



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUTO DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN

EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

SOCIOECONOMÍA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

ECONOMÍA

**ANÁLISIS MULTI OBJETIVO DE LA DISTRIBUCIÓN DE
AGUA EN EL SECTOR AGRÍCOLA DE LA COMARCA
LAGUNERA, MÉXICO**

LUIS JESÚS LOZANO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS


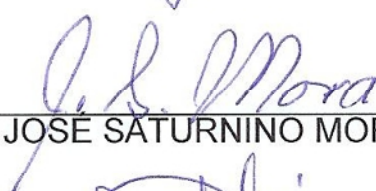
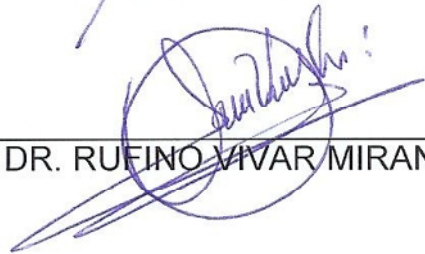
MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2012

La presente tesis titulada: **ANÁLISIS MULTIOBJETIVO DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EL SECTOR AGRÍCOLA DE LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO**. Realizada por el alumno: **LUÍS JESÚS LOZANO**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
SOCIOECONOMÍA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA.
ECONOMÍA.

CONSEJO PARTICULAR

Consejero	 _____ DR. JOSÉ ALBERTO GARCÍA SALAZAR
Asesor	 _____ DR. JOSÉ SATURNINO MORA FLORES
Asesor	 _____ DR. RUFINO VIVAR MIRANDA

Montecillo, Texcoco; Estado de México, Enero 2012.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), por el apoyo económico brindado para realizar mis estudios de Maestría.

Al Colegio de Postgraduados, en particular al Programa de Economía del Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, por la oportunidad que me otorgó de continuar con mi desarrollo académico, profesional y personal.

Al Dr. José Alberto García Salazar, por la confianza depositada en mí, por su excelente dirección y el valioso apoyo brindado en la realización de la presente.

Al Dr. José Saturnino Mora Flores, por sus acertadas correcciones que contribuyeron a enriquecer y mejorar el presente trabajo.

Al Dr. Rufino Vivar Miranda, por su valioso apoyo y atinadas sugerencias para la realización del presente.

A todos los profesores del Programa de Economía de quienes adquirí valiosos conocimientos que contribuyeron a mi desarrollo académico y profesional.

A mis compañeros de grupo, cuyos consejos y enseñanzas, han sido parte fundamental en el logro de mis metas. Así, agradezco también la amistad y compañerismo que surgió durante esta etapa y que seguramente trascenderá en el tiempo.

A todos, GRACIAS

"Basta un poco de espíritu aventurero para estar siempre satisfechos, pues en esta vida, gracias a Dios, nada sucede como deseábamos, como suponíamos, ni como teníamos previsto."

—Noel Clarasó—

DEDICATORIA

El presente trabajo, el cual representa la culminación de una meta profesional y personal, lo dedico especialmente:

A mis padres:

José Alfredo Jesús García

Florinda del Carmen Lozano Ferrer

Porque son el pilar de mi vida, por enseñarme a luchar y esforzarme siempre y porque gracias a su apoyo incondicional sigo adelante en la realización de mis sueños.

A mi pequeña:

Juliette Guadalupe

Cuando escucho tu voz, soy el hombre más feliz del mundo... es un soplo de vida que dibuja una sonrisa en mi rostro, el aliento que me vuelve la vida y la paz que me cubre de brillo como las estrellas al firmamento... *Je t'aime Julie*

A mi familia:

Gracias, primero a Dios por darme la vida y el amor mi familia que me ha apoyado en momentos difíciles y ha sonreído conmigo en los felices. A mis hermanos Ángel y José, a mis abuelitos, tíos y primos por ser una compañía incomparable. Y a todas aquellas personas que considero mi familia por darme su cariño y comprensión.

A mis amigos:

Por su amistad, apoyo y consejos que han sido parte elemental en mi desarrollo en todos los ámbitos. Gracias por compartir mis logros y aflicciones.

A todos los que confiaron en mí, y sobre todo gracias a Dios.

