Universidad Autónoma Metropolitana
Casa abierta al tiempo Azcapotzalco

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

UNIDAD AZCAPOTZALCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS SOCIALES Y HUMANIDADES

ESPECIALIZACIÓN EN ECONOMÍA Y GESTIÓN DEL AGUA

“Valor económico del agua en la producción agrícola en el Distrito de Riego (DR) 017: Región Lagunera”

IDÓNEA COMUNICACIÓN DE RESULTADOS

para obtener el grado de

Especialización en Economía y Gestión del Agua

Brenda Aracely Ramírez Barraza

Matricula: 2242800487

Dr. Daniel Alfredo Revollo Fernández
Asesor

Dra. Lilia Rodríguez Tapia
Co-asesora

CDMX

Mayo de 2025

DOI: 10.24275/uama.5809.11701

INDICE

INTRODUCCIÓN 1
1. SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO 4
1.1. Usos del agua en México 4
1.2. Usos del agua subterránea y superficial 5
2. SITUACIÓN DEL AGUA DEL DISTRITO DE RIEGO 017 8
2.1. Características geográficas y climáticas de la Región Lagunera 8
2.2. Usos y disponibilidad del agua en el DR 017 9
2.2.1. Usos del agua subterránea 9
2.2.2. Usos del agua superficial 10
2.3 Principales cultivos del DR 017 12
2.4 Problemática del recurso hídrico en la región 13
2.4.1 La importancia del agua en la producción agrícola 14
3. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL VALOR ECONÓMICO DEL AGUA 16
3.1. Modelos económicos aplicados en la valoración económica del agua para la agricultura 17
3.1.1. Estudios sobre la estimación del valor económico del agua en la agricultura 21
4 METODOLOGÍA DE VALORACIÓN ECONOMICA DEL AGUA 26
4.1. Modelo de Regresión lineal 26
4.2. Modelo de Regresión cuadrático 26
4.3. Modelo de regresión exponencial 28
5. ESTIMACIÓN Y RESULTADOS DE LOS MODELOS 30
5.1. Estimación del modelo lineal 30
5.1.1. Resultados del modelo de regresión lineal 30
5.2 Estimación del modelo cuadrático 32
5.2.1 Resultados del modelo cuadrático 33
5.3. Estimación del modelo exponencial 36
5.3.1 Resultados del modelo exponencial 38
5.4. Discusión 41
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 45
BIBLIOGRAFÍA 48
ANEXOS 51

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Volumen Concesionado de Agua por Rubro y Uso 5
Cuadro 2 Usos agrupados consuntivos por tipo de fuente, 2021 y 2022 6
Cuadro 3 Distribución de los volúmenes de agua por usos en el DR 17 12
Cuadro 4 Descripción de las variables del modelo lineal 26
Cuadro 5 Descripción de las variables del modelo no lineal 27
Cuadro 6 Descripción de las variables del modelo exponencial 28
Cuadro 7 Descripción de las variables del modelo lineal estimado 30
Cuadro 8 Coeficientes del modelo de Regresión Lineal 31
Cuadro 9 Descripción de las variables del modelo no lineal estimado 32
Cuadro 10 Datos empleados en el modelo no lineal, ciclo agrícola 2021-2022 33
Cuadro 11 Coeficientes del Modelo de Regresión cuadrática 34
Cuadro 12 Descripción de las variables del modelo exponencial estimado 37
Cuadro 13 Coeficientes del Modelo 38
Cuadro 14 Elasticidades del agua suministrada-valor de la producción agrícola bajo riego del DDR017, 1998,-2023 40
Cuadro 15 Comparación de los resultados de los modelos 41
Cuadro 16 Comparación de Estimaciones del Producto Marginal del Agua en Diferentes Estudios 42
Cuadro 17 Datos de producción agrícola y agua del DR 017 1998-2023 51
Cuadro 18 Datos de producción agrícola y agua del DR 017 2021-2022 52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación Geográfica de la Región Lagunera 9
Figura 2 Usos del agua subterránea del acuífero principal 10
Figura 3 Usos del agua superficial 11
Figura 4 Superficie Sembrada en el DR 017, 2022-2023 13
Figura 5 Función de producción en el Óptimo de X1 35

INTRODUCCIÓN

El uso eficiente del agua en la agricultura representa uno de los principales desafíos en contextos de creciente escasez hídrica, especialmente en regiones con alta dependencia del riego para la producción agrícola. En México, el sector agrícola consume aproximadamente el 76% del total del agua disponible, siendo a menudo señalado por sus altos niveles de ineficiencia debido a prácticas de riego obsoletas y a la limitada inversión en infraestructura hídrica (CONAGUA, 2023; BBVA Research, 2024). Esta situación ha generado una urgente necesidad de evaluar la relación entre el uso del recurso hídrico y la rentabilidad de la actividad agrícola, con el fin de identificar oportunidades de mejora en la asignación y el aprovechamiento del agua.

Una de las zonas del país donde el uso agrícola del agua tiene un peso económico, social y ambiental significativo es la Región Lagunera, donde se ubica el Distrito de Riego 017. Esta región se caracteriza por una alta demanda hídrica y una fuerte presión sobre los acuíferos, que ha derivado en fenómenos de sobreexplotación y deterioro en la calidad del agua. Particularmente, el sector agrícola consume alrededor del 90% del recurso disponible, siendo responsable de su uso. Esta situación no solo compromete la sostenibilidad ambiental, sino también la viabilidad económica de los productores que dependen del riego para sostener sus cultivos.

Ante este escenario, resulta necesario analizar cómo varía el rendimiento económico de la actividad agrícola ante cambios en el volumen de agua utilizada. Por ello, en esta investigación se adopta el enfoque de productividad marginal del agua, el cual permite estimar el efecto económico de una unidad adicional del recurso (m^3) sobre el valor de la producción y del beneficio neto. Este estudio cobra relevancia porque aporta evidencia empírica sobre la productividad marginal del agua en la agricultura, facilitando la evaluación de su impacto en los ingresos de los productores y contribuyendo a la formulación de políticas públicas orientadas a su uso eficiente.

Justificación

La creciente presión sobre los recursos hídricos debido al cambio climático, el crecimiento poblacional y la intensificación de la actividad agrícola hacen imprescindible el desarrollo de estrategias para un uso más eficiente del agua. En el Distrito de Riego 017: Región Lagunera, donde la agricultura depende en gran medida del riego, comprender la productividad marginal del agua es fundamental para mejorar la rentabilidad de los productores sin comprometer la sostenibilidad del recurso.

Este estudio no solo permite evaluar el impacto del uso del agua en la producción agrícola, sino que también contribuye al diseño de políticas que fomenten una asignación más eficiente del recurso. Asimismo, los hallazgos pueden servir como referencia para otras regiones con condiciones similares, proporcionando herramientas para la toma de decisiones en el sector agrícola y en la gestión de los recursos hídricos.

Objetivos

El objetivo general de esta investigación es estimar el valor economico del agua de riego en la producción agrícola en el Distrito de Riego 017: Región Lagunera a través de la productividad marginal del agua

Objetivos específicos:

1. Determinar el impacto del uso del agua en el beneficio neto de los productores durante el ciclo 2021-2022
2. Evaluar la relación entre el uso del agua y el incremento en el valor de la producción agrícola (1998 a 2023).
3. Estimar el valor económico del agua de la producción agrícola entre 1998 y 2023.
4. Comparar los resultados obtenidos con estudios previos para identificar patrones y tendencias.

Hipótesis:

En una región con escasez de agua y alta productividad agrícola (como es el caso del DR 017:Region Lagunera), se asume que incrementos en el volumen de agua suministrada se traduce en un aumento en el volumen de producción (toneladas), incrementando el valor económico(pesos) de dicha producción. Esta aseveración se prueba estimando el aporte de $1m^3$ de agua adicional al valor de la producción agrícola (producto marginal del agua), que en caso de ser mayor a 0 confirma dicha afirmación.

Metodología

Para abordar los objetivos, la metodología empleada se basa en un análisis econométrico mediante la estimación de modelos que permitan calcular el valor económico del agua a partir de su productividad marginal. Se aplican modelos lineales, cuadráticos y exponenciales de productividad marginal, con base en datos secundarios provenientes de fuentes oficiales como CONAGUA, SIAP. Asimismo, los resultados obtenidos se contrastarán con investigaciones previas para validar su solidez y aportar elementos de comparación.

1. CONTEXTO DEL AGUA EN MÉXICO

El agua es un recurso esencial para el desarrollo económico, social y ambiental de México. Sin embargo, su gestión enfrenta múltiples desafíos debido a factores como la variabilidad climática, la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación y una distribución geográfica desigual. México es un país con contrastes hídricos, ya que mientras en el sureste llueve en abundancia, el norte y centro del país padecen escasez de agua, lo que dificulta su acceso equitativo para diferentes sectores productivos y la población en general (CONAGUA, 2020).

1.1.Disponibilidad y distribución del agua

México recibe anualmente aproximadamente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua por precipitación. De esta cantidad, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.2% escurre por ríos y arroyos, y solo el 6.3% se infiltra al subsuelo para la recarga de acuíferos. Esto se traduce en una disponibilidad de agua renovable per cápita de 3,692 m^3, cifra que se prevé disminuirá a 3,250 m^3 para 2030 debido al crecimiento poblacional y al impacto del cambio climático (Agua.org, 2024).

Un problema estructural en la gestión del agua en México es su distribución geográfica desigual. Mientras que el sureste del país concentra el 69% del agua disponible, en el norte y centro del país se encuentra el 77% de la población, generando un desbalance en la oferta y demanda del recurso. El 60% del agua potable que se utiliza en el país proviene de cuerpos de agua superficiales, concentrados en su mayoría en las regiones centro y sur, mientras que el norte depende en gran medida de la extracción de agua subterránea (IMCO, 2023).

1.2. Usos del agua en México

El agua se usa de diversas formas en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios. En el Registro Público de Derechos de Agua (Repda), de la Comisión Nacional del Agua, se registran los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de aguas nacionales. El Repda tiene clasificados los usos del agua

en diversos rubros. En el cuadro 1 se presenta la distribución del volumen concesionado de agua en México, distinguiendo entre usos consuntivos y no consuntivos.

Cuadro 1 Volumen Concesionado de Agua por Rubro y Uso

Clave	Rubro de clasificación del Repda	Volumen concesionado (hm³)	Usos agrupados consuntivos	Definición	Volumen concesionado (hm³)	%
A	Agrícola (inscrito+pendiente)	61,002	Agrícola	A+D+G+H+L	68,521	76.3
B	Agroindustrial	3.25	Abastecimiento público	C+H	13,330	14.8
C	Doméstico	37	Industrial integrado	B+E+F1+K	4,273	4.8
D	Acuacultura	1,167	Electricidad excluyendo hidroeléctricas	F2	3,680	4.1
E	Servicios	1,249	Subtotal Consuntivo		89,804	100.0
F1	Industrial	2,841				
F2	Termoeléctricas	3,680				
G	Pecuario	241				
H	Público Urbano	13,293				
I	Múltiples	6,110	Uso agrupado no consuntivo			
K	Comercio	0.08				
L	Otros	0.60				
Subtotal consuntivo		89,804				
J	Hidroeléctricas	177,339	Hidroeléctricas	J	177,339	
N	Conservación Ecológica	9.46	Conservación Ecológica	N	9.46	
Subtotal no consuntivo		177,349	Subtotal no consuntivo		177,349	
Total		267,152	Total		267,152	

Fuente: CONAGUA (2024 a)

Los usos consuntivos utilizan un volumen total de 89,804 hm³, siendo el sector agrícola el principal consumidor con 76.3% del volumen, seguido del abastecimiento público (14.8%) y el sector industrial (4.8%). En contraste, los usos no consuntivos representan 177,349 hm³, donde la mayor parte se destina a hidroeléctricas, reflejando su papel clave en la generación de energía sin afectar la disponibilidad del recurso. La información destaca la alta demanda de agua en la agricultura y la generación eléctrica, subrayando la importancia de una gestión eficiente y sostenible del recurso hídrico.

