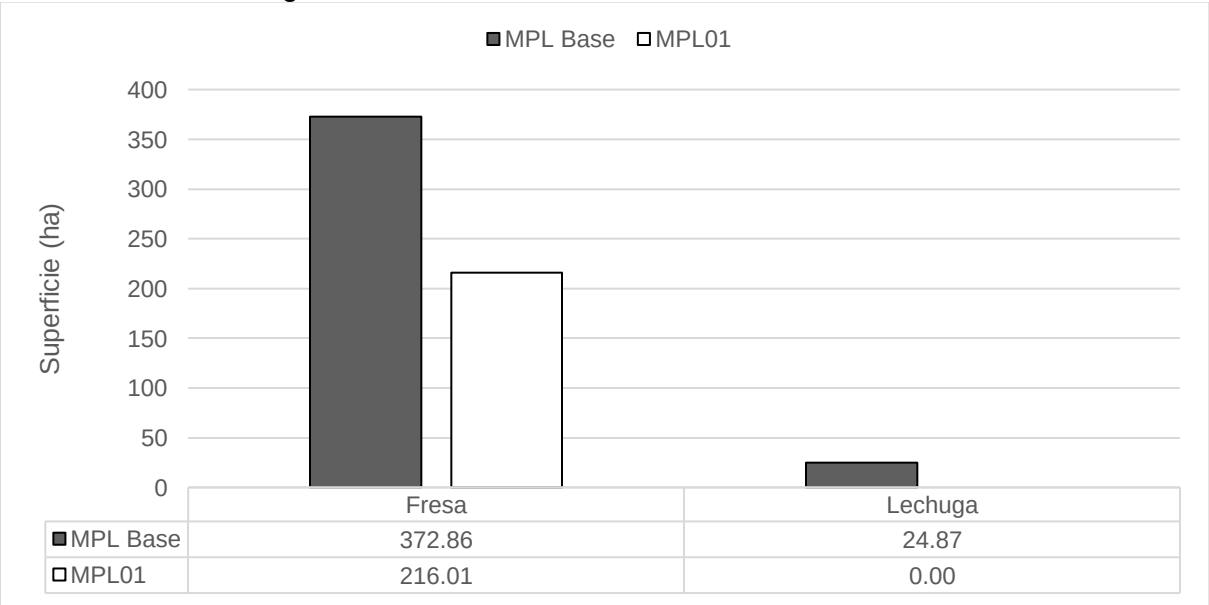


Figura 5.12. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 25% probabilidad (MPL01), para los cultivos de fresa y lechuga.

Cuadro 5.22. Patrón de cultivos y superficie sembrada (ha) del MPL Base y del escenario al 25% probabilidad (MPL01).

Ciclo	Variable	Cultivo	MPL Base	MPL01 Prob. (25%)
Otoño-Invierno	X ₁	Ajo	100.20	100.20
	X ₂	Avena F.	205.94	205.94
	X ₃	Brócoli OI	0.00	0.00
	X ₄	Cacahuate OI	55.39	55.39
	X ₅	Cebada	4,838.32	4,838.32
	X ₆	Cebolla OI	16.37	16.37
	X ₇	Frijol OI	123.32	123.32
	X ₈	Garbanzo OI	423.16	423.16
	X ₉	Lechuga	24.87	0.00
	X ₁₀	Tomate OI	413.16	413.16
	X ₁₁	Trigo	15,731.14	15,731.14
	X ₁₂	Zanahoria OI	0.00	0.00
Primavera-Verano	X ₁₃	Brócoli PV	23.31	23.31
	X ₁₄	Cacahuate PV	343.99	343.99
	X ₁₅	Calabacita	0.00	0.00
	X ₁₆	Camote	62.60	62.60
	X ₁₇	Cebolla PV	59.64	59.64
	X ₁₈	Cilantro	14.75	14.75
Primavera-Verano	X ₁₉	Frijol PV	338.91	338.91
	X ₂₀	Garbanzo PV	123.09	123.09
	X ₂₁	Maíz PV	19,995.63	19,995.63
	X ₂₂	Sorgo PV	1,787.32	1,787.32
	X ₂₃	Tomate PV	240.84	240.84
	X ₂₄	Zanahoria PV	51.69	51.69
Perennes	X ₂₅	Alfalfa	1,896.64	1,896.64
	X ₂₆	Espárrago	2,456.63	2,456.63
	X ₂₇	Fresa	372.86	216.01
	X ₂₈	Nopal	215.59	215.59
Segundos Cultivos	X ₂₉	Maíz SC	24,702.09	24,702.09
	X ₃₀	Sorgo SC	15,124.69	8,262.16
Superficie O-I			21,931.87	21,907.00
Superficie P-V			23,041.77	23,041.77
Superficie Perennes			4,941.72	4,784.87
Superficie SC			39,826.78	32,964.25
SUPERFICIE TOTAL			89,742.14	82,697.89
SUPERFICIE DEL DR011			76,709.00	76,709.00

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del modelo base (MPL-Base) y modelo al 25% probabilidad (MPL01).

5.5.2. Escenario con una probabilidad del 50% de ocurrencia (MPL02)

En el escenario MPL02, se simuló un año con disponibilidad de agua normal, para lo cual se estableció una probabilidad del 50% de que ocurra un evento menor o igual a 622,265 millares de m³. De acuerdo con el Cuadro 5.21, el beneficio neto, respecto al MPL-Base, aumenta un 10.87% y la superficie sembrada se incrementa un 13.75%.

En la Figura 5.14 es posible observar que, con el incremento en la disponibilidad de agua, es posible ampliar el área sembrada en cultivos con mayor beneficio económico de otoño-invierno como zanahoria O-I, el brócoli O-I, así como de primavera-verano como la calabacita; e incluso la producción de cultivos con requisitos de agua relativamente altos como son alfalfa y cultivos de otoño invierno como el trigo, frijol y avena, así como maíz P-V, Sorgo P-V, Sorgo SC (Figura 5.13). Cabe resaltar que no hubo incremento en los cultivos más redituables como ajo, tomate, fresa, cebolla nopal y camote, ya que estos cultivos se encuentran restringidos, por razones de mercado, a una superficie máxima, por lo que el MPL no se le permite asignar una superficie mayor a la definida.

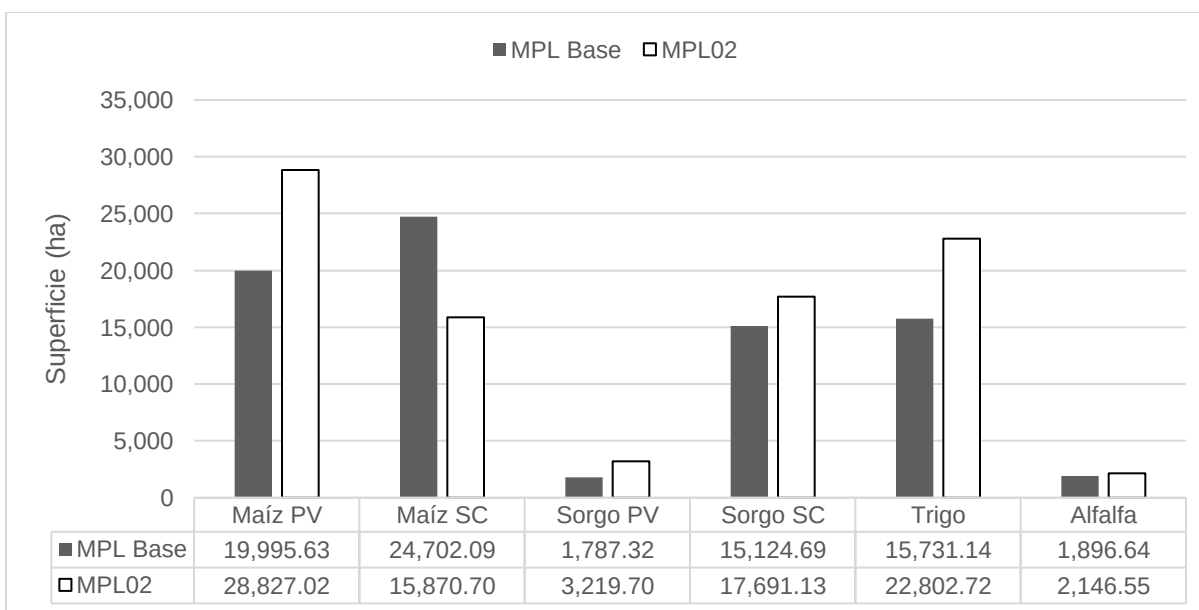


Figura 5.13. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 50% probabilidad (MPL02), para los cultivos de maíz, sorgo, trigo y alfalfa. .

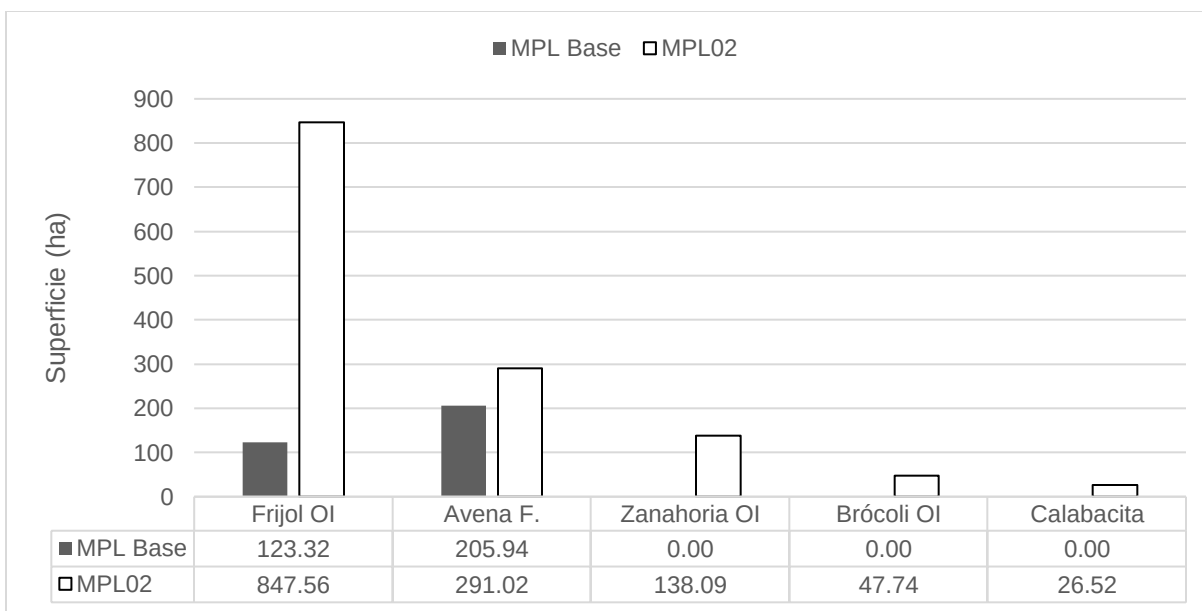


Figura 5.14. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 50% probabilidad (MPL02), para los cultivos de frijol O-I, avena forrajera, zanahoria O-I, brócoli O-I y calabacita.

Cuadro 5.23. Patrón de cultivos y superficie sembrada (ha) del MPL Base y del escenario al 50% probabilidad (MPL02).

Ciclo	Variable	Cultivo	MPL Base Prob. (28%)	MPL02 Prob. (50%)
Otoño-Invierno	X ₁	Ajo	100.20	100.20
	X ₂	Avena F.	205.94	291.02
	X ₃	Brócoli OI	0.00	47.74
	X ₄	Cacahuate OI	55.39	55.39
	X ₅	Cebada	4,838.32	4,838.32
	X ₆	Cebolla OI	16.37	16.37
	X ₇	Frijol OI	123.32	847.56
	X ₈	Garbanzo OI	423.16	423.16
	X ₉	Lechuga	24.87	24.87
	X ₁₀	Tomate OI	413.16	413.16
	X ₁₁	Trigo	15,731.14	22,802.72
	X ₁₂	Zanahoria OI	0.00	138.09
Primavera-Verano	X ₁₃	Brócoli PV	23.31	23.31
	X ₁₄	Cacahuate PV	343.99	343.99
	X ₁₅	Calabacita	0.00	26.52
	X ₁₆	Camote	62.60	62.60
	X ₁₇	Cebolla PV	59.64	59.64
	X ₁₈	Cilantro	14.75	14.75
	X ₁₉	Frijol PV	338.91	338.91
	X ₂₀	Garbanzo PV	123.09	123.09
	X ₂₁	Maíz PV	19,995.63	28,827.02
	X ₂₂	Sorgo PV	1,787.32	3,219.70
	X ₂₃	Tomate PV	240.84	240.84
	X ₂₄	Zanahoria PV	51.69	51.69
Perennes	X ₂₅	Alfalfa	1,896.64	2,146.55
	X ₂₆	Espárrago	2,456.63	2,456.63
	X ₂₇	Fresa	372.86	372.86
	X ₂₈	Nopal	215.59	215.59
Segundos Cultivos	X ₂₉	Maíz SC	24,702.09	15,870.70
	X ₃₀	Sorgo SC	15,124.69	17,691.13
Superficie O-I			21,931.87	29,998.60
Superficie P-V			23,041.77	33,332.06
Superficie Perennes			4,941.72	5,191.63
Superficie SC			39,826.78	33,561.83
SUPERFICIE TOTAL			89,742.14	102,084.12
SUPERFICIE DEL DR011			76,709.00	76,709.00

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del modelo base (MPL-Base) y modelo al 50% probabilidad (MPL02).