ÍNDICE

	Pág
RESUMEN.....	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivo.....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Metodología.....	3
1.6 Revisión de literatura.....	5
II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA COMARCA LAGUNERA.....	
LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA Y EL PROBLEMA DEL AGUA.....	11
2.1 Aspectos generales de la Comarca Lagunera.....	11
2.1.1 Ubicación geográfica, extensión territorial y división política.....	11
2.1.2 Fisiografía.....	12
2.1.3 Clima, precipitación y fenómenos hidrometeorológicos.....	12
2.1.4 Hidrología.....	13
2.1.4.1 Hidrología subterránea.....	13
2.1.4.2 Hidrología superficial.....	15
2.2 Aspectos demográficos de la región.....	16
2.2.1 Población.....	16
2.2.2 Población económicamente activa.....	17
2.2.3 Servicios públicos y marginalidad.....	19
2.3 Aspectos económicos de la Comarca Lagunera.....	21
2.3.1 PIB regional.....	21
2.3.2 Participación del sector agropecuario.....	22
2.4 Disponibilidad y consumo de agua por tipo de consumidor en.....	
la Comarca Lagunera.....	24
2.4.1 Oferta de agua en la Comarca Lagunera.....	24
2.4.2 Consumo de agua por tipo de consumidor.....	25
2.4.2.1 Sector agrícola.....	26
2.4.2.2 Sector pecuario.....	26
2.4.2.3 Sector residencial.....	26
2.4.2.4 Sector industrial.....	27
III. MARCO TEÓRICO.....	28
3.1 Teoría microeconómica.....	28
3.1.1 Teoría de la producción.....	28
3.1.2 Asignación eficiente en el sentido de Pareto.....	29
3.2 Programación lineal.....	30
3.2.1 Componentes del modelo de programación lineal.....	32
3.2.2 Supuestos del modelo de programación lineal.....	33
3.2.3 Formulación general de los problemas lineales.....	34
3.3 Programación multiobjetivo.....	36
3.3.1 Conceptos básicos en Programación Multiobjetivo.....	36
3.3.2 Métodos de las restricciones.....	39
3.3.3 Programación Compromiso.....	40

IV. FORMULACIÓN EMPÍRICA DEL MODELO.....	44
4.1 Modelo empírico de programación lineal.....	44
4.1.1 Función objetivo.....	45
4.1.2. Restricciones.....	48
4.1.3 Coeficientes técnicos.....	50
4.2 Modelos de programación multiobjetivo.....	52
4.2.1 Modelo empírico bajo el método de las restricciones.....	52
4.2.1.1 Modelo base bajo el método de las restricciones.....	52
4.2.1.2 Escenarios bajo el método de las restricciones.....	53
4.2.2 Modelo empírico de programación compromiso.....	53
4.2.2.1 Modelo base en programación compromiso.....	54
4.2.2.2 Escenario A.....	54
4.2.2.3 Escenario B.....	56
V. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	58
5.1 Modelo base en programación lineal.....	58
5.2 Programación multiobjetivo.....	60
5.2.1 Matriz de pagos.....	61
5.2.2 Método de las restricciones.....	62
5.2.2.1 Método de las restricciones aplicado al modelo base.....	62
5.2.2.2 Método de las restricciones aplicado al Escenario A.....	63
5.2.2.3 Método de las restricciones aplicado al Escenario B.....	64
5.2.3 Programación Compromiso.....	65
5.2.3.1 Modelo Base.....	66
5.2.3.2 Escenario A.....	68
5.2.3.3 Escenario B.....	71
5.3 Precios Sombra y eficiencia de riego.....	74
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	77

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág
2.1 Extensión territorial de la Comarca Lagunera.....	12
2.2 Condición de los acuíferos en la Región Lagunera.....	15
2.3 Cuencas hidrológicas en la Región Lagunera.....	15
2.4 Población según sexo en la Comarca Lagunera.....	17
2.5 Población Económicamente Activa por municipio en la Comarca Lagunera, 2000.....	18
2.6 Distribución de la Población Económicamente Activa por..... sector económico en la Comarca Lagunera, 2000.....	19
2.7 Infraestructura educativa en la Comarca Lagunera, 2003.....	20
2.8 PIB en la Comarca Lagunera 2008-2010, (miles de pesos a precios de 2008).....	22
2.9 Valor de la producción agropecuaria de la Comarca Lagunera,..... 2009 (Miles de pesos).....	23
2.10 Valor de la producción agrícola de la Comarca Lagunera,..... 2009 (miles de pesos).....	23
2.11 Valor de la producción pecuaria de la Comarca Lagunera,..... 2009 (miles de pesos).....	24
2.12 Presas de almacenamiento del Distrito de Riego 017.....	25
4.1 Cultivos seleccionados.....	45
4.2 Utilidad Neta en Riego por Gravedad.....	46
4.3 Utilidad Neta en Riego por Bombeo.....	47
4.4 Coeficientes técnicos.....	51
5.1 Resultados de modelo base con patrón actual de cultivos.....	59
5.2 Matrices de pago del escenario base y de los escenarios A y B.....	61
5.3 Resultados del modelo base bajo el método de las restricciones..... en la tecnología de riego por gravedad.....	62
5.4 Resultados del modelo base bajo el método de las restricciones..... en la tecnología de riego por bombeo.....	63
5.5 Resultados del Escenario A bajo el método de las restricciones..... en la tecnología de riego por gravedad.....	63
5.6 Resultados del Escenario A bajo el método de las restricciones..... en la tecnología de riego por bombeo.....	64
5.7 Resultados del Escenario B bajo el método de las restricciones..... en la tecnología de riego por gravedad.....	65
5.8 Resultados del Escenario B bajo el método de las restricciones..... en la tecnología de riego por bombeo.....	65
5.9 Resultados del modelo base en programación lineal..... y programación compromiso.....	66
5.10 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_1 del modelo base.....	67
5.11 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_2 del modelo base.....	68