1.2.1. Usos del agua subterránea y superficial

En el cuadro 2 se muestra la distribución del volumen de agua extraído en México, en miles de hectómetros cúbicos (hm³), según su origen (superficial o subterráneo) y destino en

diferentes sectores. El uso agrícola es el mayor consumidor de agua, con una participación del 75.7% en 2021 y 76.3% en 2022, mientras que el abastecimiento público ocupa el segundo lugar con un 14.8% en ambos años. La industria autoabastecida y la energía eléctrica consumen menores cantidades, representando 5.1% y 4.4% en 2021, y 4.8% y 4.1% en 2022, respectivamente. El volumen total extraído en 2021 fue de 89.94 mil hm^3, ligeramente inferior a los 89.80 miles de hm^3 de 2022. La mayor parte del agua proviene de fuentes superficiales, con 54.34 miles de hm^3 en 2021 y 53.94 miles de hm^3 en 2022, mientras que el agua subterránea representa una menor proporción.

Cuadro 2 Usos agrupados consuntivos por tipo de fuente, 2021 y 2022

Año	Uso agrupado	Origen		Volumen total (miles de hm^3)	Porcentaje de extracción
		Superficial (miles de hm^3)	Subterráneo (miles de hm^3)		
2021	Agrícola	42.87	25.20	68.07	75.7
	Abastecimiento público	5.77	7.52	13.29	14.8
	Industria autoabastecida	2.09	2.53	4.62	5.1
	Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.62	0.35	3.97	4.4
	Total	54.34	35.60	89.94	100.0
2022	Agrícola	43.11	25.41	68.52	76.3
	Abastecimiento público	5.77	7.56	13.33	14.8
	Industria autoabastecida	1.81	2.46	4.27	4.8
	Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.25	0.43	3.68	4.1
	Total	53.94	35.86	89.80	100.

Fuente: CONAGUA (2024 a)

En México el riego agrícola es altamente ineficiente, con pérdidas significativas debido a métodos obsoletos y falta de inversión en infraestructura hídrica. La implementación de tecnologías como el riego por goteo o la modernización de los sistemas de distribución podría reducir el desperdicio y mejorar la productividad del agua (BBVA Research, 2024).

Una de las regiones del país donde el uso agrícola del agua adquiere particular relevancia es la Región Lagunera, localizada en el norte de México, entre los estados de Coahuila y Durango. En esta zona, la agricultura representa una actividad económica y social estratégica, al ser una fuente clave de empleo e ingreso para la población rural. Además, alberga al Distrito de Riego 017, uno de los más extensos e importantes del país, tanto por el volumen de agua concesionado como por la superficie bajo riego. Sin embargo, al igual que en otras regiones, enfrenta serios retos en cuanto a eficiencia en el uso del agua, modernización de la infraestructura y sostenibilidad del recurso hídrico, lo que la convierte en un caso emblemático para analizar la productividad del agua en el contexto agrícola.

2. SITUACIÓN DEL AGUA DEL DISTRITO DE RIEGO 017: REGION LAGUNERA

2.1. Características geográficas y climáticas de la Región Lagunera

El Distrito de Riego 017 fue creado el 12 de marzo de 1941 por decreto presidencial y abarca una superficie territorial de los municipios de Torreón, Matamoros, Francisco I. Madero, San Pedro y Viesca por la parte de Coahuila, así como Gómez Palacio, Lerdo, Rodeo, Nazas, Mapimí, Tlahualilo, Simón Bolívar y San Juan de Guadalupe en el Estado de Durango (Figura 1).

La finalidad del Distrito de Riego es garantizar la seguridad alimentaria de las personas que habitan en la República Mexicana, principalmente de la Comarca Lagunera a través de la administración y distribución adecuada de las aguas superficiales de dos principales sistemas; el primero es la Presa Lázaro Cárdenas "El Palmito" y la Francisco Zarco, "Las Tórtolas", cuyas aguas se destinan a 17 módulos, cada uno integrado por una cierta cantidad de ejidatarios y pequeños propietarios, así como el otro que es el Aguanaval que maneja tres módulos o también conocidas como asociaciones de usuarios del módulo de riego (Rábago, 2021)

La Región Lagunera está ubicada en los límites de Durango y Coahuila. Es una gran zona económica que se dedica principalmente a las actividades de agricultura y minería. Está conformada por diez municipios de Durango y cinco de Coahuila.

A Durango pertenecen Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo, Mapimí, Rodeo, Nazas, Simón Bolívar, San Juan de Guadalupe, San Luis del Cordero y San Pedro del Gallo. Mientras que en el caso de Coahuila pertenecen Torreón, San Pedro, Matamoros, Francisco I. Madero y Viesca (MILENIO, 2019).

Figura 1 Ubicación Geográfica de la Región Lagunera

Fuente: Ríos Flores et al. (2015)

La importancia económica de esta región radica en que ocupa el primer lugar en la producción de melón, sorgo forrajero, sorgo escobero, leche de bovino y carne de ave; el segundo lugar en producción de maíz forrajero; tercer lugar en producción de algodón y huevo, cuarto lugar en nogal y alfalfa y es el quinto lugar en producción de carne de caprino. De cada diez litros que se producen de leche en México, dos corresponden a La Laguna, por lo que se considera como la principal cuenca lechera. También destaca por su potencial de exportación de algodón, carne de ave, carne de bovino, tomate, melón, higo, sandía y nuez, productos agropecuarios que ya incursionan algunos de ellos en el mercado internacional.

La Región Lagunera, ubicada en el Norte de México, presenta problemas agudos de escasez de agua y sobre-explotación de los mantos acuíferos. El deficiente control de extracciones, la carencia de fuentes adicionales para abastecer a las ciudades, la presencia recurrente de sequías y la competencia entre los usos alternativos del agua, son problemas que se agudizan cada vez más (CONAGUA, 2012). La demanda anual de agua potable para los asentamientos humanos de los municipios de Coahuila y Durango que conforman la Región Lagunera es de 127 millones de m^3, los cuales se obtienen en su mayor parte del subsuelo.

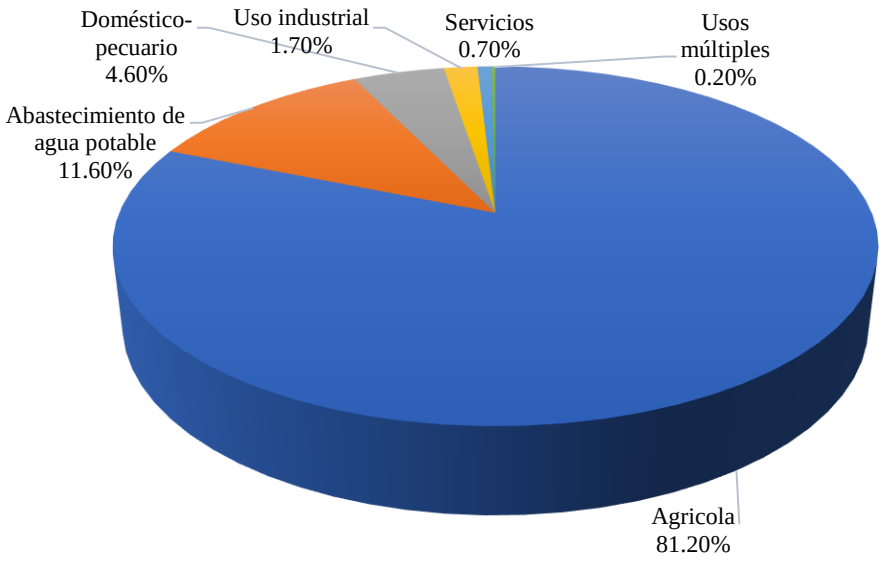
2.2. Usos y disponibilidad del agua en el DR 017

2.2.1. Usos del agua subterránea

Del total de pozos (2,350), 1,494 son para uso agrícola, 184 para uso doméstico, 64 más para uso industrial, 143 para uso pecuario, 136 para abastecimiento de agua potable, 39 para servicios y 290 para usos múltiples.

La distribución de los usos del agua proveniente del acuífero principal que se muestra en la Figura 2, donde se observa que 883.9 hm^3 (81.2 %) se destinan al uso agrícola, 126.4 hm^3 (11.6 %) para abastecimiento de agua potable, 49.8 hm^3 (4.6 %) para uso doméstico-pecuario, 18.7 hm^3 (1.7 %) para uso industrial, 7.3 hm^3 (0.7 %) para servicios y 2.4 hm^3 (0.2 %) para usos múltiples (CONAGUA, 2023). El volumen total de extracción asciende a 1,088.5 hm^3 anuales.

Figura 2 Usos del agua subterránea del acuífero principal

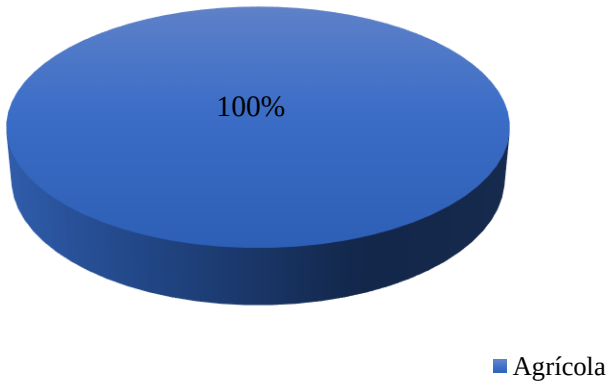


Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (2023)

2.2.2. Usos del agua superficial

Como se muestra en la Figura 3, el agua proveniente de las presas se destina en su totalidad para uso agrícola, siendo 958.829hm^3 el volumen de agua que se utilizó en el año 2023 (CONAGUA, 2023).

Figura 3 Usos del agua superficial



Fuente: Elaboración con datos de CONAGUA (2023)

El cuadro 3 muestra la distribución del volumen de agua subterránea y superficial en distintos usos dentro de la región analizada. Se observa que el sector agrícola es el principal consumidor de agua, con 883.9 hm^3 provenientes de fuentes subterráneas y 958.829 hm^3 de fuentes superficiales, lo que confirma la alta dependencia de este sector del recurso hídrico.

El abastecimiento de agua potable es el segundo mayor uso, con 126.4 hm^3 de agua subterránea, sin consumo de agua superficial registrado. Los usos doméstico-pecuario (49.8 hm^3), industrial (18.7 hm^3), servicios (7.3 hm^3) y usos múltiples (2.4 hm^3) dependen exclusivamente de agua subterránea, lo que indica una limitada disponibilidad o preferencia por fuentes superficiales en estos sectores.

En total, se extraen 1,088.5 hm^3 de agua subterránea, superando el volumen de agua superficial utilizado (958.829 hm^3), lo que podría reflejar una mayor explotación de los acuíferos y una posible presión sobre estos recursos.

Cuadro 3 Distribución de los volúmenes de agua por usos en el DR 017

Usos	Volumen de agua subterránea (hm^3)	Volumen de agua superficial (hm^3)	Total	%
Agrícola	883.9	958.829	1,842.729	90.01
Abastecimiento de agua potable	126.4	-	126.4	6.17
Doméstico-pecuario	49.8	-	49.8	2.43
Uso industrial	18.7	-	18.7	0.91
Servicios	7.3	-	7.3	0.36
Usos múltiples	2.4	-	2.4	0.12
Total	1,088.5	958.829	2,047.329	100

Fuente: Elaboración con datos de CONAGUA (2023)

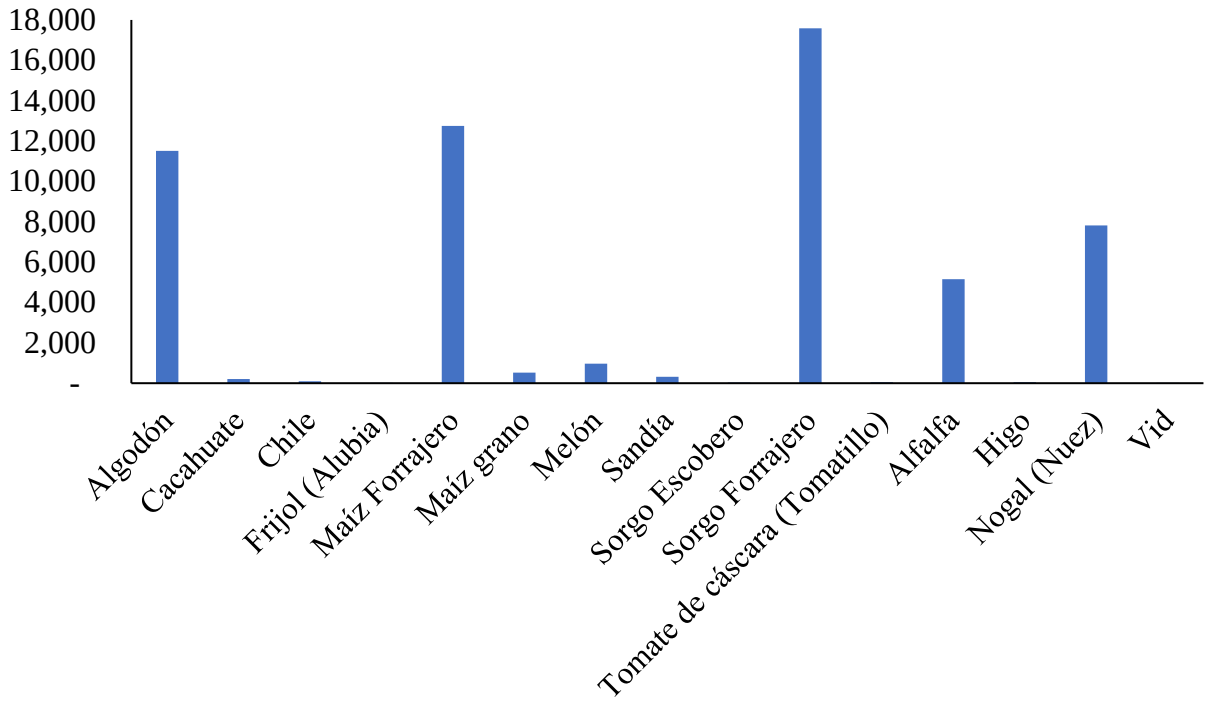
La distribución del volumen de agua en el Distrito de Riego 017 muestra que la actividad agrícola es la principal consumidora del recurso hídrico, con un total de 1,842.729 hm^3, lo que representa el 90.01% del agua disponible en el distrito. De este volumen, el 47.91% proviene de fuentes subterráneas y el 52.09% de fuentes superficiales, lo que indica una mayor dependencia del agua superficial para la irrigación.