5.5.3. Escenario con una probabilidad del 75% de ocurrencia (MPL03)

En el escenario MPL03, se simuló un año húmedo, para lo cual se estableció una probabilidad del 75% de que ocurra un evento menor o igual a 809,129 millares de m³. Es importante señalar que, de acuerdo con el Cuadro 5.21, hubo una diferencia del 7.40% entre el volumen disponible y el volumen utilizado por el MPL, lo cual se debe a que, con el volumen disponible, a este nivel de probabilidad, es posible regar la totalidad del área disponible en el Distrito de Riego 011 utilizando únicamente un volumen de 749,218.32 millares de metros cúbicos.

El beneficio neto, respecto al MPL-Base, aumenta un 15.65% y la superficie sembrada se incrementa un 33.33%. Dado que en este escenario es posible regar la totalidad del área disponible en el Distrito de Riego, se incrementa la superficie en cereales y granos como sorgo P-V, sorgo SC, trigo O-I, cebada O-I y frijol O-I, así como la avena y alfalfa (Figura 5.15 y Figura 5.16). Lo cual corresponde con Ortega *et al.* (2009) y Martínez *et al.* (2021), y quienes afirman que, a mayor disponibilidad de agua, se riegan cultivos menos redituables. Bajo este panorama, es posible afirmar que, una planeación a una probabilidad mayor al 75% logrará cubrir los requerimientos hídricos del patrón de cultivos, sin embargo, también es muy probable que se desperdicie el agua que no es aprovechada por los cultivos.

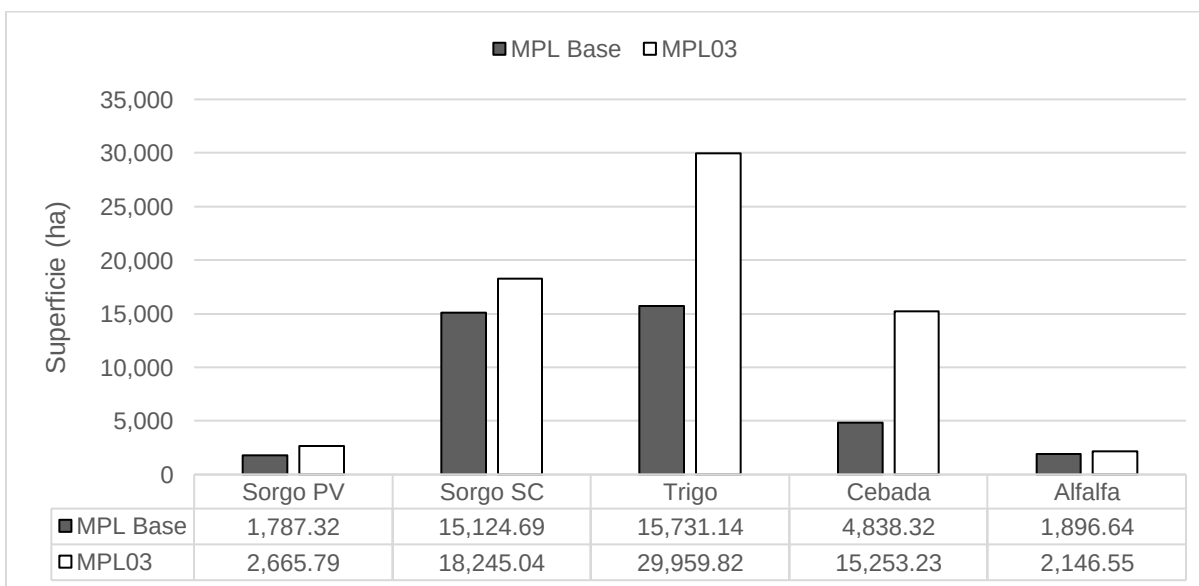


Figura 5.15. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 75% probabilidad (MPL03), para los cultivos de Sorgo P-V, Sorgo SC, Trigo, Cebada y Alfalfa..

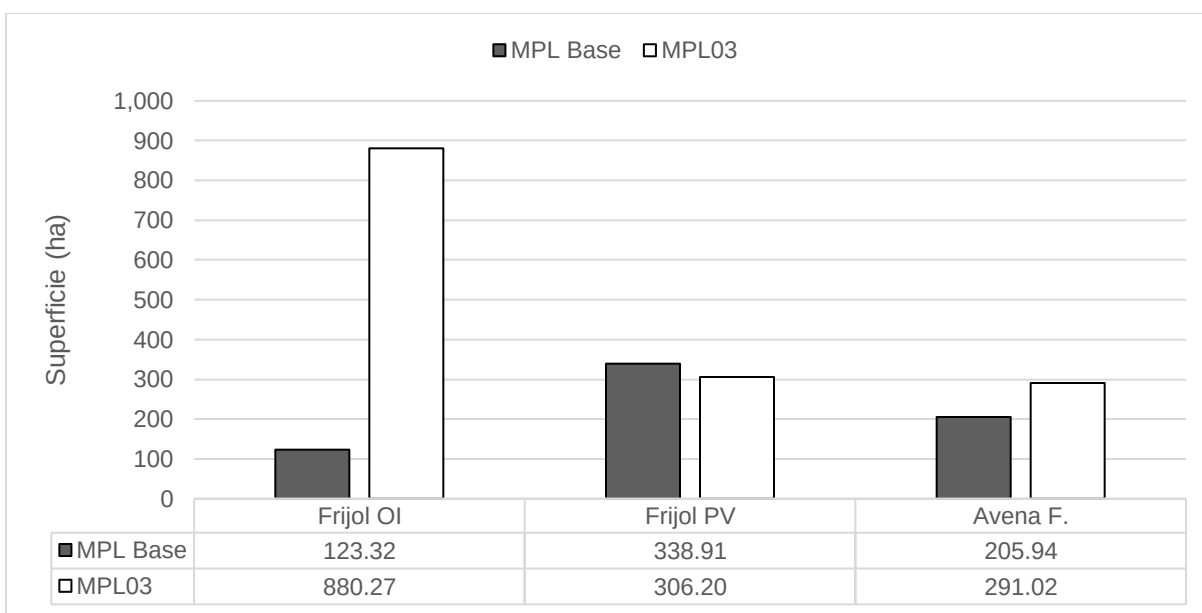


Figura 5.16. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 75% probabilidad (MPL03), para los cultivos de frijol y avena forrajera.

Así mismo es posible apreciar que se agregan al patrón los cultivos de zanahoria O-I, brócoli O-I y calabacita (Figura 5.17) con la superficie máxima otorgada en las restricciones del DR011, ya que, a mayor disponibilidad de agua, es posible cubrir los requerimientos de riego en el ciclo de otoño, tal como sucede en el escenario MPL02 con una probabilidad del 50%.

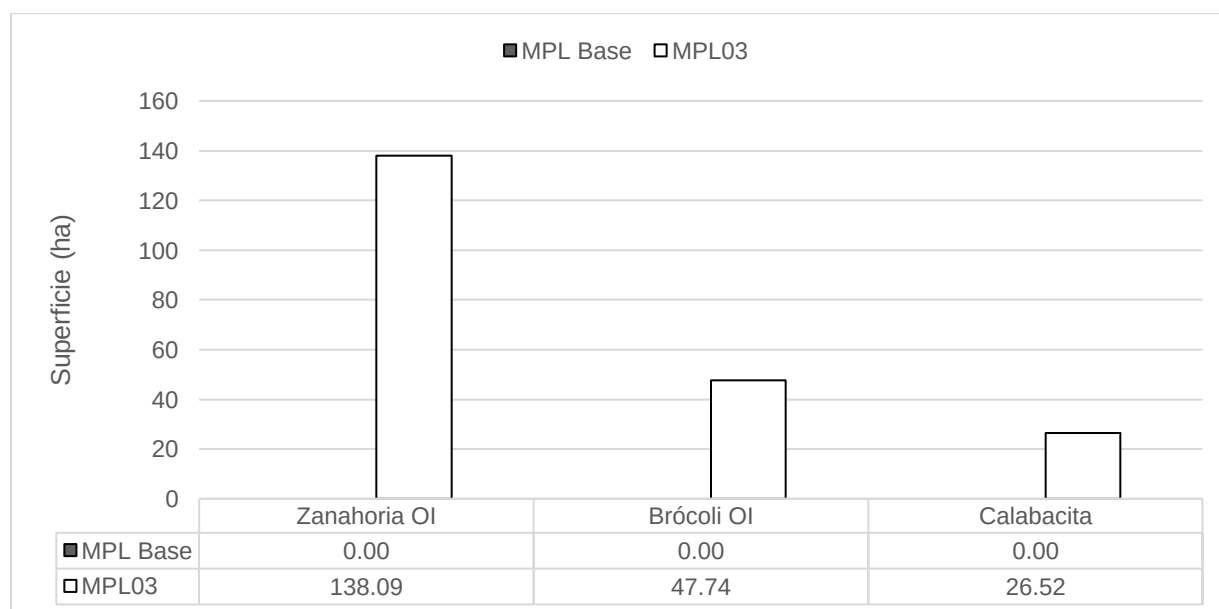


Figura 5.17. Patrón de cultivo óptimo (MPL Base) vs escenario al 75% probabilidad (MPL03), para los cultivos de Zanahoria O-I, Brócoli O-I y calabacita.

Cuadro 5.24. Patrón de cultivos y superficie sembrada (ha) del MPL Base y del escenario al 75% probabilidad (MPL03).

Ciclo	Variable	Cultivo	MPL Base Prob. (28%)	MPL03 Prob. (75%)
Otoño-Invierno	X ₁	Ajo	100.20	100.20
	X ₂	Avena F.	205.94	291.02
	X ₃	Brócoli OI	0.00	47.74
	X ₄	Cacahuete OI	55.39	55.39
	X ₅	Cebada	4,838.32	15,253.23
	X ₆	Cebolla OI	16.37	16.37
	X ₇	Frijol OI	123.32	880.27
	X ₈	Garbanzo OI	423.16	423.16
	X ₉	Lechuga	24.87	24.87
	X ₁₀	Tomate OI	413.16	413.16
	X ₁₁	Trigo	15,731.14	29,959.82
	X ₁₂	Zanahoria OI	0.00	138.09
Primavera-Verano	X ₁₃	Brócoli PV	23.31	23.31
	X ₁₄	Cacahuete PV	343.99	343.99
	X ₁₅	Calabacita	0.00	26.52
	X ₁₆	Camote	62.60	62.60
	X ₁₇	Cebolla PV	59.64	59.64
	X ₁₈	Cilantro	14.75	14.75
	X ₁₉	Frijol PV	338.91	306.20
	X ₂₀	Garbanzo PV	123.09	123.09
	X ₂₁	Maíz PV	19,995.63	19,995.63
	X ₂₂	Sorgo PV	1,787.32	2,665.79
	X ₂₃	Tomate PV	240.84	240.84
	X ₂₄	Zanahoria PV	51.69	51.69
Perennes	X ₂₅	Alfalfa	1,896.64	2,146.55
	X ₂₆	Espárrago	2,456.63	2,456.63
	X ₂₇	Fresa	372.86	372.86
	X ₂₈	Nopal	215.59	215.59
Segundos Cultivos	X ₂₉	Maíz SC	24,702.09	24,702.09
	X ₃₀	Sorgo SC	15,124.69	18,245.04
Superficie O-I			21,931.87	47,603.32
Superficie P-V			23,041.77	5,191.63
Superficie Perennes			4,941.72	23,914.05
Superficie SC			39,826.78	42,947.13
SUPERFICIE TOTAL			89,742.14	119,656.13
SUPERFICIE DEL DR011			76,709.00	76,709.00

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del modelo base (MPL-Base) y modelo al 75% probabilidad (MPL03).

5.6. Precio sombra del agua o valor económico del agua de riego

El precio sombra tiene muchas definiciones en la literatura, sin embargo, en este trabajo se interpretó, acorde con la metodología aplicada (programación lineal), como la máxima cantidad de dinero que un usuario estaría dispuesto a pagar por tener disponible un volumen adicional para la producción agrícola en situación de escasez (Palacios y Exebio, 1989), pues, esta unidad adicional incrementaría el ingreso neto del productor en la medida en que respete el patrón de cultivos determinado por el MPL (Martínez *et al.*, 2019).

En el Cuadro 5.25 se observan los precios sombra del agua de riego para los cuatro escenarios analizados en el MPL, donde se señala el precio máximo que los agricultores estarían dispuestos a pagar por cada metro cúbico adicional de agua en un año agrícola.

Cuadro 5.25. Precio sombra, volumen disponible, beneficio neto y superficie regada en los escenarios establecidos.

Escenario	Productividad Marginal (\$/m ³)	Volumen disponible (Millar m ³)	Volumen utilizado (Millar m ³)	Beneficio Neto (Millones \$)	Área Regada (ha)
MPL Base Prob. (28%)	2.522	505,351.04	505,351.04	1,294.68	89,742.14
MPL01 Prob. (25%)	2.886	478,556.29	478,556.29	1,225.26	82,697.89
MPL02 Prob. (50%)	0.723	622,265.08	622,265.08	1,435.44	102,084.12
MPL03 Prob. (75%)	0.000	809,129.11	749,218.32	1,497.23	119,656.13

Fuente: Elaboración propia, con base en los resultados del modelo base (MPL-Base) y modelo al 25% probabilidad (MPL01), modelo al 50% (MPL02) y el modelo al 75 de probabilidad (MPL03).

Como es posible observar en el cuadro anterior, la disposición a pagar (precio sombra del agua) disminuye a medida que se dispone de mayor cantidad de agua, lo cual concuerda con lo descrito por Jabeen *et al* (2006), en Sargodha Pakistán, y con lo reportado por Ortega *et al* (2009), Zetina *et al* (2013) y Martínez *et al* (2021), quienes afirman que cuando existe una reducción en la disponibilidad de agua, existe una reconversión del patrón de cultivos hacer un uso más eficiente del agua, regando aquellos cultivos que son más rentables para elevar la productividad marginal del agua.