5.12 Resultados obtenidos en el escenario A y diferencias con respecto..... al modelo base.....	69
5.13 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_1 del escenario A.....	70
5.14 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_i del escenario A.....	70
5.15 Resultados obtenidos en el escenario B y diferencias con respecto..... al modelo base.....	72
5.16 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_1 del escenario B.....	73
5.17 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_i del escenario B.....	74
5.18 Precio sombra y eficiencia de riego por tipo de tecnología..... en cada modelo evaluado.....	74

ANÁLISIS MULTIOBJETIVO DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN EL SECTOR AGRÍCOLA DE LA COMARCA LAGUNERA, MÉXICO

LUIS JESÚS LOZANO, M.C.
Colegio de Posgraduados, 2012

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar un patrón óptimo de cultivos en el sector agrícola de la Comarca Lagunera considerando de manera simultánea la maximización de la ganancia y la minimización del consumo de agua, dos criterios de optimización usualmente en conflicto. Se formularon dos modelos, uno de programación lineal para replicar el patrón actual de cultivos como base de referencia en el análisis comparativo, y un segundo modelo de programación compromiso que considera de manera simultánea los objetivos en conflicto. Los resultados indican que una estructura productiva más eficiente que la actual, debería considerar el aumento de la superficie de hortalizas ya que estos cultivos consumen sólo el 5% del recurso agua, pero aportan 21% del beneficio neto. Un aumento de 15% en la superficie de hortalizas disminuiría en 19.9% el consumo de agua y aumentaría la utilidad neta en 2.4%, en relación a los valores observados en el periodo de análisis, e incluso se promovería el desarrollo regional al aumentar la demanda de mano de obra. Debido a la escases de agua en la región, y a los problemas ambientales que origina la sobre-explotación del recurso, es recomendable promover la sustitución de cultivos.

Palabras clave: productividad del agua, programación lineal, programación compromiso

MULTIOBJECTIVE ANALYSIS OF THE WATER ALLOCATION IN THE AGRICULTURAL SECTOR OF THE LAGUNA REGION, MÉXICO

LUIS JESÚS LOZANO, M.C.
COLEGIO DE POSGRADUADOS, 2012

ABSTRACT

The objective of this study was to determine an optimal pattern of crops in the agricultural sector of the Laguna region considering simultaneously maximizing profit and minimizing the consumption of water, two optimization criteria usually in conflict. Two models were formulated, a linear programming model to replicate the current pattern of crops such as baseline in the comparative analysis, and a compromise programming model that considers simultaneously conflicting objectives. The results indicate that a production structure more efficient than the current should consider increasing the area under vegetables because these crops consume only 5% of water resources, but contribute 21% of net profit. A 15% increase in area under vegetables decrease water consumption in 19.9% and increase net income by 2.4% compared to the values observed in the period of analysis, and even promotes regional development by increasing the demand for labor. Due to the scarcity of water in the region, and environmental problems that causes the over-exploitation of the resource, it is advisable to promote crop substitution.

Keywords: water productivity, linear programming, compromise programming

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El agua es un recurso indispensable para el ser humano en una amplia gama de usos. Y, a pesar de que se le considera un recurso renovable las tasas actuales de explotación están ocasionando su escasez y, simultáneamente una intensa competencia entre los usuarios – sector agropecuario, industria y hogares-.

Durante mucho tiempo se consideró a los recursos hídricos como baratos y abundantes, sin embargo, aunque el agua cubre alrededor de 3/4 partes de la superficie del planeta el 97.5% es agua salada, la cual se encuentra principalmente en los océanos y mares; sólo el 2.5 por ciento de su volumen es dulce. Del volumen total de agua dulce el 30% se encuentra en depósitos subterráneos y solo el 0.4% es agua superficial y atmosférica, el resto se encuentra en forma de glaciares y permafrost (Shiklomanov y Rodda, 2003). Este limitado acceso al agua dulce junto con su intensivo uso en la agricultura y la industria, así como el crecimiento continuo de la población mundial -que ha pasado de 2,630 millones en 1950 a 6,671 millones en 2008- ha ocasionado presión sobre los recursos hídricos por lo cual cada vez son más escasos y, por tanto con un valor de uso creciente; esto supone un reto para la sociedad en su conjunto ya que este recurso es vital para cualquier forma de vida conocida por el ser humano y, a su vez indispensable para el desarrollo de las diversas actividades económicas practicadas por el hombre. Un dato significativo de esta presión es que mientras la población desde 1900 se ha multiplicado por cuatro, la extracción de agua se ha multiplicado por seis (UNESCO, 2006).

Actualmente, la agricultura es por mucho el principal usuario del agua. La agricultura de riego representa el 70% de las extracciones de agua, la cual puede incrementarse hasta el 80% en algunas regiones. A pesar del incremento de las economías industriales su uso representa sólo el 20% del uso total (incluye producción de energía); el uso doméstico tan solo presenta el 10% (UNESCO, 2009). La razón principal por la cual es la agricultura el mayor consumidor de recursos hídricos descansa en un simple hecho, la biomasa no puede ser producida sin agua. Mientras la demanda de alimentos siga en aumento debido al crecimiento poblacional, el consumo del agua en la agricultura se incrementará, pero esto a su vez provocará mayor competencia por el recurso entre los usuarios.