Por otro lado, de acuerdo con Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA), (n.d.), la cuota para riego por hectárea de algodón para el año 2023 fue de $2,269, lo que representa un aumento respecto a la cantidad de $2,058 registrada en 2022. Este incremento refleja posibles ajustes en costos operativos, disponibilidad de agua o factores económicos que influyen en la gestión del recurso hídrico para la agricultura.

2.3 Principales cultivos del DR 017

La figura 4 representa la superficie sembrada de los principales cultivos del DR 017 para el ciclo agrícola 2022-2023, evidenciando una marcada disparidad en la distribución de la superficie sembrada. El sorgo forrajero destaca con la mayor extensión sembrada, seguido por el maíz forrajero y el algodón, que también ocupan grandes superficies. En contraste, cultivos como el chile, frijol (alubia) y cacahuate presentan áreas sembradas considerablemente menores. Otros cultivos como la alfalfa, nogal (nuez) y vid ocupan superficies intermedias, reflejando una preferencia por cultivos forrajeros y de alto valor comercial en la zona analizada (CONAGUA, 2024 b). Esta distribución sugiere un enfoque productivo orientado hacia la alimentación animal y cultivos de mayor rentabilidad.

Figura 4 Superficie Sembrada en el DR 017, 2022-2023



Fuente: Elaboración con datos de CONAGUA (2024 b)

2.4 Problemática del recurso hídrico en el DR 017

En el Distrito de Riego 017, ubicado en la Región Lagunera, el uso agrícola representa el mayor consumo de agua, lo que ha intensificado la presión sobre los recursos hídricos disponibles. Actualmente, cerca del 90% del agua extraída en esta zona se destina a la agricultura, en gran parte proveniente de fuentes subterráneas severamente sobreexplotadas. Esta situación ha obligado a reducir significativamente la disponibilidad de agua para el sector. Para el ciclo agrícola 2024–2025, se autorizó un volumen de apenas 400 millones de metros cúbicos para riego, lo que representa una reducción sustancial respecto a ciclos anteriores. Esta disminución ha implicado una reducción en la superficie cultivable, estimada en hasta 30 mil hectáreas, y pérdidas económicas del orden de los 2 mil millones de pesos para los productores (Esparza, 2024).

Además del volumen limitado, otro desafío crítico es la calidad del agua utilizada en la agricultura. La sobreexplotación de los acuíferos ha generado un aumento en la concentración

de arsénico en el agua extraída, lo que no solo representa un riesgo para la salud humana, sino también afecta la seguridad alimentaria y la viabilidad de los cultivos.

En 2023, la Comisión Nacional del Agua reportó que varios pozos agrícolas en municipios como Gómez Palacio exceden ampliamente los límites permitidos de arsénico, con concentraciones de hasta 0.450 mg/l (Canedo, 2023).

. Esta situación compromete la sustentabilidad del sistema agrícola regional, particularmente en un contexto de escasez creciente y alta dependencia del riego para la producción.

Ante este panorama, se vuelve indispensable modernizar los sistemas de riego, implementar tecnologías más eficientes como el riego presurizado o por goteo, y redefinir las políticas de asignación del recurso, priorizando el uso eficiente del agua y su sostenibilidad en el largo plazo.

2.4.1 La importancia del agua en la producción agrícola

El agua es un insumo fundamental para la producción agropecuaria, ya que determina la viabilidad de los cultivos y la rentabilidad de las actividades agrícolas. En la Región Lagunera, el riego es esencial para el cultivo de forrajes destinados a la ganadería lechera, una de las principales actividades económicas de la zona. Sin embargo, la sobreexplotación de los acuíferos no solo compromete la sostenibilidad del sector, sino que también incrementa los costos de producción, pues los agricultores deben perforar pozos más profundos y recurrir a tecnologías de bombeo más costosas para garantizar el abastecimiento de agua.

Desde una perspectiva económica, el valor del agua en la producción agrícola es significativo, ya que su disponibilidad influye directamente en el rendimiento de los cultivos y, por ende, en el valor agregado de la producción agropecuaria. De acuerdo con estimaciones de diversas fuentes, el agua utilizada en la agricultura contribuye al crecimiento económico a través del incremento en la productividad y la generación de empleo en la región. Sin embargo, la escasez y el deterioro de la calidad del agua amenazan la competitividad del sector, lo que hace urgente la implementación de estrategias de manejo eficiente del recurso, como la modernización de los sistemas de riego y el uso de tecnologías que optimicen su aprovechamiento.

Dado que el sector agrícola es el principal consumidor de agua en la región, es fundamental cuantificar con precisión el valor económico que el recurso aporta a la producción agropecuaria y comparar la relación con el dato existente de la cuota pagada por hectárea. Esto permitiría diseñar políticas de gestión sostenible que equilibren las necesidades del sector con la disponibilidad del recurso, asegurando su conservación a largo plazo.

3. ELEMENTOS FUNDAMENTALES DEL VALOR ECONÓMICO DEL AGUA

Desde la óptica económica, el problema del valor ha sido ampliamente discutido en diferentes épocas por diversos autores. Fedinando Galiani, el monje napolitano que escribió ampliamente sobre moneda e intercambio comercial (1728-1787), planteaba ya "la paradoja del valor" (el agua es muy útil e indispensable y sin embargo es muy barata, mientras que las joyas son suntuarias y sin embargo muy caras) y la resolvía al discutir el precio de un objeto en función tanto de su utilidad como de su escasez, incorporando el concepto de la capacidad de los objetos o bienes de proporcionar placer (Fonseca, 1998).

Igualmente, en 1776 Adam Smith en la Riqueza de las Naciones atribuía al concepto de valor dos significados: un bien puede tener valor desde el punto de vista de su utilidad (valor de uso) y de su capacidad de compra sobre otros bienes (valor de cambio). Las circunstancias ordinarias aluden a una situación de no escasez, pues también afirma Ricardo que los bienes pueden derivar su valor de la escasez y de la cantidad de trabajo requerida para obtenerlos. Desde este punto de vista, el agua no tendría ningún valor en situaciones de abundancia del recurso (Fonseca, 1998).

Los economistas neoclásicos argumentarían que el valor de un bien se deriva de la utilidad que reporte al consumidor, dicha utilidad en el margen es decreciente, es decir, una unidad adicional consumida cada vez reporta menor utilidad o satisfacción. En este punto, el agua tendría valor dependiendo de la utilidad que genere su consumo (en otras palabras, de cómo la valore subjetivamente el consumidor) (Fonseca, 1998).

El propósito de valorar el agua como bien económico es incentivar, vía mecanismos de precios de mercado, su uso eficiente y adecuado.

En las metodologías comúnmente utilizadas para valorar el agua están:

- La disposición a pagar derivada de la curva de demanda.
- Valoración de la productividad marginal del agua.
- El valor residual del agua como insumo productivo.
- El costo alternativo de lograr el servicio que el agua presta.

- El costo de viaje.
- La metodología de valoración contingente .

3.1. Modelos económicos aplicados en la valoración económica del agua para la agricultura

El agua es un recurso esencial para diversos sectores, incluyendo la agricultura, la industria, las empresas y la generación de energía. Su valor puede calcularse desde una perspectiva económica basada en el enfoque insumo-resultado, que cuantifica los beneficios en términos de empleo, valor del producto por unidad de agua o valor agregado del producto. En este sentido, el agua no solo es un insumo, sino un factor determinante en el desarrollo económico y social.

Dentro de estos sectores, la agricultura es el mayor consumidor de agua dulce a nivel mundial, representando aproximadamente el 69% del uso total. La seguridad alimentaria ha sido históricamente un desafío para las sociedades humanas y, en las próximas décadas, su relevancia seguirá en aumento. Se estima que la demanda global de alimentos y otros productos agrícolas crecerá un 50% entre 2012 y 2050, impulsada principalmente por el crecimiento demográfico (UNESCO, 2021).

Sin embargo, el uso intensivo del agua en la producción agrícola también conlleva impactos ambientales significativos. En muchas regiones del mundo, la extracción de agua para la producción de alimentos ha contribuido a la degradación de los ecosistemas, provocando el agotamiento de acuíferos, la reducción del caudal de los ríos, la pérdida de hábitats naturales y la contaminación de fuentes hídricas. Por ello, resulta fundamental valorar el agua no solo desde una perspectiva económica, sino también considerando sus beneficios socioculturales y ambientales, los cuales suelen pasar desapercibidos en los análisis financieros tradicionales.

Entre estos beneficios se incluyen la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición, la generación de empleo y el fortalecimiento de los medios de vida de los agricultores, la reducción de la pobreza y la revitalización de las economías rurales. Asimismo, el agua desempeña un papel clave en la mitigación y adaptación al cambio climático y en la provisión de servicios hídricos de múltiples usos. A pesar de su importancia, el valor del agua en la seguridad alimentaria rara vez se cuantifica de manera integral y, en muchas ocasiones, se

aborda únicamente desde un enfoque político que no considera otros aspectos fundamentales. La valoración monetaria más común es la volumétrica, basada en el precio por metro cúbico de agua utilizada, lo que no siempre refleja su verdadero impacto y relevancia (UNESCO, 2021).

En este contexto, a gestión eficiente del agua en la agricultura es fundamental para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos y la seguridad alimentaria. Dado que el agua es un recurso limitado, se debe optimizar su uso mediante estrategias que maximicen la producción con un consumo reducido. En este contexto, los modelos económicos desempeñan un papel clave, ya que permiten valorar el agua en función de su contribución a la productividad agrícola y fomentar prácticas que mejoren su eficiencia (Global Water Partnership, 2008).

Uno de los enfoques más relevantes es la implementación de tecnologías como el riego de precisión y la selección de cultivos adaptados a condiciones de menor disponibilidad de agua. Estas estrategias no solo conservan el recurso, sino que también generan beneficios económicos para los productores al reducir los costos operativos y aumentar la rentabilidad de las explotaciones agrícolas. Asimismo, la valoración económica del agua incentiva la adopción de tecnologías más eficientes y fomenta inversiones en infraestructuras que minimicen pérdidas y desperdicios (EOS Data Analytics, 2024).

Desde una perspectiva económica, considerar el agua como un bien con valor productivo permite establecer mecanismos de regulación que equilibren su oferta y demanda. En este sentido, la aplicación de tarifas o incentivos que reflejen su escasez y utilidad ayuda a los productores a tomar decisiones más racionales en su uso, promoviendo la sostenibilidad a largo plazo de los recursos hídricos y la producción agrícola. Como señala Arrojo Agudo (1999), la valoración económica del agua puede abordarse desde dos enfoques: el de la oferta, basado en los costos de provisión, o el de la demanda, que considera el valor de la productividad o la utilidad generada por el agua en la actividad agrícola.

Dado su impacto en la eficiencia y sostenibilidad del sector, diversos modelos económicos se han desarrollado para estimar el valor del agua en la agricultura. Estos modelos permiten una mejor asignación de los recursos hídricos y la implementación de políticas adecuadas. A continuación, se presentan algunos de los modelos más utilizados.