Como es posible apreciar en el Cuadro 5.25, el precio sombra en el MPL-Base y el MPL01 es similar, y se debe a que el volumen con el que se calibró el MPL Base, tiene una probabilidad de ocurrencia del 28% (con base en el modelo de probabilidad Log-Normal), y es esta variación de sólo el 3% en la probabilidad de ocurrencia en el volumen disponible, lo que origina el precio sombra sea similar. Ahora bien, la reducción en la superficie de riego en el escenario del MPL01, sin una significativa variación en el precio sombra se debe a, como se había explicado anteriormente, que a medida que se disminuye la disponibilidad de agua, la asignación se limita a cultivos que generen mayor contribución neta al beneficio neto, sin embargo, eventualmente, para cada cultivo llega un punto, a partir del cual, el beneficio económico no compensa su requerimiento de riego, por lo que asignarle un volumen adicional ya no resulta económica viable, es entonces cuando el MPL reduce su superficie o lo descarta del patrón de cultivos, provocando una la reducción en área regada y un ligero cambio en el precio sombra del agua.

La variación de un 71.34% entre el precio sombra en el MPL-Base y el MPL-02, concuerda con lo reportado por Ortega *et al.* (2009), quien señala a medida que aumenta la disponibilidad de agua, se agregan otros cultivos de menor rentabilidad o de mayor requerimiento de riego, causando que el precio sombra del agua disminuya, lo cual concuerda con lo observado en el Distrito de Riego 011, donde la disposición a pagar disminuye a medida que se utilizaban cantidades cada vez mayores de agua para riego.

De la misma forma se puede explicar el precio sombra de 0.00 \$/m³ en el modelo MPL03, pues con forme se incrementa el volumen de agua, es posible regar la totalidad del área disponible, por lo que, de seguir incrementando el volumen disponible, el agua se desperdicia y su productividad marginal se reduce a cero, que concuerda con lo reportado por Esmaeili y Shahsavari (2015) para granjas del suroeste de Irán, quien reporta que cuando el valor económico del agua resulto en cero, se debió a que había agua suficiente para el riego y al no poder ocupar todo el volumen disponible, el excedente de agua fue percibida como gratis.

5.6.1. Precio sombra vs cuotas del Distrito de Riego

De acuerdo con la Jefatura del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, las cuotas estimadas por servicio de riego y entrega de agua en bloque para el año agrícola 2019-2020 fue de 0.186 \$/m³, y al comparar el precio sombra de agua que se obtiene fue de 2.522 \$/m³, que resulta 14 veces mayor respecto a la cuota. Los resultados concuerdan con Godínez *et al.* (2006) en la Comarca Lagunera, Ortega *et al.* (2009) en el DR005 Delicias y Martínez *et al* (2021) en el DR100 Alfajayucan, donde al comparar los precios sombra del agua con las tarifas cobradas, se observa que el valor económico del agua es mayor.

El resultado anterior revela las tarifas que los usuarios del Distrito de Riego 011 pagan, no reflejan el verdadero valor de escasez del agua (valor económico), por lo tanto, las cuotas cobradas por el servicio de riego no cumplen su principal finalidad: lograr la autosuficiencia del Distrito de Riego, puesto que son insuficientes para la rehabilitación, operación y mantenimiento de infraestructura hidráulica en el DR011.

Con base en los resultados, es factible, respetando las capacidades socioeconómicas de los usuarios del Distrito, un incremento gradual de las cuotas por servicio de riego hasta el valor del precio sombra del agua.

Cabe resaltar que el valor económico del agua derivado de esta investigación es válido, siempre y cuando se cumplan los supuestos considerados en el modelo, ya que una alteración en los rendimientos o fluctuación en los costos de producción pueden modificarlo. Así mismo, es sólo un indicador del precio del agua en la región, y dado que la cantidad consumida de agua responde de manera inelástica a cambios en el precio, no debe tomarse como el principal criterio para establecer políticas que promuevan la distribución y uso eficiente.

5.7. Estrategias de planeación de riego en función de la demanda y disponibilidad del agua

Con base en los resultados, es posible proponer las siguientes estrategias de planeación de riego en función de la demanda y disponibilidad del agua:

- 1) Formular planes de riego con base en la disponibilidad de agua entre 600 y 740 hm³, guardando el volumen excedente para para el siguiente año agrícola, con el propósito de generar mayor utilidad.
- 2) Dar seguimiento a los planes de riego con la finalidad de que su ejecución se verifique, en la medida de lo posible, el cumplimiento la planeación de los ciclos agrícolas, la superficie a establecer de cada cultivo autorizado y las extracciones a las presas.
- 3) Sembrar de cultivos de baja demanda de agua como sorgo, garbanzo, frijol y cebada, considerando las expectativas del mercado y rentabilidad.
- 4) Restringir la superficie sembrada de cultivos de media y alta demanda de como maíz y trigo.
- 5) Mejorar la productividad del agua con cultivos que de mayor beneficio económico y media demanda de agua como el espárrago.
- 6) Disminución de cultivos de otoño-invierno e incremento de primavera-verano.
- 7) Campañas de concientización entre los usuarios del Distrito de Riego, de la problemática de la escasez de agua como recurso finito y escaso.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este apartado se describirán las conclusiones a las que se llegaron con la metodología utilizada y posteriormente se expondrán recomendaciones con base en los resultados del trabajo de investigación.

6.1. Conclusiones

De acuerdo con la metodología propuesta para estimar el valor económico del agua de riego o su valor marginal en condiciones de escasez, resultó ser catorce veces más alta ($2.52 \text{ \$/m}^3$) que la tarifa por servicio de riego ($0.186 \text{ \$/m}^3$) en el Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma.

La asignación óptima de los recursos agua, tierra a un patrón de cultivos representativo y tradicional permitió maximizar e incrementar en 7% el beneficio neto de los productores.

La reasignación de los volúmenes de demanda y disponibilidad de agua, así como la reducción y cambio de fecha de siembra de los cultivos con superficie dominante como trigo O-I y maíz-sorgo P-V, es una propuesta de estrategia para la optimización de la planeación del riego con escasez de agua.

El escenario del 25% de probabilidad de disponibilidad de agua, año más seco que 2019-2020 con disponibilidad del 28%, muestra que es posible optimizar el uso de los recursos en época de sequía con un valor económico del agua tope.

Los productores deberían analizar e implementar el incremento de la tarifa por servicio de riego, acompañándola con la tecnificación del riego, manejo del agua y cumplimiento de la planeación del riego, entre otras actividades complementarias.

Para mejorar la planeación de operación del Distrito de Riego 011 se requiere asignar el agua a cultivos de menor demanda de agua y/o mayor rentabilidad, con la finalidad de maximizar el ingreso neto de los usuarios y la productividad del agua.

Las tarifas que los productores del DR011 pagan por el servicio de riego y la entrega de agua en bloque no responde a criterios de eficiencia económica, por lo tanto, el Distrito

no es autosuficiente y requiere subsidios federales para cubrir sus gastos de administración, operación, conservación y mantenimiento.

La disposición a pagar por una unidad de agua adicional es mayor cuando la disponibilidad de agua es baja, es decir, la disposición de pago está en función de la disponibilidad del agua.

Fue posible definir estrategias de planeación de riego con base en los beneficios esperados, el área regada, el patrón de cultivos y la productividad marginal calculados por el modelo, a partir de la disponibilidad probabilística de los volúmenes aportados en el río Lerma.

6.2. Recomendaciones

1. Se recomienda el uso de la programación lineal como herramienta para determinar el potencial económico del recurso agua, que puede ser usado como parte de un estudio integral para el mejoramiento de la infraestructura hidráulica a cargo del Distrito de Riego.
2. Implementar un incremento de las cuotas hasta una tarifa económicamente sostenible para los usuarios del Distrito de riego basada en la disponibilidad de agua, demanda y volumen utilizado.
3. Concientizar a los usuarios del Distrito de riego que el mantenimiento de la infraestructura hidroagrícola del DR011, no es sostenible únicamente con subsidios del Gobierno Federal a través de programas de apoyo, sino que se requiere hacer uso de las cuotas por el servicio de riego.
4. Dar a conocer entre los ejidatarios y pequeños propietarios los problemas de escasez de agua con relación a años anteriores, para que ajusten el patrón de cultivos y se apliquen a cultivos de mayor rentabilidad para el aprovechamiento más eficiente del agua.
5. Se propone realizar una investigación del DR011 que tenga como finalidad un manual de operación que incluya proponer reglas de operación de las presas para diferentes rangos de aportación que permitan aminorar el impacto económico provocado por la disminución del agua disponible para riego.

VII LITERATURA CITADA

- Aguilar Garcés, H. D. & Álvarez Jiménez, R. A. (2002). Valoración económica de bienes ambientales. *Semestre económico*, 5(9). <https://revistas.udem.edu.co/index.php/economico/article/view/1358>.
- Aguilar, L. A. (2010). *Valoración económica del agua en los municipios de Pachuca, Mineral del Monte y Mineral de la Reforma en el estado de Hidalgo*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Chapingo.
- Albi, I. E.; González-Páramo, J.M., Urbanos, R.M. & Zubiri, I. (2017). *Economía Pública I: Fundamentos. Presupuesto y Gastos* (4a ed.). Editorial Ariel.
- Altamirano-Aguilar, A., Valdez-Torres, J. B., Valdez-Lafarga, C., León-Balderrama, J. I., Betancourt-Lozano, M., & Osuna-Enciso, T. (2017). Clasificación y evaluación de los distritos de riego en México con base en indicadores de desempeño. *Tecnología y ciencias del agua*, 08(4), 79–99. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-05>
- Alvarado Boirivant, J. (2009). La programación lineal aplicación de la pequeñas y medianas empresas. *Reflexiones*, 88(1), 89–105. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72912559007>.
- Alvarado-Boirivant, J. (2011). El Análisis Post-Optimal en Programación Lineal Aplicada a la Agricultura. *Reflexiones*, 90(1), 161-173. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72918776010>.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Editorial Limusa - Grupo Noriega Editores.
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., Ortega-Gaucin, D., & Ibañez-Hernández, Ó. (2016). La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 63-76. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1705>.
- Azqueta, O. D., (1994). *Valoración Económica de la Calidad Ambiental*. McGraw- Hill.
- Berbel, J. (2015). Nota sobre valor, coste y renta del agua de riego. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 15(1), 149-154. <https://doi.org/10.7201/earn.2015.01.12>
- Berbel, J., Mesa-Jurado, M. A., & Pistón, J. M. (2011). Value of irrigation water in Guadalquivir Basin (Spain) by residual value method. *Water Resources Management*, 25(6), 1565-1579. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9761-2>.
- Berumen Arellano, S. A. (2017). *Lecciones de Economía para no economistas* (2da ed.). Escuela Superior de Gestión Comercial y Marketing, ESIC Editorial.
- Caballer, V. & Guadalajara, N. (1998). *Valoración económica del agua de riego*. Mundi-Prensa.

- Cabrera Gil Grados, E. M. (2017). *Modelos de programación lineal. Guía para su formulación y solución*. Universidad de Lima Fondo Editorial.
- Caire Martínez, G. (2005). Conflictos por el agua en la Cuenca Lerma-Chapala, 1996-2002. *Región y sociedad*, 17(34), 73-125. <https://doi.org/10.22198/rys.2005.34.a616>
- Cardenete, M.A., Hewings, G.J.D. & Velázquez, E. (2006). Precio del agua y relocalización sectorial del recurso en la economía andaluza. Una aproximación desde un modelo de equilibrio general aplicado. *Estudios de Economía Aplicada*, 24 (3), 1043-1060. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30113807016>
- Castiblanco, R. C. (2003). Alcances y Limitaciones de la Valoración Económica de los Bienes y Servicios Ambientales. *Revista Ensayos de Economía*, 13(1-2), 7-16.
- Castro Ramírez, J. C., Cruz Gutiérrez, F. V., Magaña Zamora, J. D., Martínez Atilano, G., Reyes Martínez, A., & Sainz Zamora, R. O. (2017). La demanda del agua y su asignación eficiente en la agricultura: un caso en Guanajuato, México. *Economía Coyuntural*, 2(2), 145-180. http://www.scielo.org.bo/pdf/ec/v2n2/v2n2_a05.pdf
- CENAPRED (2012). Características e impacto socioeconómico de los principales desastres en la República Mexicana en el año 2011. Serie: Impacto socioeconómico de los desastres en México. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana-Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Chipfupa, U., & Wale, E. (2019). Smallholder willingness to pay and preferences in the way irrigation water should be managed: a choice experiment application in KwaZulu-Natal, South Africa. *Water SA*, 45(3), 383-392. [10.17159/wsa/2019.v45.i3.6735](https://doi.org/10.17159/wsa/2019.v45.i3.6735).
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada* (J. G. Saldarriaga, Trad.). McGraw-Hill.
- Chowdhury, N. T. (2013). Marginal product of irrigation expenses in Bangladesh. *Water Resources and Economics*, 4, 38-51. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2013.11.002>.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2018). *Estadísticas del Agua en México: edición 2018*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2020). *Programa especial derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2021). *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)*. Subdirección General de Administración del Agua, Gerencia de Planificación Hídrica. <http://sina.conagua.gob.mx/sina>.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2022). *Ley Federal de Derechos. Disposiciones aplicables en materia de Aguas Nacionales*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/723707/Ley_Federal_de_Derechos_2022.pdf.
- Coronel de Renolfi, M., & Araujo, P. A. (2004). *La Programación Lineal aplicada al manejo forestal*. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Cruz Gutiérrez, F., Magaña Zamora, J., & Hernández Gen, J. (2016). *Instrumentos económicos para el manejo eficiente del agua en la región Lerma Chapala, en dos subcuencas con alta industrialización*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1768>
- Cruz Gutiérrez, F., Magaña Zamora, J., Celis Rodríguez, F., & Lambarri Beléndez, J. (2017). *Valoración económica del agua para su uso eficiente en la agricultura e industria*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1816>.
- De Alba, E. & Reyes, M. E. (1998). Valoración Económica de los Recursos Biológicos del País. En Conabio (Ed.). *La diversidad biológica de México: Estudio de País*. pp 211-234. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad.
- De La Fuente O'connor, J. L. (1997). *Técnicas de cálculo para sistemas de Ecuaciones. Programación Lineal y Entera*. Editorial Reverté.
- Diario Oficial de la Federación (21 noviembre, 2020). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5600849.
- Díaz Salas, A. M. (2010). *Estadística y Probabilidad en la Hidrología (Diseño Hidrológico)*. Asamblea Nacional de Rectores Fondo Editorial.
- Esmaeili, A., & Shahsavari, Z. (2015). Water allocation for agriculture in southwestern Iran using a programming model. *Applied Water Science*, 5(3), 305-310. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0192-8>
- Fernández, V. E., & Arias, S. C. (2003). La demanda de tecnología ahorradora de agua en la agricultura de regadío. *Revista de Economía Aplicada*, 11(33), 83-100. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=96917633004>.
- Florencio-Cruz, V., Valdivia-Alcalá, R., Scott, C. A. (2002). Productividad del agua en el distrito de riego 011, Alto Río Lerma. *Agrociencia*, 36(4), 483-493. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236409>.