El uso, manejo y explotación del agua hoy en día es uno de los principales asuntos dentro de la agenda de los diversos gobiernos del planeta. La globalización ha permitido estrechar la interrelación entre los problemas socioeconómicos y ambientales del mundo, así, el

crecimiento acelerado de las llamadas economía emergentes ejerce presión en el resto de los países con un creciente poder adquisitivo y demanda de alimentos.

La demanda de alimentos no se puede disminuir, es indispensable el abasto de alimentos para la humanidad. Como principal consumidor de agua dulce, el sector agrícola se enfrenta a un reto crítico: producir más alimentos usando menos agua por unidad de producto y reduciendo sus impactos negativos en las reservas hidrológicas. Una mejor gestión del agua permite una producción más estable y una mayor productividad, lo que a su vez mejora los medios de subsistencia y reduce la vulnerabilidad de la población ante el cambio climático.

El agua, en este contexto, es un factor crítico para el desarrollo de las naciones, y quizá sea el recurso que define los límites del desarrollo sustentable, ya que no sólo es indispensable para el desarrollo económico y social de la humanidad, sino también para el funcionamiento de los ecosistemas del planeta. México, ante este panorama no es ajeno a esta problemática –es el noveno consumidor mundial de agua- y en la actualidad en ciertas regiones del país la escasez del recurso amenaza con limitar las actividades económicas, principalmente la agricultura, por lo cual es conveniente optar por medidas que permitan la sustentabilidad entre el consumo de agua y crecimiento económico.

1.2 Planteamiento del problema

Los contrastes regionales entre la disponibilidad del agua, la concentración de la población y la participación en la actividad económica son muy marcados, de hecho, el país se puede dividir en dos grandes zonas: la zona que comprende las regiones norte, centro y noroeste, donde se concentra el 77% de la población, se genera el 87% del PIB, pero únicamente ocurre el 31% del agua renovable; y la zona que comprende las regiones sur y sureste, donde habita el 23% de la población, se genera el 13% del PIB y ocurre el 69% del agua renovable (CNA, 2008). Debido a este contraste, ciertas regiones muestran mayor vulnerabilidad que otras con respecto a la disponibilidad del agua, situación que se acentúa con el transcurso del tiempo pues la disponibilidad natural media per cápita, que resulta de dividir el valor nacional entre el número de habitantes, ha disminuido de 18,035 m³/hab/año en 1950 a tan solo 4,416 en 2006 (CNA, 2007). Ante este escenario, de continua disminución de la disponibilidad de los recursos hídricos es importante tomar acciones preventivas o correctivas dirigidas hacia un uso sustentable de los recursos hidrológicos, sobretodo, en aquellas regiones donde la vulnerabilidad es mayor debido al limitado acceso del agua.

En México, el uso de agua predominante es el agrícola, ya que en la actualidad el 76.7% del agua extraída se utiliza para el riego de 6.3 millones de ha, le sigue el uso público-urbano con 14.1% y el sector industrial utiliza el 9.2%, incluyendo la producción de energía eléctrica, excepto hidroelectricidad (CNA, 2011). Sin embargo, en regiones como la Comarca Lagunera donde la precipitación es muy escasa -253 mm de precipitación media

anual- dado las condiciones geográficas, se encuentra en una zona semiárida con clima templado seco, y a pesar de las limitantes naturales para el acceso al agua, la región cuenta con una intensa actividad agrícola, lo cual solo es posible en su mayoría bajo esquemas de producción de riego, donde este sector consume el 92% del agua disponible. Para el año 2000, los niveles de extracción del recurso fueron de 1,357.24 Mm³ pero, la recarga de los acuíferos sólo es de 850.17 Mm³, lo cual genera un déficit de 507.07 Mm³ de agua para la región (Godínez, 2005).

El consumo de agua en la agricultura lagunera responde básicamente al crecimiento de la industria pecuaria en la región, así la mayor parte del agua de riego se destina a la producción de forrajes. Ambos sectores son importantes para la economía de la Comarca Lagunera, en el año 2008 el PIB regional del sector agropecuario representó el 8.85% del PIB total (El Siglo de Torreón, 2011), por lo cual es ilógico suponer que limitando la actividad agrícola será disminuido el consumo de agua, el problema es mucho más complejo y requiere de explotar nuevas áreas de oportunidad. Ante estos esquemas actuales del uso del agua se deben generar soluciones eficaces que permitan el uso y asignación óptima de los recursos hídricos.

De acuerdo con estudios recientes, en esta región el porcentaje del agua para usos consuntivos respecto a la disponibilidad total es mayor al 47%, por lo que se deduce que se ejerce una fuerte presión sobre el recurso hídrico. Los estudios técnicos muestran que se presenta una correspondencia negativa de la disponibilidad de agua, donde es mayor la extracción que la recarga. Muestreros y análisis del agua subterránea, realizados en diferentes fechas, revelan que durante las últimas décadas se ha deteriorado gradualmente su calidad. En gran medida, ello es debido a la sobreexplotación del acuífero, el cual muestra altas concentraciones de arsénico en las zonas urbanas (Soto y Gómez, 2009). Esta presión en los recursos hídricos no solo genera problemas al sector agrícola, sino también al resto de los usuarios, pero debido a que el mayor consumidor de agua es la agricultura, se considera como un factor clave en el desarrollo de alternativas sobre el uso y manejo del agua dentro de la Comarca Lagunera.