3.1.1. Programación Lineal

La programación lineal es una técnica matemática utilizada para optimizar la asignación de recursos escasos, como el agua, en la producción agrícola. Este modelo busca maximizar o minimizar una función objetivo, como el beneficio económico o el costo, sujeto a una serie de restricciones lineales que representan las limitaciones de recursos y otras condiciones del sistema. Al aplicar la programación lineal en la agricultura, es posible determinar la combinación óptima de cultivos y la asignación eficiente del agua disponible para maximizar la rentabilidad.

En la Comarca Lagunera, México, se aplicó un modelo de programación lineal para estimar el valor económico del agua de riego, calculando el precio sombra y la productividad marginal del recurso (Godínez et al., 2013).

3.1.2. Análisis de Costos Marginales

El análisis de costos marginales evalúa el costo adicional de producir una unidad extra de cultivo al incrementar el uso del agua. Este enfoque es útil para determinar tarifas que reflejen el verdadero costo del recurso y para establecer políticas de precios que incentiven el uso eficiente del agua. Al comprender cómo varían los costos con cambios en la cantidad de agua utilizada, los agricultores y los responsables de políticas pueden tomar decisiones más informadas sobre la asignación y el uso del agua en la agricultura. En Palestina, se utilizó esta metodología para estimar el valor del agua desde la perspectiva de la oferta, determinando curvas de oferta basadas en los costos de obtención y costos marginales (Abu-Madi, 2004).

3.1.3. Análisis de Valor Agregado

El análisis de valor agregado se centra en la contribución neta del agua al valor final de los productos agrícolas. A diferencia de otros enfoques que consideran la producción bruta, este modelo evalúa la eficiencia económica del uso del agua al analizar el valor añadido generado por unidad de agua utilizada. Este enfoque permite identificar prácticas agrícolas que maximizan el valor económico derivado del uso del agua, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible del recurso (Sous la direction de Frédéric Apollin, 2015).

Este modelo se centra en el valor agregado generado durante la producción agrícola, en lugar de la producción bruta, permitiendo evaluar la eficiencia económica del uso del agua. Organizaciones como AGTER, AVSF y GRET (tres socios del grupo Agua agrícola de la comisión Agricultura y Alimentación de Coordination Sud) han propuesto este enfoque para analizar la eficiencia y eficacia económica del uso del agua en la agricultura familiar, considerando la distribución del valor agregado y el impacto en el empleo (Sous la direction de Frédéric Apollin, 2015).

3.1.4. Modelos de Insumo-Producto

Los modelos de insumo-producto analizan las interrelaciones entre diferentes sectores económicos, evaluando cómo el uso del agua en la agricultura impacta en otros sectores y en la economía en general. Estos modelos permiten entender las dependencias y efectos indirectos del uso del agua, facilitando la formulación de políticas integrales que consideren tanto los beneficios directos en la agricultura como los efectos colaterales en otros sectores económicos (UNESCO, 2021).

Estos modelos analizan las interrelaciones entre diferentes sectores económicos, evaluando cómo el uso del agua en la agricultura impacta en otros sectores y en la economía en general. Estos modelos son utilizados a nivel macroeconómico para estimar el impacto de cambios en la oferta de agua en la economía en general (UNESCO, 2021).

Por ejemplo, en estudios sobre la seguridad hídrica global, la UNESCO ha aplicado este enfoque para evaluar el impacto de la escasez de agua en la producción agrícola y en la estabilidad de precios de los alimentos. Los resultados han demostrado que una reducción en la disponibilidad de agua para riego puede generar efectos negativos en el PIB agrícola y afectar la seguridad alimentaria de poblaciones vulnerables (UNESCO, 2021).

3.1.5. Modelos de Productividad Marginal

Los modelos de productividad marginal estiman la contribución adicional de una unidad extra de agua al rendimiento de los cultivos. Este enfoque ayuda a determinar el valor económico del agua en función de su impacto en la producción agrícola. Al cuantificar cómo

varía la producción con cambios en la cantidad de agua utilizada, es posible identificar niveles óptimos de uso del agua que maximicen la rentabilidad y promuevan la sostenibilidad del recurso. En la Comarca Lagunera, se aplicó este enfoque para calcular la productividad marginal del agua de riego, proporcionando información valiosa para la formulación de políticas de uso eficiente del recurso (Godínez et al., 2013).

La aplicación de estos modelos económicos permite una comprensión más profunda del valor del agua en la agricultura, y contribuye en la toma de decisiones y la implementación de políticas que promuevan su uso eficiente y sostenible.

Debido a la necesidad de evaluar con rigor el impacto del uso del agua en la producción agrícola, en esta investigación se empleará el método de productividad marginal. Este enfoque permite estimar con precisión el efecto de una unidad adicional de agua (m^3) sobre el valor de la producción, lo que lo convierte en una herramienta analítica sólida para estudiar la eficiencia en el uso del recurso hídrico. Entre sus principales ventajas destacan su capacidad para identificar rendimientos decrecientes, establecer umbrales de eficiencia y proporcionar criterios técnicos y económicos para la toma de decisiones en la gestión del riego. En consecuencia, este método ofrece información clave para optimizar el uso del agua en contextos de escasez y mejorar la rentabilidad agrícola de manera sustentable.

3.2 Teoría de la Productividad Marginal

El valor económico del agua es esencial para comprender su gestión y asignación eficiente en diversos sectores productivos. Uno de los conceptos clave en esta valoración es la productividad marginal, que se refiere al incremento en el beneficio neto o en la producción total al añadir una unidad adicional de agua al proceso productivo, manteniendo constantes los demás factores. En términos económicos, la productividad marginal del agua indica cuánto contribuye cada metro cúbico adicional de agua al valor total de la producción (García et al., 2013).

La productividad marginal se define como el cambio en la producción total resultante de incrementar en una unidad la cantidad de un factor productivo, mientras los demás factores permanecen constantes. Matemáticamente, se expresa como la derivada parcial de la función de producción respecto al factor en cuestión. Este concepto está estrechamente relacionado

con la Ley de los Rendimientos Decrecientes, que establece que, al añadir sucesivas unidades de un factor productivo, la producción adicional obtenida tiende a disminuir después de cierto punto (Economipedia,2020).

La Teoría de la Productividad Marginal del Agua en la Agricultura se centra en analizar cómo la variación en la cantidad de agua utilizada como insumo influye en la producción agrícola total, manteniendo constantes los demás factores productivos. Este enfoque es esencial para comprender la eficiencia y la contribución del agua en el proceso productivo agrícola, facilitando decisiones óptimas en la asignación de este recurso vital. La productividad marginal del agua se define como el incremento en la producción agrícola resultante de añadir una unidad adicional de agua, mientras se mantienen constantes los demás insumos. Este concepto está relacionado con la Ley de los Rendimientos Decrecientes, que indica que, después de cierto punto, la adición sucesiva de agua puede generar incrementos cada vez menores en la producción (FAO, 2003).

Por ejemplo, al aumentar la cantidad de agua aplicada a un cultivo, inicialmente el rendimiento puede incrementarse significativamente; sin embargo, llegará un momento en que añadir más agua resultará en aumentos marginales cada vez menores e incluso podría reducir la producción debido a efectos adversos como el anegamiento del sueloEs importante reconocer que la teoría de la productividad marginal del agua asume que solo el agua varía mientras los demás factores permanecen constantes, lo cual puede no reflejar la complejidad de las operaciones agrícolas reales. Factores como las condiciones climáticas, la calidad del suelo y las prácticas de manejo también influyen en la producción. Por lo tanto, aunque la teoría proporciona una guía valiosa, debe aplicarse considerando el contexto específico y en conjunto con otros conocimientos agronómicos (IMTA, 2016).

3.3 Estudios sobre la estimación del valor económico del agua en la agricultura

La estimación del valor del agua en la agricultura es un tema crucial para la formulación de políticas hídricas sostenibles y la optimización del uso de este recurso en la producción de alimentos. Dado que el sector agrícola es el mayor consumidor de agua a nivel mundial, comprender su valor económico permite mejorar la asignación del recurso, incentivar

prácticas más eficientes y reducir el desperdicio. Diversos enfoques han sido utilizados para estimar su valor, incluyendo métodos basados en la productividad marginal del agua, la disposición a pagar por su uso y los costos de oportunidad asociados a su escasez. Estos estudios no solo facilitan la implementación de esquemas tarifarios adecuados; sino que, también contribuyen al diseño de estrategias de adaptación ante el cambio climático y la variabilidad en la disponibilidad del agua. Algunos de estos estudios son los siguientes.

Montesillo-Cedillo (2023) cuantificó la contribución del agua al valor de la producción agrícola bajo riego en México entre 1980 y 2017. Empleó un modelo econométrico logarítmico hiperbólico, y analizó la relación entre el valor de la producción agrícola bajo riego (en pesos constantes de 2013) y el agua suministrada para riego. Se encontró que siete regiones hidrológico-administrativas (norte y bajío) concentran el 89.4% de la superficie de riego y fueron las más beneficiadas por inversiones federales. Se identificaron dos cambios estructurales: 1980-1987 y 2009-2017. Los resultados indican que el aporte del agua al valor de la producción mostró una tendencia positiva, aumentando de $0.39 m³ en 1980 a $1.92 m³ en 2017, con un promedio de $1.11 m³ en todo el periodo.

Martínez-Luna et al. (2021) realizaron un estudio para obtener el patrón óptimo de cultivos en el Distrito de Riego 100 Alfajayucan Hidalgo, así como el de estimar el precio económico del agua ante distintos escenarios. Emplearon un modelo de programación lineal para maximizar el ingreso neto de los agricultores con 17 actividades agrícolas cíclicas y perenes, sujetas a 57 restricciones de superficie, agua, mano de obra y maquinaria. Los resultados indican que el ingreso neto del DR 100 se incrementaría en 273 millones de pesos si se establece el patrón óptimo de cultivos, en comparación con el obtenido en el ciclo agrícola 2015-2016. El valor económico del agua arrojado por el modelo fue de $1.44 m^3, muy superior al pagado actualmente por las cuotas de riego ($0.02 m^3), se confirma la existencia de un fuerte subsidio al consumo de agua: por lo que se recomienda se incrementen las cuotas pagadas por los agricultores.

Zetina-Espinosa et al. (2013) estimaron el valor económico del agua para el Distrito de Riego 044 (Jilotepec, Estado de México) y obtienen el patrón óptimo de cultivos, en siete escenarios basados en los últimos diez ciclos agrícolas. Mediante un modelo de programación lineal con 37 actividades agrícolas y 62 restricciones, optimizaron el ingreso y cuantificaron el valor

del producto marginal del agua. Los resultados muestran una diferencia de 2.2 millones de pesos entre la situación actual y el óptimo económico. En un escenario sin restricción de superficie, el maíz sería reemplazado por trigo y frutales. El valor del producto marginal del agua varió entre $0.96 y $5.72 por m³ en Otoño-Invierno y entre $0.03 y $0.21 por m³ en Primavera-Verano, superando en todos los casos las cuotas actuales. Recomiendan un incremento gradual en las tarifas para mejorar la eficiencia en el uso del agua y reducir su desperdicio.

Godínez-Montoya et al. (2007) estimaron el valor económico del agua para riego por bombeo y gravedad en la Comarca Lagunera, para ello, emplean un modelo de programación lineal que asigna recursos escasos y una función de producción que relaciona el beneficio neto con el volumen de agua utilizada. Los resultados indican un valor económico de $0.646 m³ para el agua de bombeo y $0.582 m³ para la de gravedad. La productividad marginal del agua de bombeo es de $0.73 m³ con un volumen promedio de 738.97 millones de m³, mientras que la del agua de gravedad es de $0.25 m³ con un volumen de 376.99 millones de m³.

En otros países también se presentan estudios de valoración económica del agua para uso agrícola, entre ellos se tienen:

Nouri‐Khajebelagh et al. (2021) hicieron un estudio en el que calcularon el precio real del agua de riego. Por ello calcularon el valor económico del agua en el caso del trigo, patatas, alfalfa, cebada y canola en la ciudad de Ardabil utilizando datos transversales recogida para el año 2018, con 1087 cuestionarios cumplimentados por agricultores en la zona. Emplearon formas funcionales flexibles que incluyen translog, trascendental, cuadrática generalizada y Leontief generalizada y funciones inflexibles, es decir, Cobb-Douglas. Emplearon el software Excel, SPSS y EViews. El valor económico del agua de riego tras analizar los resultados para el trigo, cultivos de papa, alfalfa, cebada y canola fue de 0.026, 0.092, 0.022, 0.0225 y 0.0474 US$/$m^3$, respectivamente. Dado que estos valores económicos calculados son bastante altos para diferentes cultivos, la producción de los cultivos en cuestión es económicamente viable y el agua consumida económicamente justificada. El precio del suministro de agua en la llanura de Ardabil varía entre 0,00877 y 0,0175 US$/$m^3$, que es significativamente diferente del precio real. Dada la diferencia de precio entre el coste del suministro de agua y el precio pagado por los agricultores, los planes de incentivos pueden

usarse para que cualquier agricultor que consuma menos agua se beneficie de un descuento en el cálculo de los precios del agua, lo que dará como resultado una mitigación del consumo de volumen de agua.