- Fonseca, C. (1998). El valor económico del agua. *Con-texto*, (1), 34-38. <https://revistas.uexternado.edu.co/index.php/contexto/article/view/1681>.
- Garrido Colmenares, A., Palacios Vélez, E., Calatrava Leyva, J., Exebio García, A., Chávez Morales, J. & Mejía Sáenz, E. (2007). *La importancia del valor, costo y precio de los recursos hídricos en su gestión*. Proyecto Regional de Cooperación Técnica para la formación de Economía y Políticas Agrarias y de Desarrollo Rural en América Latina. FODEPAL.
- Godínez-Montoya, L., García-Salazar, J. A., Fortis-Hernández, M., Mora-Flores, J. S., Martínez-Damián, M. Á., Valdivia-Alcalá, R., & Hernández-Martínez, J. (2007). Valor económico del agua en el sector agrícola de la Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*, 25(1), 51-59.
- Guerrero Salas, H. (2009). *Programación lineal aplicada*. Ecoe Ediciones.
- Guzmán-Soria, E., García-Salazar, J. A., Mora-Flores, J. S., Fortis-Hernández, M., Valdivia-Alcalá, R., & Portillo-Vázquez, M. (2006). La demanda de agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia*, 40(6), 793-804. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/510/510>.
- Hernández Ayuso, M. D. C. (2017). *Introducción a la programación lineal* (3ra ed.). Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ciencias.
- Hidalgo Toledo, J. A., Hernández Arce, C., Hernández Barrios, L., Ortiz Rendón, G. A., Camacho González, H. D., Vargas Velázquez, S., Suárez Medina, M.D.A., Castillo Téllez, M., Zavala Vázquez, L.C., Quiroz Vara, L., Castillo Téllez, B., Astudillo Enríquez, C., Patiño Gómez, C., López Carbajal, L.A., Varela Hernández S. & Giles López, R. (2009). *Estrategia general para el rescate ambiental y sustentabilidad de la Cuenca Lerma-Chapala*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Infante-Gil, S., & Zárate de Lara, G. P. (2011). *Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario*. Trillas
- IUSS Working Group WRB (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. Informes Sobre recursos mundiales de suelos 106. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Jabeen, S. A. I. M. A., Ashfaq, M. U. H. A. M. M. A. D., & AHMAD-BAIG, I. (2006). Linear program modeling for determining the value of irrigation water. *J. Agric. Soc. Sci*, 2(2), 101-105. https://www.researchgate.net/profile/Saima-Jabeen/publication/237647762_Linear_Program_Modeling_for_Determining_the_Value_of_Irrigation_Water/links/0a85e53bd22a6267c9000000/Linear-Program-Modeling-for-Determining-the-Value-of-Irrigation-Water.pdf.

- Kong, M. (2010). *Investigación de operaciones: Programación lineal - Problemas de transporte - Análisis de redes*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Ley de Aguas Nacionales (2022, 11 de mayo). Cámara de Diputados del H. Congreso de La Unión. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>
- Lomelí Osuna, J.A. (2019, del 18 al 20 de septiembre). La problemática actual de los distritos de riego en México [Conferencia]. *Quinto Congreso Nacional de Riego y Drenaje*. Mazatlán, Sinaloa, México.
- Long, R. B. (1991). Short run marginal returns from irrigation water. *International Journal of Water Resources Development*, 7(1), 39-44. <https://doi.org/10.1080/07900629108722490>.
- López Baldovín, M. J. L., & Berbel, V. J. (2012). Una revisión de metodologías de estimación de la demanda de agua de riego. Dpto de Economía, Sociología y Política Agrarias. Universidad de Córdoba.
- Martínez-Luna, D., Mora-Flores, J. S., Exebio-García, A. A., Arana-Coronado, O. A., & Arjona-Suárez, E. (2021). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.544>
- Martínez Pérez, R. (2013). *Evaluación del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma a 20 años de su transferencia* [Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados]. Repositorio Colpos Digital. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2109>.
- Mejía-Sáenz, 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. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321408>.
- Mejía-Sáenz, E.; Palacios-Vélez, E.; Exebio-García, A., Santos-Hernández, A.L. (2002). Problemas operativos en el manejo del agua en distritos de riego. *Terra Latinoamericana*, 20(2-), 217-225. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57320215>
- Naciones Unidas (ONU) (2012). *Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica para el agua (SCAE-Agua)*. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. División de Estadística.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2007). *La agricultura y la escasez de agua: enfoque programático de la eficiencia en el uso del agua y la productividad agrícola. 20º período de sesiones*. Comité de Agricultura, COAG/2007/7.

- Ortega-Gaucin, D., (2013). Factores socioculturales que limitan la gestión y el uso sustentable del agua: el caso del Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua. *Artículos y Ensayos de Sociología Rural*, 8(16), 7-19. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/2083>
- Ortega-Gaucin, D., Mejía Sáenz, E., Palacios Vélez, E., Rendón Pimentel, L., & Exebio García, A. (2009). Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego. *Terra Latinoamericana*, 27(3), 219-226. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57313037006>.
- Palacios Figueroa, R. (2017). *Investigación de Operaciones I: Programación lineal*. Alpha Editorial.
- Palacios Vélez, E., & Exebio García, A. (1989). *Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego*. Colegio de Postgraduados.
- Palacios Vélez, E., & Exebio García, A. (2012). *La operación de los sistemas de riego con apoyo de las técnicas de la información*. Colegio de Postgraduados.
- Perú. Ministerio del Ambiente (2015). *Manual de valoración económica del patrimonio natural, Ministerio del Ambiente*. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural.
- Piedra Aguilera, M. A., Vera Reino, J. L., & Cabrera Proaño, C. S. (2017). Valoración económica del agua para la producción agrícola Río San Francisco – Azuay. *PODIUM*, (32), 61-74. <https://doi.org/10.31095/podium.2017.32.5>.
- Pineda, M. I. (2019). *Efectos en el uso del agua en un distrito de riego, ante cambios de política agrícola y mejoras de la investigación para la adaptación al cambio climático* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Chapingo. <http://repositorio.chapingo.edu.mx:8080/handle/20.500.12098/679>.
- Puente Riofrío, M. I., & Gavilánez Álvarez, Ó. D. (2018). *Programación Lineal para la toma de decisiones*. Caracola Editores.
- Ramírez Barraza, B. A., González Estrada, A., Valdivia Alcalá, R., Salas González, J. M., & García Salazar, J. A. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3), 539-550. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>.
- Reyes Martínez, A., Castro Ramírez, J. C., & Martínez Atilano, G. (2019). Transferencia y conservación de la infraestructura hidroagrícola en el Alto Río Lerma, Guanajuato. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 7(20), 65-76. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.20.69247>.
- Reyes, A. (2018). Manejo institucional de los distritos de riego en México y sus implicaciones en la conservación de las obras que se emplean para el riego con agua superficial. Estudio de caso: módulos de riego Valle de Santiago y Cortázar, Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma, Guanajuato [Tesis de doctorado,

- Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000768.
- Shah, T., Hassan, M. U., Khattak, M. Z., Banerjee, P. S., Singh, O. P., & Rehman, S. U. (2009). Is irrigation water free? A reality check in the Indo-Gangetic Basin. *World Development*, 37(2), 422-434. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2008.05.008>.
- SIAP (2021). *Almacenamiento en presas de uso agrícola: Boletín informativo del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 20 Junio 2021*. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural-Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/650816/20_Jun_2021.pdf
- Torres López, M. M., Fernández Guzmán, E. & Reyes Tovar, M. (abril 18- 27, 2017). *Historia, identidad y estrategia de desarrollo del Distrito de Riego 011, Alto Lerma, Guanajuato*. V Congreso de la Red-Issa: Agua, ciudades y poder [Conferencia]. El Colegio de San Luis.
- Torres Suárez, S. L., Tijerina Chávez, L., Ibáñez Castillo, L. A., & Bautista Hernández, M. (2020). Optimización de recursos en la producción de forrajes distrito de riego 028 Tulancingo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(SPE24), 153-163. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2366>
- Trujillo-Murillo, J. & Perales-Salvador, A. (2020). Valoración económica del agua de la presa Solís para uso agrícola. *Tecnología y ciencias del agua*, 11 (4), 339–369. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-04-11>.
- Vega-López, E. (2021). El Valor Económico del Agua [Webinar]. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). <https://youtu.be/gorU6XUYVqE>.
- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernández, F., & Torricelli, R. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Informe sobre temas hídricos (FAO).
- Young, R. A y Loomis, J. B. (2014), *Determining the Economic Value of Water: Concepts and Methods* (2a edición). Routledge.
- Young, R. A. (1996), *Measuring Economic Benefits for Water Investments and Policies*. World Bank (Documento Técnico 338).
- Zetina-Espinosa, A. M., Mora-Flores, J. S., Martínez-Damián, M. Á., 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*, 10(2), 139-156. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722013000200001&lng=es&tlng=es.

ANEXOS

Anexo A

Cuadro A.1. Patrón histórico de cultivos en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

Cultivo	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013
Aguacate	8.00		2.02			3.28		
Ajo	10.00	7.22		6.08		1.53	8.70	
Alfalfa	1,228.83	1,405.97	1,590.12	1,315.20	1,279.43	1,382.47	892.65	721.97
Anís		14.40	6.00			4.65		
Avena f.	124.50	292.36	246.98	160.57	2.00	135.67	113.54	
Brócoli	23.35	125.29	191.29	140.30		207.05	68.00	21.00
Cacahuete	571.39	317.99	190.69	286.41	409.68	327.80	328.23	268.68
Calabacita	25.70	68.54	75.29	29.95	15.00	22.68		
Camote	123.00	141.78	120.35	148.50	68.80	88.93	31.38	2.00
Canola	5.00							
Caña	4.00	2.71	3.00	2.59				
Cebada	12,266.76	13,536.39	15,875.62	19,451.15	8.22	20,281.92	23,700.84	17.93
Cebolla	85.50	185.76	179.28	163.42	59.64	185.00	26.16	2.27
Chayote	12.00	10.46	15.98	12.83	5.43	13.69		
Chile	57.85	42.28	39.41	54.41		44.74		
Cilantro	17.00	42.14	34.91	34.75		30.45		
Col		1.38						
Coliflor					1.00	2.00	11.00	
Durazno		1.90	2.20	1.70		1.00	1.00	
Esparrago	97.02	160.45	316.40	411.27	431.26	573.17	456.15	788.27
Fresa	3.12	2.40						
Frijol	746.80	550.42	803.76	1,596.81	426.64	444.46	128.19	180.18
Garbanzo	295.43	440.72	530.87	621.41	491.99	484.16	94.98	
Gladiola		1.30						
Guayaba	10.00	10.90	13.42	18.88	14.63	15.86	4.90	
Lechuga	17.00		13.72	8.18		35.90	2.00	1.00
Maíz	11,278.90	17,905.73	18,581.38	16,045.74	15,813.24	12,441.47	12,377.43	15,908.80
Melón		0.50	0.40	2.45				
Nopal	136.95	137.29	138.56	130.84	130.88	162.53	122.70	80.67
Pepino	1.00	16.36	7.27			1.00		
Pradera	5.00		5.00	2.00	2.00	3.79		
Sandía	6.60	0.75	7.37	3.00		6.05		
Sorgo	20,312.26	38,448.17	37,401.01	44,960.34	44,938.50	36,867.80	31,132.51	48,608.91
Tomate	323.30	566.89	604.68	694.80	31.35	581.21	25.66	
Tomate r.	6.00	28.79	2.87	1.49		2.70		
Trigo	16,658.03	27,830.57	36,173.21	33,269.69		29,841.86	15,494.77	2.00
Uva	1.00	3.89	1.75	2.12	3.49	1.74		
Zanahoria	29.90	83.54	106.70	75.03	5.25	121.96		
Total	64,491.19	102,385.24	113,281.51	119,651.91	64,138.43	104,318.52	85,020.79	66,603.68