Así, bajo las circunstancias de escasez del recurso en la Comarca Lagunera existe una problemática compleja, ya que el recurso es vital no sólo para la población sino también para el crecimiento y desarrollo económico. De esta manera, es evidente que existe conflicto entre objetivos económicos y sociales respecto a la asignación de un recurso entre los usuarios; dentro de este panorama llegar a una solución a través de maximizar la prioridad de un objetivo sobre otro lleva consigo una interminable discusión para determinar cual objetivo se debe considerar relevante sobre los demás. El presente estudio tiene como objetivo principal determinar un patrón óptimo de cultivos donde, además de maximizar las utilidades de los productores se haga el menor uso posible del agua de riego para el desarrollo de las actividades consideradas dentro del mismo, dadas las condiciones tecnológicas actuales prevalecientes en la región.

1.3 Objetivos

- Determinar un patrón óptimo de cultivos donde se optimice el uso del agua para riego en la producción agrícola de la Región Lagunera.
- Proponer políticas que permitan una mejor planeación del patrón de cultivos en la Comarca Lagunera, para optimizar el uso del agua sin comprometer el crecimiento y desarrollo económico.

1.4 Hipótesis

Bajo los esquemas actuales de producción el sector agrícola en la Región Lagunera se hace un uso ineficiente del agua, por tanto, es necesaria la planeación de un nuevo esquema de cultivos que permita la asignación óptima del recurso dentro de las actividades agrícolas con lo cual se disminuye el consumo pero, sin limitar el crecimiento económico de la Comarca Lagunera.

1.5 Metodología

Con el propósito de conseguir los objetivos planteados y de probar la hipótesis expuesta anteriormente, el desarrollo del trabajo se sustentó bajo la metodología que a continuación se describe.

Se elaboró un modelo base donde se replica el patrón actual de cultivo y el uso de los recursos disponibles. En términos generales, el modelo de programación empleado consiste en la maximización de una función objetivo sujeta a conjunto de restricciones de disponibilidad de recursos (tierra, agua y mano de obra). Esta función maximiza la utilidad neta de los productores bajo las condiciones actuales; así mismo, se utiliza otra función donde se minimiza el consumo de agua bajo las mismas restricciones. Los datos utilizados para la elaboración de dicho modelo, corresponden al promedio de los años agrícolas 2007-2009 con respecto a las superficies sembradas, ingresos por actividad y costos de producción. En el caso de las láminas brutas de riego, la información para el riego de gravedad corresponde al promedio del periodo 2000-2002 y, para el riego por bombeo sólo se utilizó información del año 2002.

Una vez replicado el modelo base bajo el escenario en conflicto, se utiliza la programación multiobjetivo como herramienta de análisis. Para tal efecto, se utilizan dos métodos, el

primero llamado método de las restricciones que consiste en maximizar la función de utilidad neta sujeta a las mismas restricciones iniciales, pero además se considera una restricción adicional, la cual es la función de minimizar el consumo de agua. Los resultados obtenidos bajo este método muestran una serie de soluciones óptimas dentro de los valores que permite la restricción paramétrica sobre minimizar el consumo de agua dentro de las actividades seleccionadas. El segundo método, llamado programación compromiso utiliza ambas funciones objetivos para la obtención de un conjunto compromiso el cual representa la solución óptima, y minimiza la distancia que existe entre este conjunto y el punto ideal representado por los objetivos en conflicto.

Una vez obtenidos los resultados bajo las metodologías anteriormente descritas, se procedió a la formulación de escenarios donde se induce a una reconversión en la estructura productiva en el patrón de cultivos, se plantea la reducción de la superficie sembrada de forrajes y la ocupación de la misma por hortalizas. Se utiliza el mismo procedimiento que en el escenario base, pero esta vez son consideradas otras restricciones con el objeto de inducir al modelo hacia los objetivos perseguidos.

1.6 Revisión de literatura

En este apartado se exponen diversos estudios de casos a través del uso de la programación lineal y multiobjetivo, dirigidos a la optimización de las actividades desarrolladas por los productores agrícolas, así mismo, en algunos casos paralelamente se pretende lograr la maximización del beneficio neto en los productores a través de un grupo de actividades seleccionadas, pero minimizando el impacto ambiental provocado por la ejecución de dichas actividades.

La teoría de la programación lineal es una herramienta que se ha desarrollado para facilitar la búsqueda de soluciones óptimas al problema de elegir entre diversas formas alternativas de producción, donde se logre el uso más eficiente de los recursos empleados para tal efecto. En el caso de la agricultura, esta herramienta se utiliza para determinar patrones óptimos de cultivos tomando en cuenta la disponibilidad de los recursos o insumos de la producción. Ortega-Gaucin y otros (2009) plantearon en su trabajo la utilización de un modelo de programación lineal con enfoque analítico, es decir, que tuvo como objeto definir el patrón de cultivos y optimizar el sistema de almacenamiento utilizado para obtener el beneficio neto de los productores bajo diferentes escenarios de disponibilidad de agua. En este modelo se partió de la hipótesis de que es posible estimar la superficie regable y el patrón de cultivos óptimo del distrito de riego 005 de Delicias, Chihuahua ubicado en la zona centro-sur de dicho estado. El planteamiento del problema considera la maximización de una función de beneficio neto donde son incluidas las principales actividades realizadas en el distrito durante los últimos diez ciclos agrícolas. La información de precios, rendimientos y costos de producción corresponde al ciclo agrícola