De Brito y de Azevedo (2022) evaluaron el valor económico del agua de riego en la cuenca del río São Francisco en Brasil a través del enfoque del precio sombra, se calculó utilizando el Método del Valor Residual. Lo realizaron para los diez principales cultivos de la cuenca del río São Francisco en términos de uso de agua: maíz, soja, mango, frijol, café, plátano, algodón, caña de azúcar, papaya y arroz. Los resultados muestran que el agua tiene un alto valor económico para la agricultura de regadío, a excepción de la producción de caña de azúcar, que presentó un precio sombra del agua negativo en 2019 (USD -0,0325/m^3), lo que significa que la cosecha de este año no fue rentable. Todos los demás cultivos obtuvieron ganancias, presentando precios sombra significativos, especialmente el mango (USD 0,36/m^3), el frijol (USD 0,335/m^3) y la papaya (USD 0,315/m^3).El precio sombra del agua está altamente influenciado por la productividad de los cultivos, los costos de producción y el volumen de agua utilizado.

El costo de oportunidad del agua de un bien no depende sólo de los costes que exige su disponibilidad, sino también de su utilidad y escasez. En el caso del agua, es cada vez más necesario considerar su calidad, pues la productividad en sus diversos usos (agrícola, industrial, doméstico y sanitario), dependen en gran medida de sus características físico-químicas (Arrojo, 1999).

4 MODELOS APLICADOS DE VALORACIÓN ECONOMICA DEL AGUA AL DISTRITO DE RIEGO 017: REGION LAGUNERA

La valoración económica del agua es un proceso crucial para comprender su impacto en las actividades productivas, especialmente en sectores como la agricultura. Para realizar esta valoración, se empleó el método de la productividad marginal para obtener el valor económico del agua, para ello se emplearon tres modelos econométricos los cuales se describen a continuación.

4.1. Modelo de Regresión Lineal

Este modelo establece una relación lineal entre la variable dependiente Y y un conjunto de variables explicativas X_i, donde i varía desde 1 hasta n, representando las diferentes variables independientes que afectan a Y.

Este modelo ayuda a entender cómo diferentes factores explicativos impactan la variable dependiente, permitiendo hacer predicciones y tomar decisiones basadas en evidencia

El modelo de regresión lineal múltiple se expresa como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + u$$

Cuadro 4 Descripción de las variables del modelo lineal

Variable	Descripción
Y	Es la variable dependiente (lo que queremos predecir o explicar).
β_0	Es la ordenada al origen o intercepto, representando el valor esperado de Y cuando todas las variables X_i son cero.
$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$	Son los coeficientes de regresión, que indican el efecto marginal de cada variable independiente X_i sobre Y, manteniendo las demás constantes.
$X_1, X_2, \dots, X_n$	son las variables independientes o explicativas, que afectan el valor de Y
u	es el término de error, que capta el impacto de otros factores no incluidos en el modelo

4.2. Modelo de Regresión cuadrático

Un modelo de regresión no lineal con al menos una variable cuadrática y múltiples variables explicativas permite capturar relaciones más complejas entre la variable dependiente y sus determinantes. En este enfoque, algunas variables influyen en Y de manera lineal, mientras

que al menos una de ellas tiene un efecto cuadrático, lo que permite modelar rendimientos crecientes o decrecientes. Esto es útil en contextos donde una variable tiene un impacto que cambia a diferentes niveles, como la productividad agrícola en función del agua aplicada, donde un riego moderado aumenta el rendimiento, pero un exceso puede ser contraproducente. Este tipo de modelo es ampliamente utilizado en economía, ingeniería y ciencias ambientales para mejorar la precisión en la estimación de relaciones no lineales.

El modelo se expresa de a siguiente manera:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 {X_2}^2 + \beta_3 X_3 + \cdots + \beta_n X_n + e$$

Cuadro 5 Descripción de las variables del modelo no lineal

Variables	Descripción
Y	es la variable dependiente,
β_0	es la constante del modelo
$\beta_1, \beta_3, \ldots, \beta_n,$	representa el cambio en Y ante un incremento en las variables independientes lineales
β_2	captura los efectos no lineales de X_2 permitiendo capturar rendimientos crecientes o decrecientes e es el término de error aleatorio
$X_1, X_3, \ldots, X_n$	son variables independientes con efecto lineal
X_2^2	es la variable con efecto cuadrático

Este tipo de modelo permite capturar relaciones más realistas en fenómenos económicos o naturales, donde muchas variables tienen un efecto lineal, pero una en particular tiene un impacto no lineal.

Estimación de indicadores económicos

Para determinar el valor económico, se calcula la productividad marginal con respecto a la variable de interés (Pmg_{X_1})**,** que mide el cambio en la variable dependiente Y ante una variación marginal de la variable de interés:

$$Pmg_{X_1} = \frac{\partial Y}{\partial X_1}$$

4.3. Modelo de regresión exponencial

Este modelo exponencial describe la relación entre Y y varias variables explicativas: una con un efecto no lineal X_1 y con efectos lineales (X_2,…, X_n) en el logaritmo de la variable dependiente. En particular, X_1 influye de manera inversa y exponencial, lo que sugiere que a medida que X_1 aumenta, Y cambia a un ritmo decreciente si β1>0. Por otro lado, X_1 afectan Y de forma proporcional, ya que sus coeficientes indican la elasticidad relativa de cada variable. Este tipo de modelo es útil en estudios económicos y productivos donde una variable tiene rendimientos marginales decrecientes, mientras que otras tienen efectos directos sobre el crecimiento de la variable dependiente. El modelo se expresa de la siguiente manera:

$$Y = e^{\beta_0} * e^{-\beta_1\left(\frac{1}{X_1}\right)} * e^{\beta_2 X_2} * e^{\beta_3 X_3} * \ldots . e^{\beta_n X_n} * e^{u}$$

Cuadro 6 Descripción de las variables del modelo exponencial

Variable	Descripción
Y	es la variable dependiente
e^{β_0}	es un término de escala
$e^{-\beta_1\left(\frac{1}{X_1}\right)}$	indica una relación exponencial decreciente entre Y y X_1 si $\beta_1 > 0$
$e^{\beta_2 X_2}, e^{\beta_3 X_3}, \ldots . , e^{\beta_n X_n}$	capturan los efectos exponenciales lineales de las variables X_2, …, X_n que impactan de manera lineal en el logaritmo de Y
e^{u}	representa el término de error multiplicativo

Expresión del modelo en términos logarítmicos

Tomando logaritmos naturales en ambos lados, se obtiene una regresión lineal en los coeficientes, lo que facilita la estimación mediante métodos como Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) o Máxima Verosimilitud.

Aplicando logaritmo natural a ambos lados de la ecuación exponencial:

$$Y = e^{\beta_0} * e^{-\beta_1\left(\frac{1}{X_1}\right)} * e^{\beta_2 X_2} * e^{\beta_3 X_3} * \ldots . e^{\beta_n X_n} * e^{u}$$

Se tiene:

$$\ln(Y) = \ln(e^{\beta_0}) * \ln(e^{-\beta_1\left(\frac{1}{X_1}\right)}) * \ln(e^{\beta_2 X_2}) * \ln(e^{\beta_3 X_3}) * \ldots . \ln(e^{\beta_n X_n}) * \ln(e^{u})$$

Empleando la propiedad de $\ln(e^x) = x$ se simplifica:

$$\ln(Y) = \beta_0 - \beta_1\left(\frac{1}{X_1}\right) + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + u$$

La transformación logarítmica permite obtener elasticidades. La elasticidad mide el cambio porcentual del Valor de la producción respecto al cambio porcentual del volumen de agua

$$E_{Y,X_1} = \frac{dY}{dX_1} * \frac{X_1}{Y}$$

Se deriva la ecuación respecto a X_1:

$$\frac{dlnY}{dX_1} = \frac{dY/Y}{dX_1} = \frac{\beta_1}{{X_1}^2}$$

La elasticidad es el producto de la derivada y el valor de A:

$$E_{Y,X_1} = \beta_1 * \frac{1}{X_1}$$

Existe una relación entre la elasticidad y el producto marginal del agua:

$$Pmg_{X_1} = E_{Y,X_1} * \frac{Y}{X_1}$$

Sustituyendo E_{Y,X_1} se tiene:

$$Pmg_{X_1} = \left(\beta_1 \frac{1}{X_1}\right)\frac{Y}{X_1}$$

$$Pmg_{X_1} = \beta_1 \frac{Y}{{X_1}^2}$$

El producto marginal del agua (Pmg_{X_1}) mide el cambio absoluto en Y ante un cambio unitario en X_1.

5. ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS

5.1. Estimación del modelo lineal

El modelo de regresión lineal analiza la relación entre el valor de la producción (Y) **y** tres factores clave: el volumen de agua utilizado (X_1)**,** el rendimiento del cultivo (X_2) y el precio medio rural (X_3). Los datos utilizados en este modelo abarcan el período de 1998 a 2023 (ANEXO 1). La información sobre el valor de la producción, el volumen de agua empleado, el rendimiento y el precio medio rural del Distrito de Riego 017 se obtuvo de las estadísticas agrícolas de los distritos de riego y de los registros de volúmenes de agua distribuidos de CONAGUA,(2024 b).

Matemáticamente, el modelo se expresa como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + u$$

Cuadro 7 Descripción de las variables del modelo lineal estimado

Variables	Descripción
Y	Representa el valor de la producción, expresado en unidades monetarias (millones de pesos MN)
X_1	Es el volumen de agua utilizado en la producción agrícola del Dr 017 (hm^3)
X_2	Es el rendimiento de los cultivos del DR 017 (ton/ha)
X_3	Es el precio medio rural de los productos agrícolas ($)
β_0	Es el intercepto y representa el valor esperado de la producción cuando todas las variables explicativas son cero
β_1	Indica cuánto cambia el valor de la producción ante un aumento marginal en la disponibilidad de agua, manteniendo constantes las demás variables.
β_2	Expresa el impacto de un incremento en el rendimiento del cultivo sobre el valor de la producción
β_3	Representa el efecto de un cambio en el precio medio rural sobre el valor de la producción
u	Es el término de error aleatorio

5.1.1. Resultados del modelo de regresión lineal

Los resultados del modelo de regresión lineal evidencian que el coeficiente de determinación R^2 es igual a 0.97, lo que indica que el 97% de la variación en la variable dependiente es

explicada por las variables independientes, lo que sugiere que el modelo tiene un buen ajuste a los datos.

En el cuadro 7 se observa que todos los coeficientes de las variables (agua X_1, rendimiento X_2, precio medio rural X_3 y la constante) son estadísticamente significativos ya que los p-valores son muy bajos (todos menores que 0.05).

Cuadro 8 Coeficientes del modelo de Regresión Lineal

Y	Coeficientes	Error Estándar	t	P valor	Intervalo de confianza 95%	
X_1	1.011	0.232	4.35	0.000	0.529	1.493
X_2	37.491	14.689	2.55	0.018	7.028	67.954
X_3	1.645	0.071	23.07	0.000	1.497	1.793
$Constante$	-1883.192	409.134	-4.60	0.000	-2731.685	-1034.699

Análisis de resultados del modelo de regresión lineal

Los coeficientes $X_1, X_2\ y\ X_3$ son positivos, lo que indica que un aumento en cualquiera de estas variables incrementa el valor de la producción.

Estimación del producto marginal del agua

La productividad marginal del agua mide el cambio en la producción agrícola (en este caso, el valor de la producción en millones de pesos) que se obtiene al añadir una unidad adicional de agua, manteniendo constantes los demás factores que afectan la producción.