Cultivo	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020	Total
Aguacate								13.30
Ajo		2.00			0.50			36.03
Alfalfa	845.61	1,059.78	1,285.48	1,728.19	1,903.17	1,896.64	2,146.55	20,682.06
Anís								25.05
Avena f.	125.24	120.32	303.55	242.71	271.21	230.77	228.11	2,597.53
Brócoli	29.07	40.49	71.05	57.00	67.19	63.08	60.54	1,164.70
Cacahuete	339.28	240.14	399.38	201.58	315.63	292.39	227.12	4,716.39
Calabacita	12.71	12.61	37.41	38.88	69.09		25.46	433.32
Camote	82.97	77.21	78.78	73.54	62.60	59.30	53.87	1,213.01
Canola								5.00
Caña								12.30
Cebada	23,856.22	11,977.05	23,661.17	22,353.63	17,459.10	10,721.66	4,857.24	220,024.90
Cebolla	37.61	67.60	85.59	75.64	57.75	79.78	39.82	1,330.82
Chayote			1.38	2.84				74.61
Chile	5.90	27.92	62.93			6.70		342.14
Cilantro		3.01	46.59	3.18		9.84	13.86	235.73
Col			5.29					6.67
Coliflor								14.00
Durazno								7.80
Esparrago	1,256.53	1,275.21	2,072.29	3,021.33	2,456.63	3,777.33	2,293.73	19,387.04
Fresa								5.52
Frijol	403.00	592.31	993.66	845.91	1,283.61	712.14	462.23	10,170.12
Garbanzo	227.78	537.82	549.82	462.05	896.20	485.84	370.40	6,489.47
Gladiola		4.65					16.10	22.05
Guayaba			9.75	7.48				105.82
Lechuga	9.30	2.72	16.64	5.50	24.87	2.00	0.78	139.61
Maíz	14,994.63	13,599.15	31,957.06	36,857.46	33,510.19	35,617.10	44,734.64	331,622.92
Melón								3.35
Nopal	77.13	85.74	127.89	162.34	177.65	216.38	215.59	2,103.14
Pepino								25.63
Pradera	4.00				16.00			37.79
Sandía	6.50	8.32	1.68					40.27
Sorgo	37,590.76	15,962.25	20,910.83	14,720.91	16,338.42	15,475.08	10,049.48	433,717.23
Tomate	264.15	371.40	510.95	589.81	654.00	466.11	201.06	5,885.37
Tomate r.			10.35					52.20
Trigo	15,106.13	29,962.82	15,731.14	18,707.95	19,731.96	24,699.75	17,461.59	300,671.47
Uva								13.99
Zanahoria	66.18	102.16	117.56	166.68	109.94	189.78	65.19	1,239.87
Total	95,340.70	76,132.68	99,048.22	100,324.61	95,405.71	95,001.67	83,523.36	1,364,668.22

Fuente: Elaboración propia con base en los datos del Distrito de Riego Alto Río Lerma.

Cuadro A.2. Matriz de coeficientes técnicos del MPL para el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato.

Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Cultivo	Ajo	Avena F.	Brócoli OI	Cacahuete OI	Cebada	Cebolla OI	Frijol OI	Garbanzo OI	Lechuga	Tomate OI	Trigo	Zanahoria OI	Brócoli PV	Cacahuete PV	Calabacita	Camote	...
Superficie																	...
Función Objetivo	165.38	9.24	30.08	21.97	4.90	66.77	16.88	17.09	13.01	76.89	6.77	15.49	42.49	18.21	14.31	52.98	...
Restricciones																	
Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Primeros Cultivos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
Segundos Cultivos																	...
Volumen Total	10.821	5.831	12.988	4.612	7.720	7.749	14.354	3.181	4.677	12.299	9.360	12.515	7.187	5.009	6.969	5.369	...
Vol. Octubre																	...
Vol. Noviembre																	...
Vol. Diciembre	2.893	1.122	3.179		1.740	0.850	0.683	0.917	2.010	1.403	1.654	2.831					...
Vol. Enero	2.537	1.938	2.492	2.961	1.336	3.262	2.125	1.875	0.772	1.632	1.502	2.360					...
Vol. Febrero	3.141	1.787	2.518	0.231	1.929	1.129	0.260	0.041	1.349	0.983	1.731	3.190	2.152	0.429	0.277		...
Vol. Marzo	2.249	0.862	2.836	0.148	2.587	1.597	3.091	0.212	0.546	4.905	3.369	3.048	2.324	1.054	0.163	0.351	...
Vol. Abril		0.069	1.415	0.848	0.127	0.334	5.332	0.063		3.154	1.095	0.878	1.954	2.082	3.084	3.347	...
Vol. Mayo		0.052	0.285	0.423		0.310	2.742	0.034		0.223	0.009	0.208	0.758	0.508	2.175	0.993	...
Vol. Junio			0.263			0.266	0.121	0.040						0.935	1.268	0.678	...
Vol. Julio																	...
Vol. Agosto																	...
Vol. Septiembre																	...
Ajo	1																...
Avena F.		1															...
Brócoli OI			1														...
Cacahuete OI				1													...
Cebada					1												...
Cebolla OI						1											...
Frijol OI							1										...
Garbanzo OI								1									...
Lechuga									1								...
Tomate OI										1							...
Trigo											1						...
Zanahoria OI												1					...
Brócoli PV													1				...
Cacahuete PV														1			...
Calabacita															1		...
Camote																1	...
Cebolla PV																	...
Cilantro																	...
Frijol PV																	...
Garbanzo PV																	...
Maíz PV																	...
Sorgo PV																	...
Tomate PV																	...
Zanahoria PV																	...
Alfalfa																	...
Esparrago																	...
Fresa																	...
Nopal																	...
Maíz SC																	...
Sorgo SC																	...
Brócoli Total			1										1				...
Cacahuete Total				1										1			...
Cebolla Total						1											...
Frijol Total							1										...
Garbanzo Total								1									...
Maíz Total																	...
Sorgo Total																	...
Tomate Total										1							...
Zanahoria Total												1					...
Alfalfa																	...
Avena F.		1															...
Cebada					1												...
Frijol Total							1										...
Sorgo PV																	...
Sorgo SC																	...
Sorgo Total																	...
Trigo											1						...

Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀
Cultivo	...	...	Cebolla PV	Cilantro	Frijol PV	Garbanzo PV	Maíz PV	Sorgo PV	Tomate PV	Zanahoria PV	Alfalfa	Espárrago	Fresa	Nopal	Maíz SC	Sorgo SC
Superficie	...	...														
Función Objetivo	...	...	75.40	24.66	16.17	15.44	19.15	11.48	106.22	17.03	13.36	33.01	91.46	70.56	15.11	7.98

Restricciones																	Signo	Recurso Disponible
Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀		
Primeros Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<=	76,709.00
Segundos Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<=	76,709.00
Volumen Total	...	...	7.349	6.162	9.783	3.839	5.828	5.524	6.754	5.752	7.956	3.820	31.697	3.459	3.645	3.163	<=	505.351
Vol. Octubre	...	...															<=	233,280.00
Vol. Noviembre	...	...															<=	233,280.00
Vol. Diciembre	...	...															<=	233,280.00
Vol. Enero	...	...															<=	233,280.00
Vol. Febrero	...	...	1.142		0.536	1.497	0.021		0.270	2.238	0.638	0.008	4.780	0.184			<=	233,280.00
Vol. Marzo	...	...	2.791	0.634	1.254	0.855	0.547	0.137	1.717	1.293	0.806	0.048	3.523	0.069			<=	233,280.00
Vol. Abril	...	...	1.757	1.290	4.625	1.044	1.744	1.958	4.349	1.724	0.837	0.150	4.914	0.095			<=	233,280.00
Vol. Mayo	...	...	1.629	2.248	2.482	0.423	1.824	1.722	0.399	0.497	1.472	0.053	5.463	0.125	0.005		<=	233,280.00
Vol. Junio	...	...	0.031	1.990	0.886	0.020	1.080	0.962	0.019		2.109	0.889	3.212	1.578	0.096	0.015	<=	233,280.00
Vol. Julio	...	...					0.481	0.541			1.409	1.002	4.012	1.234	2.021	1.917	<=	233,280.00
Vol. Agosto	...	...					0.132	0.204			0.676	1.458	1.834	0.169	0.979	0.956	<=	233,280.00
Vol. Septiembre	...	...									0.008	0.164	1.925	0.006	0.470	0.251	<=	233,280.00
Ajo	...	...									0.001	0.048	2.035		0.073	0.025	<=	233,280.00
Avena F.	...	...															<=	100.20
Brócoli OI	...	...															<=	291.02
Cacahuete OI	...	...															<=	62.10
Cebada	...	...															<=	55.39
Cebolla OI	...	...															<=	23,661.17
Frijol OI	...	...															<=	139.45
Garbanzo OI	...	...															<=	880.27
Lechuga	...	...															<=	423.16
Tomate OI	...	...															<=	24.87
Trigo	...	...															<=	437.83
Zanahoria OI	...	...															<=	29,959.82
Brócoli PV	...	...															<=	172.44
Cacahuete PV	...	...															<=	23.31
Calabacita	...	...															<=	551.39
Camote	...	...															<=	26.52
Cebolla PV	...	...	1														<=	62.60
Cilantro	...	...		1													<=	59.64
Frijol PV	...	...			1												<=	14.75
Garbanzo PV	...	...				1											<=	338.91
Maíz PV	...	...					1										<=	265.83
Sorgo PV	...	...						1									<=	28,827.02
Tomate PV	...	...							1								<=	3,219.70
Zanahoria PV	...	...								1							<=	240.84
Alfalfa	...	...									1						<=	51.69
Espárrago	...	...										1					<=	2,146.55
Fresa	...	...											1				<=	2,456.63
Nopal	...	...												1			<=	372.86
Maíz SC	...	...													1		<=	215.59
Sorgo SC	...	...														1	<=	24,702.09
Brócoli Total	...	...															<=	18,245.04
Cacahuete Total	...	...															<=	71.05
Cebolla Total	...	...	1														<=	399.38
Frijol Total	...	...			1												<=	76.01
Garbanzo Total	...	...				1											<=	1,186.47
Maíz Total	...	...					1										<=	546.25
Sorgo Total	...	...						1									<=	44,697.72
Tomate Total	...	...							1								<=	20,910.83
Zanahoria Total	...	...								1							<=	654.00
Alfalfa	...	...									1						>=	189.78
Avena F.	...	...															>=	1,896.64
Cebada	...	...															>=	205.94
Frijol Total	...	...			1												>=	4,838.32
Sorgo PV	...	...															>=	462.23
Sorgo SC	...	...							1								>=	1,787.32
Sorgo Total	...	...														1	>=	6,829.78
Trigo	...	...							1							1	>=	10,049.48
	...	...															>=	15,731.14

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

Cuadro A.3. Modelo de programación lineal base (MPLBase) para el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato.

Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Cultivo	Ajo	Avena F.	Brócoli OI	Cacahuete OI	Cebada	Cebolla OI	Frijol OI	Garbanzo OI	Lechuga	Tomate OI	Trigo	Zanahoria OI	Brócoli PV	Cacahuete PV	Calabacita	Camote	...
Superficie	100.20	205.94	0.00	55.39	4,838.32	16.37	123.32	423.16	24.87	413.16	15,731.14	0.00	23.31	343.99	0.00	62.60	...
Función Objetivo	165.38	9.24	30.08	21.97	4.90	66.77	16.88	17.09	13.01	76.89	6.77	15.49	42.49	18.21	14.31	52.98	...
Restricciones																	
Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Primeros Cultivos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
Segundos Cultivos																	...
Volumen Total	10.821	5.831	12.988	4.612	7.720	7.749	14.354	3.181	4.677	12.299	9.360	12.515	7.187	5.009	6.969	5.369	...
Vol. Octubre																	...
Vol. Noviembre																	...
Vol. Diciembre																	...
Vol. Enero	2.893	1.122	3.179		1.740	0.850	0.683	0.917	2.010	1.403	1.654	2.831					...
Vol. Febrero	2.537	1.938	2.492	2.961	1.336	3.262	2.125	1.875	0.772	1.632	1.502	2.360					...
Vol. Marzo	3.141	1.787	2.518	0.231	1.929	1.129	0.260	0.041	1.349	0.983	1.731	3.190	2.152	0.429	0.277		...
Vol. Abril	2.249	0.862	2.836	0.148	2.587	1.597	3.091	0.212	0.546	4.905	3.369	3.048	2.324	1.054	0.163	0.351	...
Vol. Mayo		0.069	1.415	0.848	0.127	0.334	5.332	0.063		3.154	1.095	0.878	1.954	2.082	3.084	3.347	...
Vol. Junio		0.052	0.285	0.423		0.310	2.742	0.034		0.223	0.009	0.208	0.758	0.508	2.175	0.993	...
Vol. Julio			0.263			0.266	0.121	0.040						0.935	1.268	0.678	...
Vol. Agosto																	...
Vol. Septiembre																	...
Ajo	1																...
Avena F.		1															...
Brócoli OI			1														...
Cacahuete OI				1													...
Cebada					1												...
Cebolla OI						1											...
Frijol OI							1										...
Garbanzo OI								1									...
Lechuga									1								...
Tomate OI										1							...
Trigo											1						...
Zanahoria OI												1					...
Brócoli PV													1				...
Cacahuete PV														1			...
Calabacita															1		...
Camote																1	...
Cebolla PV																	...
Cilantro																	...
Frijol PV																	...
Garbanzo PV																	...
Maíz PV																	...
Sorgo PV																	...
Tomate PV																	...
Zanahoria PV																	...
Alfalfa																	...
Esparrago																	...
Fresa																	...
Nopal																	...
Maíz SC																	...
Sorgo SC																	...
Brócoli Total			1										1				...
Cacahuete Total				1										1			...
Cebolla Total						1											...
Frijol Total							1										...
Garbanzo Total								1									...
Maíz Total																	...
Sorgo Total																	...
Tomate Total										1							...
Zanahoria Total												1					...
Alfalfa																	...
Avena F.		1															...
Cebada					1												...
Frijol Total							1										...
Sorgo PV																	...
Sorgo SC																	...
Sorgo Total											1						...
Trigo																	...

Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀	
Cultivo	...	...	Cebolla PV	Cilantro	Frijol PV	Garbanzo PV	Maíz PV	Sorgo PV	Tomate PV	Zanahoria PV	Alfalfa	Espárrago	Fresa	Nopal	Maíz SC	Sorgo SC	
Superficie	...	...	59.64	14.75	338.91	123.09	19,995.63	1,787.32	240.84	51.69	1,896.64	2,456.63	372.86	215.59	24,702.09	15,124.69	
Función Objetivo	...	...	75.40	24.66	16.17	15.44	19.15	11.48	106.22	17.03	13.36	33.01	91.46	70.56	15.11	7.98	1,294,678.38

Restricciones																	Recurso Usado	Signo	Recurso Disponible
Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀			
Primeros Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	49,915.36	<=	76,709.00
Segundos Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	67,810.27	<=	76,709.00
Volumen Total	...	...	7.349	6.162	9.783	3.839	5.828	5.524	6.754	5.752	7.956	3.820	31.697	3.459	3.645	3.163	505.351	<=	505.351
Vol. Octubre	...	...															0.00	<=	233,280.00
Vol. Noviembre	...	...															0.00	<=	233,280.00
Vol. Diciembre	...	...															39,128.69	<=	233,280.00
Vol. Enero	...	...															35,685.29	<=	233,280.00
Vol. Febrero	...	...	1.142		0.536	1.497	0.021		0.270	2.238	0.638	0.008	4.780	0.184			42,806.39	<=	233,280.00
Vol. Marzo	...	...	2.791	0.634	1.254	0.855	0.547	0.137	1.717	1.293	0.806	0.048	3.523	0.069			86,373.12	<=	233,280.00
Vol. Abril	...	...	1.757	1.290	4.625	1.044	1.744	1.958	4.349	1.724	0.837	0.150	4.914	0.095			72,505.77	<=	233,280.00
Vol. Mayo	...	...	1.629	2.248	2.482	0.423	1.824	1.722	0.399	0.497	1.409	1.002	4.012	1.234	0.005	0.015	127,385.72	<=	233,280.00
Vol. Junio	...	...	0.031	1.990	0.886	0.020	1.080	0.962	0.019		0.676	1.458	1.834	0.169	0.979	0.956	68,288.80	<=	233,280.00
Vol. Julio	...	...					0.481	0.541			0.008	0.164	1.925	0.006	0.470	0.251	27,128.60	<=	233,280.00
Vol. Agosto	...	...					0.132	0.204			0.001	0.048	2.035		0.073	0.025	6,048.66	<=	233,280.00
Vol. Septiembre	...	...															0.00	<=	233,280.00
Ajo	...	...															100.20	<=	100.20
Avena F.	...	...															205.94	<=	291.02
Brócoli OI	...	...															0.00	<=	62.10
Cacahuete OI	...	...															55.39	<=	55.39
Cebada	...	...															4,838.32	<=	23,661.17
Cebolla OI	...	...															16.37	<=	139.45
Frijol OI	...	...															123.32	<=	880.27
Garbanzo OI	...	...															423.16	<=	423.16
Lechuga	...	...															24.87	<=	24.87
Tomate OI	...	...															413.16	<=	437.83
Trigo	...	...															15,731.14	<=	29,959.82
Zanahoria OI	...	...															0.00	<=	172.44
Brócoli PV	...	...															23.31	<=	23.31
Cacahuete PV	...	...															343.99	<=	551.39
Calabacita	...	...															0.00	<=	26.52
Camote	...	...															62.60	<=	62.60
Cebolla PV	...	...	1														59.64	<=	59.64
Cilantro	...	...		1													14.75	<=	14.75
Frijol PV	...	...			1												338.91	<=	338.91
Garbanzo PV	...	...				1											123.09	<=	265.83
Maíz PV	...	...					1										19,995.63	<=	28,827.02
Sorgo PV	...	...						1									1,787.32	<=	3,219.70
Tomate PV	...	...							1								240.84	<=	240.84
Zanahoria PV	...	...								1							51.69	<=	51.69
Alfalfa	...	...									1						1,896.64	<=	2,146.55
Espárrago	...	...										1					2,456.63	<=	2,456.63
Fresa	...	...											1				372.86	<=	372.86
Nopal	...	...												1			215.59	<=	215.59
Maíz SC	...	...													1		24,702.09	<=	24,702.09
Sorgo SC	...	...														1	15,124.69	<=	18,245.04
Brócoli Total	...	...															23.31	<=	71.05
Cacahuete Total	...	...															399.38	<=	399.38
Cebolla Total	...	...	1														76.01	<=	76.01
Frijol Total	...	...			1												462.23	<=	1,186.47
Garbanzo Total	...	...				1											546.25	<=	546.25
Maíz Total	...	...					1										44,697.72	<=	44,697.72
Sorgo Total	...	...						1								1	16,912.01	<=	20,910.83
Tomate Total	...	...							1								654.00	<=	654.00
Zanahoria Total	...	...								1							51.69	<=	189.78
Alfalfa	...	...									1						1,896.64	>=	1,896.64
Avena F.	...	...															205.94	>=	205.94
Cebada	...	...															4,838.32	>=	4,838.32
Frijol Total	...	...			1												462.23	>=	462.23
Sorgo PV	...	...						1									1,787.32	>=	1,787.32
Sorgo SC	...	...															15,124.69	>=	6,828.78
Sorgo Total	...	...														1	16,912.01	>=	10,049.48
Trigo	...	...														1	15,731.14	>=	15,731.14

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

Cuadro A.4. Modelo de programación lineal a una probabilidad del 25% de ocurrencia (MPL01).

Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Cultivo	Ajo	Avena F.	Brócoli OI	Cacahuete OI	Cebada	Cebolla OI	Frijol OI	Garbanzo OI	Lechuga	Tomate OI	Trigo	Zanahoria OI	Brócoli PV	Cacahuete PV	Calabacita	Camote	...
Superficie	100.20	205.94	0.00	55.39	4,838.32	16.37	123.32	423.16	0.00	413.16	15,731.14	0.00	23.31	343.99	0.00	62.60	...
Función Objetivo	165.38	9.24	30.08	21.97	4.90	66.77	16.88	17.09	13.01	76.89	6.77	15.49	42.49	18.21	14.31	52.98	...
Restricciones																	
Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Primeros Cultivos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
Segundos Cultivos																	...
Volumen Total	10.821	5.831	12.988	4.612	7.720	7.749	14.354	3.181	4.677	12.299	9.360	12.515	7.187	5.009	6.969	5.369	...
Vol. Octubre																	...
Vol. Noviembre																	...
Vol. Diciembre																	...
Vol. Enero	2.893	1.122	3.179		1.740	0.850	0.683	0.917	2.010	1.403	1.654	2.831					...
Vol. Febrero	2.537	1.938	2.492	2.961	1.336	3.262	2.125	1.875	0.772	1.632	1.502	2.360					...
Vol. Marzo	3.141	1.787	2.518	0.231	1.929	1.129	0.260	0.041	1.349	0.983	1.731	3.190	2.152	0.429	0.277		...
Vol. Abril	2.249	0.862	2.836	0.148	2.587	1.597	3.091	0.212	0.546	4.905	3.369	3.048	2.324	1.054	0.163	0.351	...
Vol. Mayo		0.069	1.415	0.848	0.127	0.334	5.332	0.063		3.154	1.095	0.878	1.954	2.082	3.084	3.347	...
Vol. Junio		0.052	0.285	0.423		0.310	2.742	0.034		0.223	0.009	0.208	0.758	0.508	2.175	0.993	...
Vol. Julio			0.263			0.266	0.121	0.040						0.935	1.268	0.678	...
Vol. Agosto																	...
Vol. Septiembre																	...
Ajo	1																...
Avena F.		1															...
Brócoli OI			1														...
Cacahuete OI				1													...
Cebada					1												...
Cebolla OI						1											...
Frijol OI							1										...
Garbanzo OI								1									...
Lechuga									1								...
Tomate OI										1							...
Trigo											1						...
Zanahoria OI												1					...
Brócoli PV													1				...
Cacahuete PV														1			...
Calabacita															1		...
Camote																1	...
Cebolla PV																	...
Cilantro																	...
Frijol PV																	...
Garbanzo PV																	...
Maíz PV																	...
Sorgo PV																	...
Tomate PV																	...
Zanahoria PV																	...
Alfalfa																	...
Esparrago																	...
Fresa																	...
Nopal																	...
Maíz SC																	...
Sorgo SC																	...
Brócoli Total			1										1				...
Cacahuete Total				1										1			...
Cebolla Total						1											...
Frijol Total							1										...
Garbanzo Total								1									...
Maíz Total																	...
Sorgo Total																	...
Tomate Total										1							...
Zanahoria Total												1					...
Alfalfa		1															...
Avena F.					1												...
Cebada																	...
Frijol Total							1										...
Sorgo PV																	...
Sorgo SC																	...
Sorgo Total											1						...
Trigo																	...

Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀	
Cultivo	...	...	Cebolla PV	Cilantro	Frijol PV	Garbanzo PV	Maíz PV	Sorgo PV	Tomate PV	Zanahoria PV	Alfalfa	Espárrago	Fresa	Nopal	Maíz SC	Sorgo SC	
Superficie	...	...	59.64	14.75	338.91	123.09	19,995.63	1,787.32	240.84	51.69	1,896.64	2,456.63	216.01	215.59	24,702.09	8,262.16	
Función Objetivo	...	...	75.40	24.66	16.17	15.44	19.15	11.48	106.22	17.03	13.36	33.01	91.46	70.56	15.11	7.98	1,225,262.49

Restricciones																	Recurso Usado	Signo	Recurso Disponible
Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀			
Primeros Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	49,733.64	<=	76,709.00
Segundos Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	60,790.89	<=	76,709.00
Volumen Total	...	...	7.349	6.162	9.783	3.839	5.828	5.524	6.754	5.752	7.956	3.820	31.697	3.459	3.645	3.163	478.556	<=	478.556
Vol. Octubre	...	...															0.00	<=	233,280.00
Vol. Noviembre	...	...															0.00	<=	233,280.00
Vol. Diciembre	...	...															38,328.92	<=	233,280.00
Vol. Enero	...	...															35,113.56	<=	233,280.00
Vol. Febrero	...	...															42,002.02	<=	233,280.00
Vol. Marzo	...	...	1.142		0.536	1.497	0.021		0.270	2.238	0.638	0.008	4.780	0.184			85,502.67	<=	233,280.00
Vol. Abril	...	...	2.791	0.634	1.254	0.855	0.547	0.137	1.717	1.293	0.806	0.048	3.523	0.069			71,900.55	<=	233,280.00
Vol. Mayo	...	...	1.757	1.290	4.625	1.044	1.744	1.958	4.349	1.724	0.837	0.150	4.914	0.095		0.015	113,602.70	<=	233,280.00
Vol. Junio	...	...	1.629	2.248	2.482	0.423	1.824	1.722	0.399	0.497	1.409	1.002	4.012	1.234	2.021	1.917	61,439.09	<=	233,280.00
Vol. Julio	...	...	0.031	1.990	0.886	0.020	1.080	0.962	0.019		0.676	1.458	1.834	0.169	0.979	0.956	25,105.75	<=	233,280.00
Vol. Agosto	...	...					0.481	0.541			0.008	0.164	1.925	0.006	0.470	0.251	5,561.04	<=	233,280.00
Vol. Septiembre	...	...					0.132	0.204			0.001	0.048	2.035		0.073	0.025	0.00	<=	233,280.00
Ajo	...	...															100.20	<=	100.20
Avena F.	...	...															205.94	<=	291.02
Brócoli OI	...	...															0.00	<=	62.10
Cacahuete OI	...	...															55.39	<=	55.39
Cebada	...	...															4,838.32	<=	23,661.17
Cebolla OI	...	...															16.37	<=	139.45
Frijol OI	...	...															123.32	<=	880.27
Garbanzo OI	...	...															423.16	<=	423.16
Lechuga	...	...															0.00	<=	24.87
Tomate OI	...	...															413.16	<=	437.83
Trigo	...	...															15,731.14	<=	29,959.82
Zanahoria OI	...	...															0.00	<=	172.44
Brócoli PV	...	...															23.31	<=	23.31
Cacahuete PV	...	...															343.99	<=	551.39
Calabacita	...	...															0.00	<=	26.52
Camote	...	...															62.60	<=	62.60
Cebolla PV	...	...	1														59.64	<=	59.64
Cilantro	...	...		1													14.75	<=	14.75
Frijol PV	...	...			1												338.91	<=	338.91
Garbanzo PV	...	...				1											123.09	<=	265.83
Maíz PV	...	...					1										19,995.63	<=	28,827.02
Sorgo PV	...	...						1									1,787.32	<=	3,219.70
Tomate PV	...	...							1								240.84	<=	240.84
Zanahoria PV	...	...								1							51.69	<=	51.69
Alfalfa	...	...									1						1,896.64	<=	2,146.55
Espárrago	...	...										1					2,456.63	<=	2,456.63
Fresa	...	...											1				216.01	<=	372.86
Nopal	...	...												1			215.59	<=	215.59
Maíz SC	...	...													1		24,702.09	<=	24,702.09
Sorgo SC	...	...														1	8,262.16	<=	18,245.04
Brócoli Total	...	...															23.31	<=	71.05
Cacahuete Total	...	...															399.38	<=	399.38
Cebolla Total	...	...	1														76.01	<=	76.01
Frijol Total	...	...			1												462.23	<=	1,186.47
Garbanzo Total	...	...				1											546.25	<=	546.25
Maíz Total	...	...					1										44,697.72	<=	44,697.72
Sorgo Total	...	...						1								1	10,049.48	<=	20,910.83
Tomate Total	...	...							1								654.00	<=	654.00
Zanahoria Total	...	...								1							51.69	<=	189.78
Alfalfa	...	...									1						1,896.64	>=	1,896.64
Avena F.	...	...															205.94	>=	205.94
Cebada	...	...															4,838.32	>=	4,838.32
Frijol Total	...	...			1												462.23	>=	462.23
Sorgo PV	...	...						1									1,787.32	>=	1,787.32
Sorgo SC	...	...														1	8,262.16	>=	6,828.78
Sorgo Total	...	...														1	10,049.48	>=	10,049.48
Trigo	...	...														1	15,731.14	>=	15,731.14

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

Cuadro A.5. Modelo de programación lineal a una probabilidad del 50% de ocurrencia (MPL02).

Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Cultivo	Ajo	Avena F.	Brócoli OI	Cacahuete OI	Cebada	Cebolla OI	Frijol OI	Garbanzo OI	Lechuga	Tomate OI	Trigo	Zanahoria OI	Brócoli PV	Cacahuete PV	Calabacita	Camote	...
Superficie	100.20	291.02	47.74	55.39	4,838.32	16.37	847.56	423.16	24.87	413.16	22,802.72	138.09	23.31	343.99	26.52	62.60	...
Función Objetivo	165.38	9.24	30.08	21.97	4.90	66.77	16.88	17.09	13.01	76.89	6.77	15.49	42.49	18.21	14.31	52.98	...
Restricciones																	
Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Primeros Cultivos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
Segundos Cultivos																	...
Volumen Total	10.821	5.831	12.988	4.612	7.720	7.749	14.354	3.181	4.677	12.299	9.360	12.515	7.187	5.009	6.969	5.369	...
Vol. Octubre																	...
Vol. Noviembre																	...
Vol. Diciembre																	...
Vol. Enero	2.893	1.122	3.179	2.961	1.740	0.850	0.683	0.917	2.010	1.403	1.654	2.831					...
Vol. Febrero	2.537	1.938	2.492	0.231	1.336	3.262	2.125	1.875	0.772	1.632	1.502	2.360					...
Vol. Marzo	3.141	1.787	2.518	0.231	1.929	1.129	0.260	0.041	1.349	0.983	1.731	3.190	2.152	0.429	0.277		...
Vol. Abril	2.249	0.862	2.836	0.148	2.587	1.597	3.091	0.212	0.546	4.905	3.369	3.048	2.324	1.054	0.163	0.351	...
Vol. Mayo		0.069	1.415	0.848	0.127	0.334	5.332	0.063		3.154	1.095	0.878	1.954	2.082	3.084	3.347	...
Vol. Junio		0.052	0.285	0.423		0.310	2.742	0.034		0.223	0.009	0.208	0.758	0.508	2.175	0.993	...
Vol. Julio			0.263			0.266	0.121	0.040						0.935	1.268	0.678	...
Vol. Agosto																	...
Vol. Septiembre																	...
Ajo	1																...
Avena F.		1															...
Brócoli OI			1														...
Cacahuete OI				1													...
Cebada					1												...
Cebolla OI						1											...
Frijol OI							1										...
Garbanzo OI								1									...
Lechuga									1								...
Tomate OI										1							...
Trigo											1						...
Zanahoria OI												1					...
Brócoli PV													1				...
Cacahuete PV														1			...
Calabacita															1		...
Camote																1	...
Cebolla PV																	...
Cilantro																	...
Frijol PV																	...
Garbanzo PV																	...
Maíz PV																	...
Sorgo PV																	...
Tomate PV																	...
Zanahoria PV																	...
Alfalfa																	...
Esparrago																	...
Fresa																	...
Nopal																	...
Maíz SC																	...
Sorgo SC																	...
Brócoli Total			1										1				...
Cacahuete Total				1										1			...
Cebolla Total						1											...
Frijol Total							1										...
Garbanzo Total								1									...
Maíz Total																	...
Sorgo Total																	...
Tomate Total										1							...
Zanahoria Total												1					...
Alfalfa																	...
Avena F.		1															...
Cebada					1												...
Frijol Total							1										...
Sorgo PV																	...
Sorgo SC																	...
Sorgo Total											1						...
Trigo																	...

Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀	
Cultivo	...	...	Cebolla PV	Cilantro	Frijol PV	Garbanzo PV	Maíz PV	Sorgo PV	Tomate PV	Zanahoria PV	Alfalfa	Espárrago	Fresa	Nopal	Maíz SC	Sorgo SC	
Superficie	...	...	59.64	14.75	338.91	123.09	28,827.02	3,219.70	240.84	51.69	2,146.55	2,456.63	372.86	215.59	15,870.70	17,691.13	
Función Objetivo	...	...	75.40	24.66	16.17	15.44	19.15	11.48	106.22	17.03	13.36	33.01	91.46	70.56	15.11	7.98	1,435,440.79

Restricciones																	Recurso Usado	Signo	Recurso Disponible
Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀			
Primeros Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	68,522.29	<=	76,709.00
Segundos Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	72,085.52	<=	76,709.00
Volumen Total	...	...	7.349	6.162	9.783	3.839	5.828	5.524	6.754	5.752	7.956	3.820	31.697	3.459	3.645	3.163	622.265	<=	622.265
Vol. Octubre	...	...															0.00	<=	233,280.00
Vol. Noviembre	...	...															0.00	<=	233,280.00
Vol. Diciembre	...	...															52,117.46	<=	233,280.00
Vol. Enero	...	...															48,655.63	<=	233,280.00
Vol. Febrero	...	...															56,350.11	<=	233,280.00
Vol. Marzo	...	...	1.142		0.536	1.497	0.021		0.270	2.238	0.638	0.008	4.780	0.184			118,421.29	<=	233,280.00
Vol. Abril	...	...	2.791	0.634	1.254	0.855	0.547	0.137	1.717	1.293	0.806	0.048	3.523	0.069			102,303.32	<=	233,280.00
Vol. Mayo	...	...	1.757	1.290	4.625	1.044	1.744	1.958	4.349	1.724	0.837	0.150	4.914	0.095			135,532.36	<=	233,280.00
Vol. Junio	...	...	1.629	2.248	2.482	0.423	1.824	1.722	0.399	0.497	1.409	1.002	4.012	1.234	0.005	0.015	73,312.33	<=	233,280.00
Vol. Julio	...	...	0.031	1.990	0.886	0.020	1.080	0.962	0.019		0.676	1.458	1.834	0.169	0.979	0.956	28,647.40	<=	233,280.00
Vol. Agosto	...	...					0.481	0.541			0.008	0.164	1.925	0.006	0.470	0.251	6,925.18	<=	233,280.00
Vol. Septiembre	...	...					0.132	0.204			0.001	0.048	2.035		0.073	0.025	0.00	<=	233,280.00
Ajo	...	...															100.20	<=	100.20
Avena F.	...	...															291.02	<=	291.02
Brócoli OI	...	...															47.74	<=	62.10
Cacahuete OI	...	...															55.39	<=	55.39
Cebada	...	...															4,838.32	<=	23,661.17
Cebolla OI	...	...															16.37	<=	139.45
Frijol OI	...	...															847.56	<=	880.27
Garbanzo OI	...	...															423.16	<=	423.16
Lechuga	...	...															24.87	<=	24.87
Tomate OI	...	...															413.16	<=	437.83
Trigo	...	...															22,802.72	<=	29,959.82
Zanahoria OI	...	...															138.09	<=	172.44
Brócoli PV	...	...															23.31	<=	23.31
Cacahuete PV	...	...															343.99	<=	551.39
Calabacita	...	...															26.52	<=	26.52
Camote	...	...															62.60	<=	62.60
Cebolla PV	...	...	1														59.64	<=	59.64
Cilantro	...	...		1													14.75	<=	14.75
Frijol PV	...	...			1												338.91	<=	338.91
Garbanzo PV	...	...				1											123.09	<=	265.83
Maíz PV	...	...					1										28,827.02	<=	28,827.02
Sorgo PV	...	...						1									3,219.70	<=	3,219.70
Tomate PV	...	...							1								240.84	<=	240.84
Zanahoria PV	...	...								1							51.69	<=	51.69
Alfalfa	...	...									1						2,146.55	<=	2,146.55
Espárrago	...	...										1					2,456.63	<=	2,456.63
Fresa	...	...											1				372.86	<=	372.86
Nopal	...	...												1			215.59	<=	215.59
Maíz SC	...	...													1		15,870.70	<=	24,702.09
Sorgo SC	...	...														1	17,691.13	<=	18,245.04
Brócoli Total	...	...															71.05	<=	71.05
Cacahuete Total	...	...															399.38	<=	399.38
Cebolla Total	...	...	1														76.01	<=	76.01
Frijol Total	...	...			1												1,186.47	<=	1,186.47
Garbanzo Total	...	...				1											546.25	<=	546.25
Maíz Total	...	...					1										44,697.72	<=	44,697.72
Sorgo Total	...	...						1							1		20,910.83	<=	20,910.83
Tomate Total	...	...							1								654.00	<=	654.00
Zanahoria Total	...	...								1							189.78	<=	189.78
Alfalfa	...	...									1						2,146.55	>=	1,896.64
Avena F.	...	...															291.02	>=	205.94
Cebada	...	...															4,838.32	>=	4,838.32
Frijol Total	...	...			1												1,186.47	>=	462.23
Sorgo PV	...	...						1									3,219.70	>=	1,787.32
Sorgo SC	...	...														1	17,691.13	>=	6,828.78
Sorgo Total	...	...														1	20,910.83	>=	10,048.48
Trigo	...	...															22,802.72	>=	15,731.14

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

Cuadro A.6. Modelo de programación lineal a una probabilidad del 75% de ocurrencia (MPL03).

Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Cultivo	Ajo	Avena F.	Brócoli OI	Cacahuete OI	Cebada	Cebolla OI	Frijol OI	Garbanzo OI	Lechuga	Tomate OI	Trigo	Zanahoria OI	Brócoli PV	Cacahuete PV	Calabacita	Camote	...
Superficie	100.20	291.02	47.74	55.39	15,253.23	16.37	880.27	423.16	24.87	413.16	29,959.82	138.09	23.31	343.99	26.52	62.60	...
Función Objetivo	165.38	9.24	30.08	21.97	4.90	66.77	16.88	17.09	13.01	76.89	6.77	15.49	42.49	18.21	14.31	52.98	...
Restricciones																	
Variable	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	...
Primeros Cultivos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
Segundos Cultivos																	...
Volumen Total	10.821	5.831	12.988	4.612	7.720	7.749	14.354	3.181	4.677	12.299	9.360	12.515	7.187	5.009	6.969	5.369	...
Vol. Octubre																	...
Vol. Noviembre																	...
Vol. Diciembre																	...
Vol. Enero	2.893	1.122	3.179	2.961	1.740	0.850	0.683	0.917	2.010	1.403	1.654	2.831					...
Vol. Febrero	2.537	1.938	2.492	0.231	1.336	3.262	2.125	1.875	0.772	1.632	1.502	2.360					...
Vol. Marzo	3.141	1.787	2.518	0.231	1.929	1.129	0.260	0.041	1.349	0.983	1.731	3.190	2.152	0.429	0.277		...
Vol. Abril	2.249	0.862	2.836	0.148	2.587	1.597	3.091	0.212	0.546	4.905	3.369	3.048	2.324	1.054	0.163	0.351	...
Vol. Mayo		0.069	1.415	0.848	0.127	0.334	5.332	0.063		3.154	1.095	0.878	1.954	2.082	3.084	3.347	...
Vol. Junio		0.052	0.285	0.423		0.310	2.742	0.034		0.223	0.009	0.208	0.758	0.508	2.175	0.993	...
Vol. Julio						0.266	0.121	0.040						0.935	1.268	0.678	...
Vol. Agosto																	...
Vol. Septiembre																	...
Ajo	1																...
Avena F.		1															...
Brócoli OI			1														...
Cacahuete OI				1													...
Cebada					1												...
Cebolla OI						1											...
Frijol OI							1										...
Garbanzo OI								1									...
Lechuga									1								...
Tomate OI										1							...
Trigo											1						...
Zanahoria OI												1					...
Brócoli PV													1				...
Cacahuete PV														1			...
Calabacita															1		...
Camote																1	...
Cebolla PV																	...
Cilantro																	...
Frijol PV																	...
Garbanzo PV																	...
Maíz PV																	...
Sorgo PV																	...
Tomate PV																	...
Zanahoria PV																	...
Alfalfa																	...
Esparrago																	...
Fresa																	...
Nopal																	...
Maíz SC																	...
Sorgo SC																	...
Brócoli Total			1										1				...
Cacahuete Total				1										1			...
Cebolla Total						1											...
Frijol Total							1										...
Garbanzo Total								1									...
Maíz Total																	...
Sorgo Total																	...
Tomate Total										1							...
Zanahoria Total												1					...
Alfalfa		1															...
Avena F.					1												...
Cebada																	...
Frijol Total							1										...
Sorgo PV																	...
Sorgo SC											1						...
Sorgo Total																	...
Trigo																	...

Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀	
Cultivo	...	...	Cebolla PV	Cilantro	Frijol PV	Garbanzo PV	Maíz PV	Sorgo PV	Tomate PV	Zanahoria PV	Alfalfa	Espárrago	Fresa	Nopal	Maíz SC	Sorgo SC	
Superficie	...	...	59.64	14.75	306.20	123.09	19,995.63	2,665.79	240.84	51.69	2,146.55	2,456.63	372.86	215.59	24,702.09	18,245.04	
Función Objetivo	...	...	75.40	24.66	16.17	15.44	19.15	11.48	106.22	17.03	13.36	33.01	91.46	70.56	15.11	7.98	1,497,232.65

Restricciones																	Recurso Usado	Signo	Recurso Disponible
Variable	...	...	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀			
Primeros Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	76,709.00	<=	76,709.00
Segundos Cultivos	...	...	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	72,052.81	<=	76,709.00
Volumen Total	...	...	7.349	6.162	9.783	3.839	5.828	5.524	6.754	5.752	7.956	3.820	31.697	3.459	3.645	3.163	749,218.32	<=	809,129.11
Vol. Octubre	...	...															0.00	<=	233,280.00
Vol. Noviembre	...	...															0.00	<=	233,280.00
Vol. Diciembre	...	...															82,104.96	<=	233,280.00
Vol. Enero	...	...															73,389.75	<=	233,280.00
Vol. Febrero	...	...															88,639.46	<=	233,280.00
Vol. Marzo	...	...	1.142		0.536	1.497	0.021		0.270	2.238	0.638	0.008	4.780	0.184			164,675.07	<=	233,280.00
Vol. Abril	...	...	2.791	0.634	1.254	0.855	0.547	0.137	1.717	1.293	0.806	0.048	3.523	0.069			95,863.97	<=	233,280.00
Vol. Mayo	...	...	1.757	1.290	4.625	1.044	1.744	1.958	4.349	1.724	0.837	0.150	4.914	0.095		0.015	137,456.27	<=	233,280.00
Vol. Junio	...	...	1.629	2.248	2.482	0.423	1.824	1.722	0.399	0.497	1.409	1.002	4.012	1.234	2.021	1.917	72,396.00	<=	233,280.00
Vol. Julio	...	...	0.031	1.990	0.886	0.020	1.080	0.962	0.019		0.676	1.458	1.834	0.169	0.979	0.956	28,388.41	<=	233,280.00
Vol. Agosto	...	...					0.481	0.541			0.008	0.164	1.925	0.006	0.470	0.251	6,304.43	<=	233,280.00
Vol. Septiembre	...	...					0.132	0.204			0.001	0.048	2.035		0.073	0.025	0.00	<=	233,280.00
Ajo	...	...															100.20	<=	100.20
Avena F.	...	...															291.02	<=	291.02
Brócoli OI	...	...															47.74	<=	62.10
Cacahuete OI	...	...															55.39	<=	55.39
Cebada	...	...															15,253.23	<=	23,661.17
Cebolla OI	...	...															16.37	<=	139.45
Frijol OI	...	...															880.27	<=	880.27
Garbanzo OI	...	...															423.16	<=	423.16
Lechuga	...	...															24.87	<=	24.87
Tomate OI	...	...															413.16	<=	437.83
Trigo	...	...															29,959.82	<=	29,959.82
Zanahoria OI	...	...															138.09	<=	172.44
Brócoli PV	...	...															23.31	<=	23.31
Cacahuete PV	...	...															343.99	<=	551.39
Calabacita	...	...															26.52	<=	26.52
Camote	...	...															62.60	<=	62.60
Cebolla PV	...	...	1														59.64	<=	59.64
Cilantro	...	...		1													14.75	<=	14.75
Frijol PV	...	...			1												306.20	<=	338.91
Garbanzo PV	...	...				1											123.09	<=	265.83
Maíz PV	...	...					1										19,995.63	<=	28,827.02
Sorgo PV	...	...						1									2,665.79	<=	3,219.70
Tomate PV	...	...							1								240.84	<=	240.84
Zanahoria PV	...	...								1							51.69	<=	51.69
Alfalfa	...	...									1						2,146.55	<=	2,146.55
Espárrago	...	...										1					2,456.63	<=	2,456.63
Fresa	...	...											1				372.86	<=	372.86
Nopal	...	...												1			215.59	<=	215.59
Maíz SC	...	...													1		24,702.09	<=	24,702.09
Sorgo SC	...	...														1	18,245.04	<=	18,245.04
Brócoli Total	...	...															71.05	<=	71.05
Cacahuete Total	...	...															399.38	<=	399.38
Cebolla Total	...	...	1														76.01	<=	76.01
Frijol Total	...	...			1												1,186.47	<=	1,186.47
Garbanzo Total	...	...				1											546.25	<=	546.25
Maíz Total	...	...					1										44,697.72	<=	44,697.72
Sorgo Total	...	...						1								1	20,910.83	<=	20,910.83
Tomate Total	...	...							1								654.00	<=	654.00
Zanahoria Total	...	...								1							189.78	<=	189.78
Alfalfa	...	...									1						2,146.55	>=	1,896.64
Avena F.	...	...															291.02	>=	205.94
Cebada	...	...															15,253.23	>=	4,838.32
Frijol Total	...	...			1												1,186.47	>=	462.23
Sorgo PV	...	...						1									2,665.79	>=	1,787.32
Sorgo SC	...	...							1								18,245.04	>=	6,828.78
Sorgo Total	...	...														1	20,910.83	>=	10,048.48
Trigo	...	...														1	29,959.82	>=	15,731.14

Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma.

Anexo B

Cuadro A.7. Serie histórica de aportaciones mensuales del Río Lerma (hm³).

Núm.	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³
1	71.60	45.80	24.70	17.40	9.10	7.30	7.20	17.10	69.30	162.50	302.40	202.60	937.00
2	97.80	51.60	27.30	18.00	8.60	8.70	7.90	11.20	13.40	50.80	74.90	119.20	489.40
3	59.70	36.30	17.30	13.80	7.70	8.30	6.10	7.60	14.50	32.90	92.00	152.30	448.50
4	65.60	32.30	18.60	15.40	10.80	7.10	7.40	11.10	23.20	47.50	101.60	226.30	566.90
5	125.90	38.20	20.20	13.30	13.00	9.70	8.60	15.30	155.40	326.10	478.80	366.70	1571.20
6	151.40	55.90	31.10	22.90	16.80	16.90	7.40	20.00	25.10	153.30	137.90	138.60	777.30
7	202.60	72.90	33.70	26.80	5.50	21.80	18.20	1.10	44.80	352.20	107.60	230.60	1117.80
8	79.40	38.80	19.20	18.30	13.20	13.00	6.30	14.30	47.30	204.20	107.70	65.80	627.50
9	33.80	20.80	12.00	11.10	4.90	8.00	4.30	10.40	41.20	49.80	46.80	48.40	291.50
10	37.80	19.80	11.90	9.80	9.70	11.80	8.90	20.30	49.70	159.60	200.60	178.40	718.30
11	36.20	20.50	10.00	8.50	8.50	8.80	12.60	16.30	133.60	220.70	95.50	307.80	879.00
12	285.30	106.00	42.60	21.30	13.50	9.90	9.50	20.10	50.10	106.70	94.90	123.40	883.30
13	101.90	49.00	29.70	16.50	9.40	9.10	9.80	18.10	103.30	90.60	97.00	182.40	716.80
14	113.40	50.80	31.80	19.30	13.30	10.70	7.40	19.20	35.80	71.60	106.60	269.70	749.60
15	116.30	40.40	22.60	18.30	12.10	9.00	8.10	20.70	31.80	101.10	147.90	81.00	609.30
16	56.60	27.10	19.40	15.60	9.10	8.40	12.50	19.70	58.70	68.90	86.00	64.40	446.40
17	51.70	31.30	16.40	18.50	8.00	6.70	13.10	35.40	48.30	33.60	86.90	197.10	547.00
18	54.40	30.40	24.60	26.00	17.20	8.60	10.30	24.30	51.80	175.10	136.20	106.30	665.20
19	55.70	40.90	21.40	13.30	8.10	10.60	7.30	14.30	40.00	93.80	106.40	60.20	472.00
20	30.10	16.80	15.40	12.40	9.10	7.80	4.70	14.50	44.90	91.80	52.60	42.40	342.50
21	21.70	11.30	7.80	10.20	5.30	7.50	5.20	14.90	42.50	105.20	107.60	102.90	442.10
22	42.30	23.50	10.90	7.60	11.30	6.10	9.40	21.40	117.40	149.30	139.40	122.20	660.80
23	90.80	36.00	15.30	10.00	6.30	8.10	8.70	11.50	34.20	83.50	97.70	93.20	495.30
24	36.20	27.70	12.90	8.10	7.00	7.40	11.40	26.30	44.70	86.00	63.60	70.30	401.60
25	124.30	35.40	19.30	13.10	9.50	13.40	18.50	11.90	27.10	89.60	195.60	227.00	784.70
26	177.60	49.30	28.90	18.10	15.20	11.80	11.90	33.30	71.00	229.50	158.90	126.10	931.60
27	41.90	19.30	19.70	12.00	6.70	8.40	9.00	20.50	27.50	38.70	39.90	40.50	284.10
28	19.80	15.20	9.10	35.40	17.00	7.80	11.20	23.90	69.20	252.40	185.50	623.50	1270.00
29	274.20	135.40	82.20	72.60	42.70	26.90	47.70	48.50	99.70	190.10	288.90	151.00	1459.90
30	240.10	100.30	32.80	22.60	16.60	24.30	18.70	31.10	16.10	72.90	70.10	122.20	767.80
31	48.10	31.10	18.80	18.00	10.60	9.90	15.40	24.00	92.50	190.40	123.60	66.80	649.20
32	33.80	18.40	12.10	6.90	7.40	7.80	22.20	26.80	31.40	51.80	38.30	147.60	404.50
33	83.40	27.30	20.60	11.20	9.30	14.00	23.60	33.00	77.30	205.80	303.80	140.10	949.40
34	146.90	54.00	21.50	22.40	15.90	14.60	17.00	38.40	96.60	103.30	75.30	90.10	696.00

Núm.	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³
35	50.10	22.80	22.10	21.10	18.30	19.30	30.40	48.00	42.70	58.50	254.70	230.30	818.30
36	125.70	27.00	16.50	11.30	11.60	28.10	41.00	36.70	92.20	130.80	273.70	122.20	916.80
37	61.00	65.30	24.40	39.00	31.60	22.90	42.50	37.40	79.80	136.70	158.70	285.90	985.20
38	211.30	75.30	71.30	59.00	17.80	13.00	16.50	35.40	70.40	216.10	148.00	122.50	1056.60
39	64.00	52.30	23.80	22.90	10.10	10.10	6.70	8.60	29.50	101.10	242.10	271.00	842.20
40	51.70	27.30	20.60	17.00	12.00	11.30	12.10	20.30	114.00	138.20	195.50	159.40	779.40
41	96.70	28.10	16.70	6.60	7.60	10.60	17.30	23.20	115.30	128.90	244.10	243.10	938.20
42	220.20	32.10	19.80	11.60	9.40	22.20	33.20	33.30	64.10	66.40	49.80	27.70	589.80
43	23.90	10.30	3.50	1.20	5.50	10.50	17.10	27.70	32.60	199.50	269.50	201.20	802.50
44	71.60	47.00	8.60	5.70	0.50	14.00	25.60	27.90	50.60	158.60	68.10	68.30	546.50
45	49.70	15.30	10.80	13.40	14.80	17.80	22.20	29.80	97.90	177.80	130.70	103.20	683.40
46	31.60	12.90	10.10	5.70	12.20	15.60	18.10	19.30	25.80	144.20	205.20	134.20	634.90
47	357.80	51.60	26.00	11.80	7.90	15.00	34.00	40.50	76.90	86.30	75.10	68.40	851.30
48	11.10	13.90	8.80	7.40	10.50	17.30	20.80	21.70	63.30	73.60	111.10	27.90	387.40
49	147.70	34.10	18.00	11.60	23.90	38.00	24.10	19.30	46.50	39.10	64.80	77.10	544.20
50	6.90	1.50	2.80	16.40	14.80	18.20	11.70	13.40	27.10	31.20	82.90	78.60	305.50
51	23.90	23.90	15.50	11.60	8.50	19.60	18.60	11.00	49.50	139.50	87.90	61.40	470.90
52	35.90	27.70	10.70	10.20	11.20	15.40	23.30	30.60	37.00	54.60	31.20	2.30	290.10
53	3.80	0.00	4.90	1.20	4.10	6.20	5.50	12.70	10.40	137.20	125.60	148.10	459.70
54	13.90	9.60	7.40	3.70	16.90	16.80	20.10	10.10	28.80	84.90	95.10	139.50	446.80
55	48.40	18.90	11.90	12.80	12.30	19.10	24.40	12.70	45.70	102.60	111.90	90.40	511.10
56	7.30	4.40	11.90	6.90	12.10	14.80	21.00	36.00	141.80	169.10	69.90	35.50	530.70
57	64.30	10.90	12.60	15.70	18.30	19.60	19.80	30.50	57.30	98.40	94.10	36.50	478.00
58	14.90	12.60	12.00	14.00	14.50	20.20	36.20	33.00	18.60	122.10	150.40	96.90	545.40
59	10.60	8.50	8.40	10.90	11.30	21.60	8.00	13.80	19.00	41.80	66.10	41.20	261.20
60	23.90	5.10	8.90	5.60	6.90	12.10	14.30	37.70	30.20	117.90	190.70	92.10	545.40
61	74.20	26.60	15.90	8.60	12.30	13.90	17.10	19.70	44.30	255.90	108.30	86.70	683.50
62	68.10	37.20	16.50	29.60	76.10	39.00	45.70	47.00	51.90	56.60	127.40	79.10	674.20
63	167.00	77.30	34.00	14.10	17.30	19.60	16.50	20.70	28.30	208.50	117.60	165.30	886.20
64	58.30	30.80	17.70	17.10	11.50	18.60	32.80	32.50	85.00	81.30	67.20	77.80	530.60
65	59.80	19.30	23.40	14.40	14.90	21.60	23.10	29.20	56.00	123.90	137.50	118.50	641.60
66	35.40	42.40	15.30	13.80	16.10	26.20	21.80	33.30	35.60	76.00	53.90	152.10	521.90

Fuente: Jefatura del Distrito de Riego 011