1993-1994, el cual se seleccionó como año base, debido a que en ese ciclo se estableció un patrón de cultivos considerado como normal en toda la superficie del distrito. Con respecto a las restricciones se incluyeron aquellas relacionadas a la disponibilidad de los recursos que son fundamentales en el proceso productivo: la tierra y el agua. Además, con la finalidad de crear escenarios lo más cercano posible a la realidad, también se incluyen algunas restricciones que regulan la producción de cultivos. Los resultados generados por el modelo destacan los siguientes resultados, la superficie sembrada en el distrito donde se utilizaron los volúmenes de agua de riego concesionados y en el cual se aprovecharon al máximo los beneficios netos generados por el uso del agua fue de 70 459 ha, dicha superficie estimada fue inferior en 9643 ha a la superficie regable actualmente (80 102 ha), por lo que es conveniente establecer estrategias para que en el futuro la superficie excedente sea desincorporada. Finalmente, se recomienda la utilización de volúmenes de agua para riego entre 900 y 1100 hm³, considerando el agua de presas y pozos profundos en conjunto, y evitar la utilización de volúmenes después de 1100 hm³, ya que el beneficio generado comienza a disminuir de manera drástica. Por tal motivo, es útil guardar el volumen excedente para el siguiente año agrícola, con el propósito de que proporcione también una mayor utilidad.

El uso de la programación lineal en estudios de caso como el anterior es amplio y diverso, pero si se sujeta el problema objeto de estudio al concepto de agricultura sustentable se debe tomar en cuenta que se está tratando simultáneamente con diversos objetivos, tales como: la rentabilidad, el bienestar social y la conservación de los recursos naturales. Bajo esta premisa, a continuación son expuestos argumentos que demuestran la eficacia de la programación multiobjetivo en el análisis de sustentabilidad de las actividades agrícolas, así también, se muestran algunos artículos y trabajos desarrollados con el uso de esta técnica.

La toma de decisiones respecto a la formulación de políticas relativas al uso y conservación de los recursos naturales es multifacética y por ello hace difícil la evaluación económica de las posibles alternativas. Esta naturaleza multifacética en la elaboración de políticas sobre los recursos naturales dificulta especificar un solo criterio de decisión por el cual se pueda encontrar una solución óptima. A continuación se describen tres causas por las cuales cuando se trata de recursos ambientales se debe utilizar un enfoque multiobjetivo: a) primero, los recursos naturales antes que ser un insumo de la producción, son recursos que producen un flujo de insumos. Este flujo de insumos que proveen los recursos naturales es escaso y también es sujeto de considerarse sus posibles usos alternativos; b) segundo, cualquier uso o no uso de los recursos naturales puede ocasionar resultados buenos y malos. Por ejemplo, el uso de un recurso en la agricultura para producir alimentos, fibras y el ingreso de los productores también genera externalidades ambientales negativas. Pero, el no uso de los recursos implica menos disponibilidad de bienes producidos para el consumo y tal vez por ello una menor calidad de vida. Dentro de este contexto, el concepto de eficiencia económica frecuentemente utilizado para evaluar los proyectos del sector público es difícil de asimilar cuando no todos los resultados pueden ser evaluados en términos monetarios, y; c) tercero, existen muchos grupos de interés involucrados en la formulación e implementación de la política de uso de los recursos naturales. Los productores agrícolas e industriales en realidad hacen las decisiones de uso de los recursos. Los ambientalistas

desean una legislación para los recursos naturales que limite el uso y privilegie la conservación de los mismos. Los consumidores presionan su uso un menor costo de producción en los productos básicos. Y, los legisladores procuran el balance entre esas demandas y su permanencia mientras formulan las políticas (Robertson, 1998).

Con respecto a lo planteado en los párrafos anteriores, existen argumentos para un enfoque multicriterio más allá de las características de los problemas inherentes a una política dirigida al uso de los recursos naturales. Cohon (1978) señala tres ventajas de un enfoque múltiple: roles más apropiados para los analistas de las políticas y quienes las hacen durante el proceso de planeación y toma de decisiones; un amplio rango de alternativas es usualmente identificado bajo este análisis; y los modelos, así como la percepción de los analistas y tomadores de decisiones serán más realistas.