En la ecuación:

$$Y = -1883.192 + 1.011X_1 + 37.491X_2 + 1.641X_3 + u$$

En este contexto, la productividad marginal del agua se estima en 1.011 pesos por cada metro cúbico adicional utilizado. Dado que tanto el valor del agua como el de la producción están expresados en millones, su cociente se obtiene en unidades de metros cúbicos. Esta relación indica que el agua tiene un impacto directo y positivo en la productividad económica de la agricultura en el Distrito de Riego 017, donde cada unidad adicional de agua resulta en una mayor generación de valor en la producción agrícola.

Este resultado es relevante para la toma de decisiones en términos de manejo y distribución del agua, ya que resalta cómo un recurso tan crucial como el agua impacta de manera significativa en el valor económico generado por la agricultura en la zona. La relación implica que una mayor disponibilidad de agua en el DR 017 tiene un efecto directo y cuantificable en la producción agrícola, lo que podría ser útil para optimizar el uso del agua y planificar estrategias de riego más eficientes

5.2 Estimación del modelo cuadrático

Para este modelo, inicialmente se consideraron variables independientes como superficie, rendimiento, y costos (ANEXO 2); sin embargo, con estas variables el modelo no resultó significativo. Por ello, se optó por un modelo más simplificado que incluyó únicamente el beneficio neto como variable dependiente y el volumen de agua utilizado como variable independiente. Los cultivos que se emplearon para el análisis que relaciona el beneficio neto entre el volumen de agua de gravedad fueron: algodón, cacahuate, chile, frijol (alubia), jitomate (tomate rojo), maíz forrajero, maíz grano, melón, sandía, sorgo escobero, sorgo forrajero, alfalfa, nogal (nuez), higo y vid.

Los datos sobre superficie, rendimiento, precio medio rural (PMR), costos de producción y láminas de riego corresponden al ciclo agrícola 2021-2022. Estos se obtuvieron de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), Delegación Coahuila, así como de la base de datos de estadísticas agrícolas de los distritos de riego y volúmenes de agua distribuidos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024).

En forma matemática la representación del modelo es la siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 {X_1}^2 + e$$

Cuadro 9 Descripción de las variables del modelo no lineal estimado

Variable	Descripción
Y	Es el beneficio neto, calculado como la diferencia entre el ingreso y el costo totales (millones de pesos MN)
X_1	Es el volumen de agua utilizado para generar ese nivel de beneficio (hm^3)
${X_1}^2$	Es el volumen de agua al cuadrado (hm^3)
β_0	es la constante del modelo

β_1	Representa el cambio en el beneficio neto ante un incremento marginal en el volumen de agua
β_2	Capta los efectos no lineales del agua sobre el beneficio neto
e	Es el término de error aleatorio

Los datos empleados en el modelo corresponden a los beneficios netos generados de los cultivos anteriormente mencionados, además se emplea el volumen de agua, estos datos se muestran en el cuadro 10.

Cuadro 10 Datos empleados en el modelo no lineal, ciclo agrícola 2021-2022

Beneficio Neto (Millones de $MN)	Volume de agua (Hm^3)
88.7004	60.739146
984.88856	187.50342
1400.4195	468.43955
1778.0277	698.69666
1878.1644	719.66957
1940.0706	903.45232
1973.8894	909.74639
1997.2399	911.07394
2010.0835	913.20686
2016.3734	913.77446
2019.0534	915.79946
2019.2572	915.91046
2019.3715	920.42665
2019.4325	926.32751
2019.3613	926.45328

5.2.1 Resultados del modelo cuadrático

Los resultados del modelo indican que es altamente significativo en su conjunto ($F(2,12) = 200.63$, $p = 0.0000$), además, el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9710$, R^2 ajustado = 0.9661) muestra que el modelo explica el 97.1% de la variabilidad en la variable dependiente. Ambas variables explicativas son estadísticamente significativas: el volumen de agua tiene un efecto positivo ($p = 0.000$) y el volumen de agua al cuadrado un efecto negativo ($p = 0.001$), mientras que la constante no es significativa ($p = 0.875$). Esto sugiere que el modelo

es sólido y las variables seleccionadas influyen de manera significativa en el beneficio neto de los productores del DR 017.

Cuadro 11 Coeficientes del Modelo de Regresión cuadrática

Y	Coeficientes	Error Estándar	t	P valor	Intervalo de confianza 95%	
X_1	4.115	0.508	8.10	0.000	3.009	5.221
X_1^2	-0.002	0.000	-4.60	0.001	-0.003	-0.001
Constante	17.402	107.917	0.16	0.875	-217.730	252.533

Análisis de los resultados del modelo Regresión no Lineal

El Coeficiente de X_1 (4.115) indica que, en promedio, un incremento unitario en el volumen de agua (m^3) aumenta el beneficio neto en 4.115 unidades (pesos mexicanos), manteniendo todo lo demás constante.

El Coeficiente de X_1^2 (-0.002) es negativo lo que sugiere que la relación entre el beneficio y el volumen de agua no es lineal, sino cóncava (efecto decreciente). A medida que aumenta el volumen de agua, el beneficio sigue aumentando, pero a un ritmo cada vez menor, y eventualmente podría disminuir.

La constante (17.402) representa el beneficio neto esperado cuando el volumen de agua es cero. Sin embargo, dado que no es estadísticamente significativo y su interpretación no es relevante en este contexto.

La ecuación estimada queda de la siguiente manera:

$$Y = 17.402 + 4.115\,X_1 - 0.002X_1^{\,2} + e$$

La relación cuadrática indica que existe un punto de máximo beneficio después del cual un aumento en el volumen de agua comienza a reducir el beneficio neto.

Se puede calcular el volumen óptimo de agua para maximizar el beneficio usando la fórmula del vértice de una parábola:

$$X_{óptimo} = -\frac{coeficiente\ de\ X_1}{2\ x\ coeficiente\ de\ X_1^2}$$

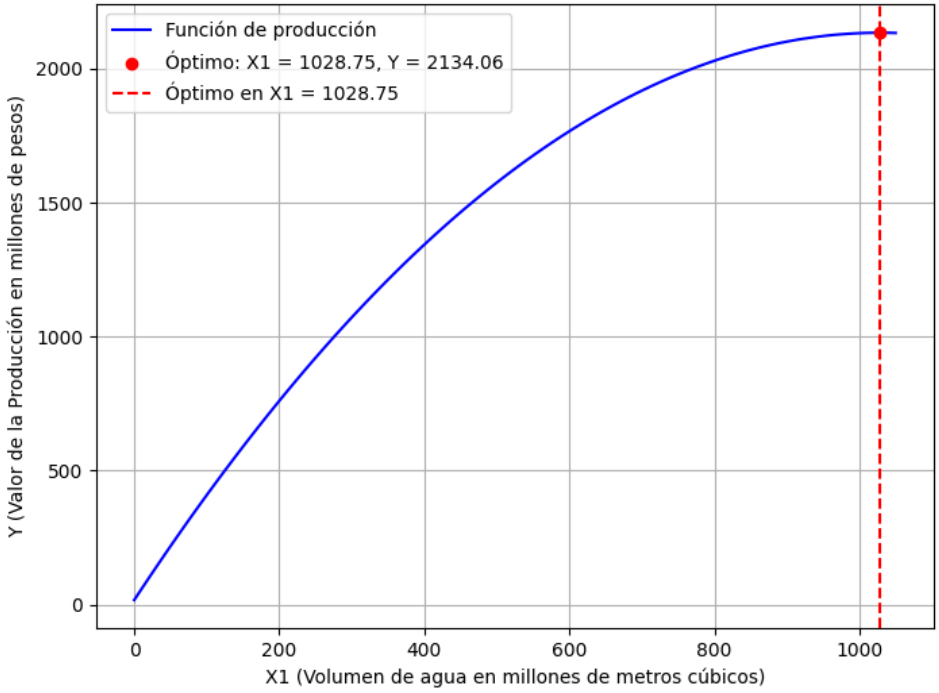
Sustituyendo los valores:

$$X_{óptimo} = -\frac{4.115}{2\ x\ (-0.002)} = 1028.75$$

Esto significa que el beneficio neto máximo se alcanza con aproximadamente 1029 hm^3 de agua.

La Figura 5 muestra la relación entre el volumen de agua utilizada en millones de metros cúbicos y el valor de la producción agrícola en millones de pesos, evidenciando una función de producción creciente donde el incremento en el uso del agua genera un aumento en la producción, aunque a un ritmo decreciente. Se identifica un punto óptimo en el que el uso del agua alcanza los 1028.75 millones de metros cúbicos, lo que maximiza el valor de la producción en 2134.06 millones de pesos, representado por un punto rojo en el gráfico. Además, una línea roja discontinua marca este nivel óptimo, indicando que superar esta cantidad de agua no genera mejoras significativas en la producción, lo que sugiere la existencia de un límite en la eficiencia del recurso en el sistema agrícola analizado.

Figura 5 Función de producción en el óptimo del volumen de agua



Fuente: Elaboración propia

Estimación del producto marginal del agua

La relación entre el beneficio neto (Y) y el volumen de agua (X_1) está dada por la ecuación:

$$Y = 17.402 + 4.115X_1 - 0.002{X_1}^2$$

El producto marginal del agua (PMg) se obtiene derivando Y con respecto a X_1:

$$PMg_{X_1} = \frac{\partial 17.402 + 4.115X_1 - 0.002{X_1}^2}{\partial X_1}$$

$$Pmg_A = 4.115 - 0.004X_1$$

El coeficiente negativo (-0.004) muestra que existe una disminución del producto marginal conforme se incrementa el volumen de agua utilizada. Es decir, a mayores volúmenes de agua aplicados, el impacto positivo en el beneficio neto se reduce, lo que refleja rendimientos marginales decrecientes del agua en la producción agrícola. Esto implica que, después de cierto punto, incrementar el agua utilizada aporta cada vez menos al beneficio neto, lo que sugiere la necesidad de optimizar su uso para maximizar la eficiencia en la producción.

Para un volumen de agua de 926.4 hm^3, que representa el volumen total considerado en el modelo para los cultivos analizados, se obtiene que:

$$Pmg_{X_1} = 4.115 - 0.004(926.4)$$

$$Pmg_{X_1} = 0.4094\ \$/m^3$$

Esto significa que, en el contexto del modelo, cada metro cúbico adicional de agua utilizada en la producción agrícola genera un aumento de 0.4094 pesos en el beneficio neto en los productores agrícolas del DR 017.

Este resultado es relevante para la toma de decisiones y puede ser clave para la gestión eficiente del recurso hídrico en el Distrito de Riego.

5.3. Estimación del modelo exponencial

Los datos empleados para este modelo comprenden el período de 1998 a 2023. El valor de la producción, el volumen de agua empleada, rendimiento y precio medio rural en el Distrito

de Riego 017 se obtuvieron de las estadísticas agrícolas de los distritos de riego y de los volúmenes de agua distribuidos por CONAGUA,(2024 b) (ANEXO 1).

El modelo adoptado se expresa de la siguiente manera:

$$Y = e^{\beta_0} * e^{-\beta_1\left(\frac{1}{X_1}\right)} * e^{\beta_2 X_2} * e^{\beta_3 X_3} * e^{u}$$

Cuadro 12 Descripción de las variables del modelo exponencial estimado

Variable	Descripción
Y	Es la variable dependiente que representa el valor de la producción (millones de pesos MN)
e^{β_0}	Es un término de escala
$e^{-\beta_1\left(\frac{1}{X_1}\right)}$	Indica una relación exponencial decreciente entre Y y X_1 si $\beta_1 > 0$
$e^{\beta_2 X_2}, e^{\beta_3 X_3}$	Son los efectos exponenciales lineales de las variables X_2 y X_3 que impactan de manera lineal en el logaritmo de
X_1	Representa el volumen de agua empleada en la producción agrícola (hm^3)
X_2	Es el rendimiento de la producción agrícola del DR 017(ton/ha)
X_3	Es el precio medio rural de los cultivos ($)
e^{u}	Representa el término de error multiplicativo

Este modelo sugiere que el valor de la producción agrícola está influenciado por el volumen de agua utilizada de forma decreciente, mientras que el rendimiento agrícola y el precio medio rural afectan el crecimiento de la producción de manera exponencial.

La formulación logarítmica del modelo es la siguiente:

$$\ln(Y) = \beta_0 - \beta_1\left(\frac{1}{X_1}\right) + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + u$$

El modelo muestra que el impacto del agua sobre la producción sigue una relación de tipo hiperbólico, ya que el término $\frac{1}{X_1}$ indica que a medida que la disponibilidad de agua aumenta, su efecto marginal sobre el valor de la producción disminuye. Esto es consistente con la teoría económica, que postula rendimientos marginales decrecientes del agua en la producción agrícola.