Fernández-Zamudio y Miguel (2006), presentaron un caso de estudio para el manejo sustentable de los cultivos leñosos en las tierras áridas del mediterráneo español. El objetivo general del trabajo fue determinar las posibilidades de continuidad en las actividades agrícolas relacionadas con el cultivo de la vid, el olivo y el almendro en las regiones mediterráneas áridas en España, siguiendo criterios de sostenibilidad. Para ello, fueron considerados objetivos de índole económica, social y ambiental, los cuales fueron maximizados para obtener planes de cultivos cercanos al ideal, a través de la programación compromiso. Los objetivos incluidos en este análisis fueron la maximización del beneficio neto en las actividades realizadas por los productores, la minimización del consumo de agua de riego y la minimización del total de mano de obra empleada. Para efectuar el análisis también fueron evaluadas dichas funciones en dos escenarios, relacionados con el grado de mecanización existente en las unidades de producción. Uno de los escenarios considera, baja mecanización en las actividades de recolección y cosecha, en este caso las actividades mayormente se realizan de manera manual. El segundo escenario, considera la existencia de tecnología para efectuar las mismas actividades y muy poca dependencia de la mano de obra. Las restricciones del modelo se relacionan con la disponibilidad máxima de agua para riego en cada unidad de producción agrícola, la superficie máxima para el desarrollo de cada una de las actividades seleccionadas y la disponibilidad de mano de obra para las actividades en las unidades de producción. También, dentro del mismo estudio son evaluados los valores del agua dentro del modelo, para tal efecto fueron estimadas las funciones de demanda del agua de riego aplicando la teoría de la utilidad multiatributo, una técnica que se utiliza para hacer simulaciones y estudiar el impacto de una hipotética política de precios, como la que propone la Directiva Europea del Sistema de Agua.

Respecto a la discusión de los resultados obtenidos en dicho estudio se puede destacar lo siguiente: en la primera parte son obtenidos patrones de cultivos a través de la programación compromiso y que son cercanos a los tres objetivos en conflicto planteados. En la evaluación de los escenarios descritos con anterioridad, sobresale el hecho de que la introducción de tecnología en las unidades de producción mejora considerablemente sus

utilidades, permite la introducción de mejores especies vegetales, disminuye la dependencia de mano de obra para ejecutar las actividades dentro de la unidad de producción, y con respecto al recurso agua, se demuestra que la agricultura de temporal es sustentable, pero que otros planes de cultivo bajo esquemas de riego son más rentables. En lo relativo a los resultados sobre el precio del agua se determina que a diferentes sectores de la curva de demanda se presenta un comportamiento muy inelástico, lo cual se justifica por el hecho de que el olivo, la vid y los almendros son especies leñosas que utilizan cantidades pequeñas de agua de riego con alta efectividad. El efecto de los precios del agua sobre el ingreso en las unidades de producción demuestra que es necesario un mayor grado de mecanización para contrarrestar los incrementos en los precios del agua de riego. El precio actual del agua es de 0.15 €/m³, y aunque podría incrementarse, para asegurar un ingreso mínimo de 21,500 € anuales por productor, el precio del agua no deberá exceder más de 0.24 €/m³ en las unidades con uso intensivo de mano de obra, o más de 0.44 €/m³ si estas son mecanizadas.

La versatilidad de la programación multiobjetivo para abordar los problemas que representa el efectuar las actividades agrícolas contra su impacto ambiental se extiende a diversos ámbitos, así para apoyar los procesos de ordenamiento territorial y otros tipos de planificación territorial, la FAO (2001) mediante el proyecto GCP/RLA/126/JPN ha elaborado una metodología que se apoya en varios métodos de análisis que cuentan con herramientas computacionales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la Evaluación de Tierras, la Programación Lineal y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process). A este sistema descrito se le denominó SIRTPLAN: Sistema de Información del Recurso Tierra para la Planificación del uso del suelo. Dicho sistema permite la generación de escenarios del uso de la tierra económicamente viable, socialmente aceptable, tecnológicamente implementable y ambientalmente sustentable, para áreas definidas, ya sea a nivel municipal, provincial o nacional, en donde se pretenda realizar algún tipo de planificación del uso de la tierra.

El objetivo general del SIRTPLAN es la generación y el manejo de la información de los recursos naturales y del contexto socioeconómico para el desarrollo agrícola sostenible. Este sistema permite la evaluación de condiciones físicas y socioeconómicas actuales y potenciales de un lugar geográfico determinado, a fin de elaborar proyecciones (o escenarios) de las alternativas de uso de la tierra. Además, consiste en componentes metodológicos y computacionales destinados a analizar los escenarios óptimos desde diferentes puntos de vista, a fin de lograr una decisión consensuada sobre la decisión final del ordenamiento territorial a implementar. Bajo este programa de la FAO fueron presentados los estudios de caso del Ordenamiento de la Microcuenca Arroio do Tigre: Santa Catarina, Brasil y, Escenarios para el Uso de la Tierra de la Comuna de Portezuelo: VIII Región, Chile. En ambos casos, se elaboró un estudio para evaluar la aptitud de las tierras y para generar escenarios para el uso óptimo de la tierra desde dos puntos de vista. Desde un punto de vista económico, que da importancia al margen bruto, y desde un punto de vista ambiental, que da mayor importancia a la reducción de erosión. Para lograr los objetivos planteados en el programa, se utilizó la programación lineal y la programación multiobjetivo como herramienta de análisis. Primero, fueron definidas las funciones objetivos por separado, una de ellas maximiza el beneficio neto y la otra minimiza la erosión generada por cada una de las actividades agrícolas. Las restricciones a las que se

sujetaron ambas funciones son disponibilidad de la tierra, de mano de obra, de capital y el impacto ambiental. Posteriormente, se uso el análisis multiobjetivo a través de la propuesta metodológica del método de las restricciones, donde es necesario definir qué objetivo se empleará como restricción y cuáles serán los valores a usar en el miembro derecho de la restricción. En este caso se utilizará la pérdida de suelo como restricción paramétrica.