5.3.1 Resultados del modelo

El modelo de regresión presenta una estadística F con un valor p=0.0022, lo que indica que el modelo es estadísticamente significativo al 1%. El coeficiente de determinación R^2=0.89 sugiere que el 89% de la variabilidad del logaritmo natural del valor de la producción es explicado por las variables inverso del volumen de agua, rendimiento y precio medio rural.

Cuadro 13 Coeficientes del Modelo

Ln(Y)	Coeficientes	Error Estándar	t	P valor	Intervalo de confianza 95%	
$1/X_1$	-289.285	93.798	-3.08	0.005	-483.812	-94.759
X_2	0.070	0.021	3.32	0.003	0.026	0.114
X_3	0.001	0.000	9.88	0.000	0.001	0.001
Constante	3.595	0.686	5.24	0.000	2.171	5.018

Análisis de los resultados

Los resultados del cuadro 12 muestran que el volumen de agua tiene un impacto negativo sobre la producción cuando disminuye, con un coeficiente de -289.285, lo que sugiere que la escasez hídrica reduce significativamente el valor generado en la producción agrícola. Por otro lado, el rendimiento y el precio medio rural tienen efectos positivos y significativos, con coeficientes de 0.070 y 0.001, respectivamente, lo que confirma la importancia de mejorar la productividad y optimizar los precios de venta para maximizar los ingresos. Además, el modelo es estadísticamente sólido, ya que todos los coeficientes son significativos al 95% de confianza.

Estimación del producto marginal del agua

La relación entre el valor de la producción (Y) y el volumen de agua (X_1) está dada por la ecuación:

$$\ln(Y) = 3.595 + 289.285\left(\frac{1}{X_1}\right) + 0.070X_2 + 0.001X_3 + u$$

El cálculo de las elasticidades se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$E_{Y,X_1} = 289.285 * \frac{1}{X_1}$$

Las elasticidades se obtuvieron para cada año de 1998 a 2023 (Cuadro 14) y reflejan la sensibilidad del valor de la producción agrícola ante cambios en la cantidad de agua utilizada. La tendencia positiva observada indica que, en general, un mayor volumen de agua utilizada se asocia con un incremento en el valor de la producción.

El valor mínimo de las elasticidades es de 0.25 en 2011 sugiere que, durante ese año, cada metro cúbico de agua adicional generó un aumento relativamente bajo en el valor de la producción. Esto puede deberse a factores como condiciones climáticas adversas, menor eficiencia en el uso del agua o rendimientos decrecientes. Por otro lado, el valor máximo de 1.2/ en 2015 indica que, en ese año, el agua tuvo un impacto significativamente mayor en la producción agrícola. Esto podría estar relacionado con mejoras en la eficiencia del riego, mayores precios de los cultivos o condiciones agrícolas más favorables.

Productividad marginal del agua

Con base en las elasticidades se estimó la productividad marginal del agua para cada año expresado en precios constantes del año 2018. La fórmula empleada es la siguiente:

$$Pmg_{X_1} = 289.285 \frac{Y}{{X_1}^2}$$

La productividad marginal del agua se calculó para cada año como se muestra en el Cuadro 14. Durante el periodo 1998-2023**,** el valor promedio del agua fue de $0.98/m³. Esto indica en promedio, cada metro cúbico de agua aportó $0.98 al valor total de la producción. Este indicador es fundamental para evaluar la eficiencia en el uso del recurso hídrico y su contribución económica en el Distrito de Riego, permitiendo optimizar su gestión y asignación.

Cuadro 14 Elasticidades del agua suministrada-valor de la producción agrícola bajo riego del DDR017, 1998,-2023

Año	Volumen de agua (hm^3)	Valor de producción (millones de pesos MN)	Elasticidad	PMGA (MN/m^3)
1998	849	353.038474	0.34076801	0.14171393
1999	327	123.407173	0.88568446	0.33463498
2000	668	363.15898	0.43329025	0.23568259
2001	624	300.845007	0.46359978	0.22351267
2002	252	123.073373	1.14956525	0.56221735
2003	506	356.631562	0.57120082	0.40222616
2004	832	719.786759	0.34766794	0.30075027
2005	715	929.871924	0.40452424	0.52599924
2006	715	997.532893	0.40452422	0.56427287
2007	945	1158.76892	0.30605045	0.37519389
2008	944	1330.31718	0.30634363	0.43156457
2009	1,024	1380.46559	0.28257294	0.38103037
2010	1,100	1429.26856	0.26298709	0.34170835
2011	1,149	2377.55775	0.25187739	0.52141359
2012	957	2169.08023	0.30242751	0.68578991
2013	600	931.719594	0.482143	0.74870347
2014	796	1496.75947	0.36337632	0.68318474
2015	239	1642.65517	1.20979766	8.31083707
2016	800	2267.50043	0.36177897	1.02590443
2017	1,036	4538.38055	0.27923125	1.22321233
2018	1,050	4009.07838	0.27563839	1.05292357
2019	1,021	3633.92249	0.28334434	1.00850399
2020	944	3033.50507	0.30648101	0.98497399
2021	879	3820.85459	0.32921484	1.43150279
2022	959	4956.29099	0.30170725	1.55955672
2023	950	4882.65925	0.30454822	1.56545806

Nota PGMA es la productividad marginal del agua expresada en pesos MN por m^3

En general, estos valores muestran que la productividad del agua en la agricultura varía a lo largo del tiempo, dependiendo de factores económicos, tecnológicos y ambientales, lo que resalta la importancia de una gestión eficiente del recurso hídrico.

5.4. Discusión y alcance de los resultados

El cuadro 15 muestra los resultados de los tres modelos empleados para estimar el producto marginal del agua (PMg).

El modelo exponencial, aplicado al periodo 1998-2023, muestra que, en promedio, cada metro cúbico adicional de agua en la producción agrícola genera un aumento de 0.98 $/m³ en el valor de la producción. En contraste, el método de programación lineal múltiple estima un producto marginal del agua ligeramente superior, alcanzando un valor de 1.01 $/m³. No obstante, es importante destacar que estos resultados son referentes al valor bruto de la producción agrícola, ya que no considera los costos de producción, y no se traduce en una ganancia neta para los productores.

El modelo cuadrático presenta una productividad marginal del agua de 0.4094 $/m³, es baja comparada con los modelos anteriores, pero es importante destacar que se está considerando los beneficios netos del productor, a diferencia de los modelos anteriores que solo consideran el valor de la producción, además este estudio se realiza solo para un ciclo agrícola especifico

Cuadro 15 Comparación de los resultados de los modelos

Modelos	Periodo de estudio	Variable dependiente	Variables independientes	Pmg agua ($/m³)
Modelo Lineal	1998-2023	Valor de la producción	Volumen de agua, rendimiento, precio medio rural	1.011
Modelo cuadrático	2021-2022	Beneficio Neto	Volumen de agua, volumen de agua al cuadrado	0.4094
Modelo exponencial	1998-2023	Valor de la producción	Volumen de agua, rendimiento, precio medio rural	0.98

Nota. Pmg es el producto marginal

Fuente: Elaboración propia

Contraste con Estudios Previos

El Cuadro 16 contextualiza los resultados obtenidos con estudios previos sobre la estimación del PMG en distintos períodos, metodologías empleadas, lo que permite contextualizar y contrastar los resultados obtenidos en el análisis actual.

El estudio de Montesillo-Cedillo (2023), a nivel nacional y con un modelo logarítmico hiperbólico, estima la productividad marginal del agua promedio en México de 1.11 $/m³ para el período 1980-2017, reflejando una elasticidad decreciente del agua en la producción agrícola.

En la Región Lagunera, Ramírez-Barraza et al. (2019), emplean un modelo de optimización lineal y obtienen la productividad marginal del agua de 1.56 $/m³ para sistemas de bombeo y 0.91 $/m³ para gravedad en 2015-2016, lo que sugiere que el agua utilizada en bombeo tiene un mayor impacto económico que la de gravedad. Por su parte, Godínez-Montoya et al. (2007) analizan la misma región con dos metodologías: un modelo cuadrático (2001-2002), que arroja valores más bajos (0.73 $/m³ para bombeo y 0.25 $/m³ para gravedad), y un modelo de optimización lineal, donde los resultados son aún menores (0.646 $/m³ para bombeo y 0.582 $/m³ para gravedad), sugiriendo un menor impacto económico del agua en ese período.

Cuadro 16 Comparación de Estimaciones del Producto Marginal del Agua en Diferentes Estudios

Autor	Modelo	Variables empleadas	Periodo de estudio	Pmg agua (m³)	Nivel
Montesillo-Cedillo (2023)	Exponencial	Dependiente: Valor de la producción Independiente: Volumen de agua	1980-2017	1.11	Nacional
Ramírez-Barraza et al. (2019)	Optimización Lineal	Dependiente: Beneficio Neto Independientes: Mano de obra, superficie, costos de producción	2015-2016	1.56 para bombeo y 0.91 para gravedad	Región Lagunera

Godínez-Montoya et al. (2007)	Cuadrático	Dependiente: Beneficio Neto Independiente: Volumen de agua	2001-2002	0.73 para bombeo y 0.25 para gravedad	Región Lagunera
	Optimización Lineal	Dependiente: Beneficio Neto Independientes: Mano de obra, superficie, costos de producción		0.646 para bombeo y de 0.582 para gravedad	

Nota. Pmg es el producto marginal

Fuente: Elaboración propia

Análisis Comparativo

El Modelo Lineal para el periodo 1998-2023, con el valor de la producción como variable dependiente, estima un producto marginal del agua (PMG) de 1.011 $/m³. Este resultado es comparable con el obtenido por Montesillo-Cedillo (2023), quien reporta un valor de 1.11 $/m³ a nivel nacional. Ambos estudios reflejan una relación positiva entre el volumen de agua utilizada y el valor de la producción agrícola. No obstante, la ligera diferencia entre ambas estimaciones podría explicarse por variaciones metodológicas o por particularidades locales, como diferencias en infraestructura, eficiencia del uso del agua o condiciones climáticas y económicas específicas del área de estudio.

El Modelo Cuadrático, aplicado al periodo 2021-2022 con el beneficio neto como variable dependiente, arroja un PMG de 0.4094 $/m³, un valor inferior a los reportados en el estudio de Godínez-Montoya et al. (2007). Esta discrepancia podría deberse a diversos factores, como cambios en la eficiencia del uso del agua, aumentos en los costos de producción o la presencia de rendimientos marginales decrecientes en la actividad agrícola. El resultado obtenido sugiere que, en los periodos más recientes, el impacto económico del agua en el beneficio neto de los productores ha disminuido, lo que podría estar relacionado con transformaciones en las condiciones del sector agrícola, mejoras en la eficiencia del riego o cambios en las dinámicas de mercado.

Finalmente, el Modelo Exponencial, también aplicado al periodo 1998-2023 con el valor de la producción como variable dependiente, estima un PMG de 0.98 $/m³. Este valor es similar al reportado por Montesillo-Cedillo (2023), aunque ligeramente inferior. La diferencia podría deberse a las particularidades metodológicas de cada estudio, así como a factores locales que influyen en la productividad del agua. Además, este resultado podría reflejar una elasticidad decreciente del agua en la producción agrícola, fenómeno que suele observarse cuando el recurso hídrico se encuentra en niveles de uso cercanos a la saturación o cuando los costos asociados a su utilización aumentan, reduciendo su impacto marginal en la producción.

6. CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como objetivo estimar el valor económico del agua en la agricultura a través del cálculo de su productividad marginal en el Distrito de Riego 017: Región Lagunera, una de las zonas agrícolas más relevantes del país en términos de consumo hídrico. A partir del uso de tres modelos econométricos —lineal, cuadrático y exponencial— se analizó cómo varía el impacto del agua en la producción y la rentabilidad agrícola bajo diferentes enfoques metodológicos y periodos de análisis.

Los resultados muestran que el modelo lineal, aplicado al periodo 1998–2023, arrojó una productividad marginal del agua de $1.011 por metro cúbico, mientras que el modelo exponencial, con el mismo periodo y variables, estimó un valor muy similar de $0.98 por metro cúbico. Ambos modelos consideran el valor bruto de la producción como variable dependiente, sin incluir los costos de producción, y reflejan una relación positiva y relativamente estable entre el volumen de agua utilizada y el incremento económico generado.

En contraste, el modelo cuadrático, aplicado específicamente al ciclo agrícola 2021–2022, estimó una productividad marginal del agua de $0.4094 por metro cúbico. Este valor considerablemente menor se explica porque este modelo incorpora como variable dependiente el beneficio neto —es decir, considera los costos de producción—, además de incluir un término cuadrático que permite capturar posibles rendimientos decrecientes. Esta aproximación permite valorar el agua no solo como un insumo productivo, sino también desde la lógica de la rentabilidad para los productores.

En conjunto, los resultados destacan que el agua tiene un valor económico significativo en la agricultura del DR 017: Región Lagunera, aunque este valor varía sustancialmente según el enfoque utilizado. Mientras los modelos basados en la producción bruta son útiles para estimaciones sectoriales y análisis de largo plazo, el modelo centrado en el beneficio neto ofrece una perspectiva más realista desde el punto de vista del productor, al tomar en cuenta los costos asociados al uso del recurso. Esto evidencia que los incrementos en el uso del agua no siempre se traducen en mayores beneficios económicos, sobre todo cuando se supera un umbral de eficiencia.

En general, los resultados del modelo lineal y exponencial del Distrito de Riego son consistentes con los estudios previos, lo que indica que, la relación entre la cantidad de agua empleada y la producción agrícola sigue una tendencia similar a la del nivel nacional. No obstante, el modelo cuadrático del mismo Distrito presenta una productividad marginal del agua (PMG) más baja en el período 2021-2022. Esto se debe a que dicho modelo está expresado en términos del beneficio neto de la producción, reflejando la ganancia real, a diferencia de los modelos anteriores, que se basan en el valor total de la producción.

Al comparar los resultados con Montesillo-Cedillo (2023), se observa que el PMG estimado en este estudio es ligeramente inferior al promedio nacional. Mientras que Montesillo-Cedillo reporta un PMG de 1.11 $/m³ para 1980-2017, el presente estudio estima 0.98 $/m³ con el modelo exponencial y 1.01 $/m³ con programación lineal múltiple para 1998-2023.

Esta discrepancia puede atribuirse a:

- Diferencias en los periodos de estudio.
- Factores específicos del Distrito de Riego 017, como infraestructura y condiciones agroclimáticas.
- Cambios en la disponibilidad de agua y en los precios agrícolas a lo largo del tiempo.
- Variables independientes diferentes

La variabilidad en el PMG según la metodología y el contexto sugiere que la eficiencia del uso del agua en la agricultura está sujeta a condiciones económicas y tecnológicas cambiantes, lo que destaca la importancia de políticas públicas orientadas a optimizar el manejo del recurso hídrico en la región.

Para garantizar un uso eficiente y sostenible del agua en la producción agrícola, se recomienda fomentar prácticas de riego eficiente y tecnologías avanzadas, minimizando pérdidas y optimizando la productividad del recurso. Asimismo, es fundamental incluir costos de producción en futuros estudios para evaluar con mayor precisión la rentabilidad neta del uso del agua. La diversificación de cultivos hacia opciones más rentables y de menor consumo hídrico contribuirá a mejorar la eficiencia del recurso, alineándose con las condiciones del mercado. Además, es crucial monitorear factores macroeconómicos como la

inflación y las variaciones en los precios agrícolas para ajustar estrategias de producción de manera adecuada. Finalmente, la implementación de políticas gubernamentales y la cooperación entre productores permitirán una distribución equitativa y sostenible del agua a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

Agua.org (2024). *Visión general del agua en México* https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/

Arrojo Agudo, P. (1999). El valor económico del agua. *Revista CIDOB d'Afers Internacionals*, (45-46), 145-167. https://www.jstor.org/stable/40586154

Abu-Madi, M. (2004). *Valoración económica del agua para uso agrícola. Su aplicación en Palestina* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. Dialnet. Recuperado de https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=168450

Canedo, F. (2023). Con arsénico, agua en región de La Laguna. *El Siglo de Durango*. https://www.elsiglodedurango.com.mx/noticia/2023/con-arsenico-agua-en-region-de-la-laguna.html

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. Recuperado de https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacional-hidrico-2019-2024-190499

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024 a*). Estadísticas del Agua en México 2023.* Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024 b). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego*. https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-riego

De Brito, P. L. C., & de Azevedo, J. P. S. (2022). Economic value of water for irrigation in São Francisco River Basin, Brazil. *Applied Water Science, 12*(7), 155. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01678-4

EOS Data Analytics. (2024). *Usos del Agua en la Agricultura: Métodos y Tecnologías.* https://eos.com/es/blog/uso-del-agua-en-agricultura/

Economipedia. (2020). *Productividad marginal - Definición, qué es y concepto*. Recuperado de https://economipedia.com/definiciones/productividad-marginal.html

Esparza, H. (2024, December 19). ¿Por qué habrá menos agua para riego en la Comarca Lagunera? *El Heraldo de México*. https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2024/12/19/por-que-habra-menos-agua-para-riego-en-la-comarca-lagunera-662800.html

Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (n.d.). *Sistemas de Costos agrícolas.* Retrieved March 8, 2025, from https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/TemasUsuario.jsp

Fonseca, C. (1998). El valor económico del agua. *Contexto 1,* 34-38. https://revistas.uexternado.edu.co/index.php/contexto/article/view/1681

García, M. A., Hernández, J. A., & Gómez, M. A. (2013). Valor económico del agua en el distrito de riego 044, Jilotepec, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(2), 193-206. Recuperado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-54722013000200001&script=sci_arttext

Global Water Partnership. (2008). *Aspectos económicos en la gestión sostenible del agua.* https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/sobre-girh/manual-cap-net-marzo-2008esp.pdf

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*, *1*(25), 51–59. https://www.redalyc.org/pdf/573/57311513007.pdf

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)(2016). *Metodología para uso de agua en actividades agrícolas.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (2024). *La gestión del agua no es una prioridad en México*. Recuperado de https://imco.org.mx/la-gestion-del-agua-no-es-una-prioridad-en-mexico/

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. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA, 39*. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.544¿

MILENIO. (2019, June 25). *¿Por qué se llama Comarca Lagunera y qué estados la conforman?* https://www.milenio.com/estados/la-comarca-lagunera-por-que-se-llama-asi

Montesillo-Cedillo, J. L. (2023). Valor del agua en la producción agrícola bajo riego en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14*(8), e2715. https://doi.org/10.29312/remexca.v14i8.2715

Nouri-Khajebelagh, R., Khaledian, M., & Kavoosi-Kalashami, M. (2021). Economic value of irrigation water for major crops in the Ardabil plain, Iran*. *Irrigation and Drainage, 70*(5), 1359–1367. https://doi.org/10.1002/ird.2619

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2003). *Descubrir el Potencial del Agua para la Agricultura*. https://www.fao.org/4/y4525s/y4525s00.htm#Contents

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2021). *Valorar el agua para la economía.* https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es/valorar-el-agua-para-la-economia

Rábago, I. (2021). *Distrito de Riego 017, uno de los más importantes a nivel nacional.* Milenio. https://www.milenio.com/estados/distrito-riego-017-importantes-nivel-nacional

Ríos Flores, J. L., Torres Moreno, M., Castro Franco, R., Torres Moreno, M. A., & Ruiz Torres, J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, *47*(1). https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382841103007

SADER-COAHUILA. (2023). *Costos de producción agrícola en Coahuila*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Delegación Coahuila.

Sous la direction de Frédéric Apollin. (2015.). *Eficiencia y eficacia económica del uso del agua agrícola para la agricultura familiar*. Recuperado de https://www.avsf.org/es/publications/eficiencia-y-eficacia-economica-del-uso-del-agua-agricola-para-la-agricultura-familiar/

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. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722013000200001

ANEXOS

ANEXO 1

Cuadro 17 Datos de producción agrícola y agua del DR 017 1998-2023

Año	Volumen de agua (hm^3)	Valor de la producción (millones de pesos MN)	Sembrada (has)	Cosechada (has)	Rendimiento (ton/ha)	Producción (ton)	Precio medio rural ($/ton)
1998	849	353.038474	49372	48823	19.335682	944026	373.971134
1999	327	123.407173	21028	20830	27.1516083	565568	218.200416
2000	668	363.15898	40588	39968	28.1579263	1125416	322.688659
2001	624	300.845007	32639	32378	29.0736883	941347.88	319.589616
2002	252	123.073373	12378	12287	25.2912875	310754.05	396.047528
2003	506	356.631562	30685	30541	27.3527422	835380.1	426.909334
2004	832	719.786759	47668	47603.97	25.8314084	1229677.59	585.345919
2005	715	929.871924	52192	52192	23.594093	1231422.9	755.119889
2006	715	997.532893	50572	50572	24.088195	1218188.2	818.865995
2007	945	1158.76892	66599	66599	29.251989	1948153.21	594.80379
2008	944	1330.31718	57683	57683	34.1166912	1967953.1	675.990285
2009	1,024	1380.46559	69820	69820	33.0151714	2305119.27	598.869484
2010	1,100	1429.26856	71572.9	71572.9	26.0475848	1864301.18	766.651103
2011	1,149	2377.55775	71964.1	71944.1	28.1376979	2024341.35	1174.4846
2012	957	2169.08023	57653.8	57653.8	32.8570275	1894332.49	1145.0367
2013	600	931.719594	31720.8	31720.8	34.3519904	1089672.62	855.045432
2014	796	1496.75947	47845.49	47845.49	31.1904387	1492321.82	1002.97365
2015	239	1642.65517	48385.71	48385.71	26.2738213	1271277.5	1292.12951
2016	800	2267.50043	49834.84	49834.83	30.9175086	1540768.79	1471.6682
2017	1,036	4538.38055	64173	64173	31.3230157	2010091.88	2257.79756
2018	1,050	4009.07838	65611.9	65611.9	29.9249565	1963433.25	2041.87149
2019	1,021	3633.92249	64334.08	64334.08	30.7868315	1980642.48	1834.71905
2020	944	3033.50507	55240.18	55240.18	31.5418037	1742374.91	1741.01742
2021	879	3820.85459	55380.05	55379.99	34.5568055	1913755.54	1996.52176
2022	959	4956.29099	56738.01	56738.01	30.9359741	1755245.61	2823.70226
2023	950	4882.65925	57061.3133	57061.3133	25.8851674	1477041.65	3305.70181

Fuente: CONAGUA (2024)

ANEXO 2

Cuadro 18 Datos de producción agrícola y agua del DR 017 2021-2022

Cultivo	Superficie (ha)	Lámina de riego m^3	Volumen total m^3	Precio $/ton	Rendimiento medio (ton/ha)	Ingreso $/ha	Costos de producción* $/ha	Beneficio (i-c)$/ha	Beneficio Neto $
Alfalfa	5,157	11,778	60,739,146.00	1,920	35.0	67,200.00	$50,000.00	17,200.00	88700400.00
Cacahuate	200	10,125	2,025,000.00	48,000	0.8	38,400.00	$25,000.00	13,400.00	2680000.00
Algodón:	11255.68	16,328	183,782,743.04	12,500	5.0	62,500.00	57000	5,500.00	61906240.00
Sorgo forrajero	16,307	17,228	280,936,134.60	1,050	50.0	52,481.83	$27,000.00	25,481.83	415530927.00
Maíz Forrajero	13,985	16,464	230,257,107.36	1,200	45.0	54,000.00	$27,000.00	27,000.00	377608230.00
Melón	888	23,624	20,972,914.72	3,876	42.0	162,794.47	$50,000.00	112,794.47	100136675.00
Sandía	271	23,264	6,294,075.20	3,000	55.0	165,000.00	$40,000.00	125,000.00	33818750.00
Jitomate (tomate rojo)	50	26,551	1,327,550.00	11,000	45.0	495,000.00	$27,990.00	467,010.00	23350500.00
Chile	133	16,037	2,132,921.00	4,628	26.3	121,868.28	$25,300.00	96,568.28	12843581.83
Maíz Grano	531	11,119	5,900,853.30	5,665	4.3	24,214.96	$24,100.00	114.96	61007.40
Sorgo Escobero	159	28,461.00	4,516,191.48	6,000	4.6	27,720.00	$27,000.00	720.00	114249.60
Nuez	7,726	16,408.00	126,764,270.08	90,000	1.6	144,000.00	$28,000.00	116,000.00	896188160.00
Frijol	10	11,100.00	111,000.00	25,000	2.0	50,000.00	$29,620.00	20,380.00	203800.00
Higo	55	10,320.00	567,600.00	26,300	5.3	139,363.03	$25,000.00	114,363.03	6289966.68
Vid	11	11,013.00	125,768.46	10,432	2.1	21,764.39	$28,000.00	-6,235.61	-71210.72

Fuente: SADER COAHUILA (2023)