La idea básica del Método de las Restricciones consiste en optimizar solo uno del total de objetivos considerados, siendo el resto incluido dentro del conjunto de restricciones. Con respecto a la selección del objetivo a optimizar, ella es arbitraria y no afecta a la generación de la solución eficiente (Willis y Perlack, 1980). Luego, por medio de variaciones paramétricas de los términos independientes de los objetivos incluidos como restricciones, se va generando el conjunto de soluciones eficientes (Marglin, 1967). Así, de esta manera bajo el uso de este método se elaboraron diversos escenarios para evaluar el impacto de las actividades sobre la erosión del suelo, y con ello se determinó un conjunto de soluciones óptimas que proponga los mejores usos alternativos de la tierra dentro de las microcuencas.

Lakshminarayan y otros en 1991, mediante un estudio denominado “Soluciones compromiso para decisiones económico-ambientales en la agricultura” muestran la utilidad de la programación compromiso como herramienta para la planificación agrícola considerando diversos criterios. Este trabajo centra su atención en la producción agrícola al menor costo posible contra el costo ambiental de realizar ciertas actividades agrícolas, se considera la pérdida de suelo y la sedimentación en los cuerpos de agua; todo dentro del contexto de una política dirigida a la cuenca del Corn Belt en Estados Unidos. El vector de objetivos incluye tres funciones de minimización: la primera minimiza el costo de producción, la segunda minimiza el valor futuro de la pérdida de productividad y la tercera minimiza el daño de la sedimentación. La solución obtenida bajo la programación compromiso no es la ideal pero, se generan soluciones eficientes dentro del subconjunto compromiso correspondiente a las métricas L_1 , L_2 y L_∞ . El modelo incluye restricciones de tierra, agua, mano de obra, capital y un programa de básicos dirigido a estimular la producción agrícola. También, son consideradas cuatro prácticas de conservación, tres métodos de labranza y varias rotaciones de cultivos. Las actividades seleccionadas son los cultivos de maíz, trigo, soya y heno; actividades que son representativas en el área de estudio correspondiente al este de Iowa y parte oeste de Illinois y Wisconsin.

La función que minimiza la pérdida de productividad, selecciona un conjunto de prácticas de manejo que minimizan la pérdida del valor presente neto del flujo de ingresos debido a los impactos en la productividad ocasionados por la pérdida de suelo. Respecto a la función que minimiza el daño de la sedimentación está compuesta por tres componentes, el primero llamado relación de distribución de sedimentos (RDS) se refiere a la relación de producción promedio anual de sedimento por unidad de área y el promedio anual de la pérdida potencial de suelo por unidad de área. El segundo componente es el la relación de transporte de sedimentos (RTS) y refleja la eficiencia agregada del transporte que cada flujo alcanza de la entrada de regiones río arriba y las salidas de otras regiones. Y el tercer elemento se refiere al costo por tonelada de sedimento. Finalmente, la función que

minimiza el costo de producción toma en cuenta los principales costos de producción incurridos en las actividades seleccionadas para la región objeto de estudio. La significancia económica de las soluciones obtenidas bajo este método es asociada con la optimización tradicional basada en las funciones de utilidad, así L_1 indica el valor de mayor eficiencia, mientras que L_∞ es la solución con mayor equidad o equilibrio (Ballesteros y Romero, 1991).

Ganoulis, *et al* (2003), en el artículo “Análisis de decisión multicriterio para evaluar el uso del agua en la agricultura: caso de estudio de Grecia”, presenta una tecnología adecuada para la evaluación de un mayor uso sustentable del agua de riego considerando aspectos económicos, técnicos, ambientales y sociales en el manejo de los recursos hídricos. Los criterios usados para evaluar la mejor solución posible incluyen factores económicos, como el costo inicial de los sistemas de irrigación, costos de mantenimiento y utilidad neta de los cultivos; los factores ambientales comprenden el volumen de agua utilizada, contaminación del agua durante y después del riego, y la eficiencia de uso del agua. Y, los factores sociales que incluyen el empleo de la mano de obra rural. La metodología empleada fue la Programación Compromiso. Fueron elaborados diversas alternativas o escenarios, donde se consideró la existencia de tecnologías de riego superficial, por aspersión y riego por goteo. También se contempló la existencia de escenarios referente a políticas de precios que va desde precios moderados hasta tarifas muy altas. Respecto al patrón de cultivos, existen dos alternativas posibles donde se evalúa el patrón actual de cultivos y otro donde se disminuye la superficie sembrada de algodón para sustituirla por frutales y hortalizas. Finalmente, se considera el uso de los fertilizantes químicos y también el uso fertilizantes orgánicos.

Considerando todos los escenarios, luego de un extensivo análisis de sensibilidad para los diferentes parámetros, se concluyó que la mejor política es una combinación del uso de sistemas de riego por goteo, cambios moderados en la actual política de precios del agua, mantener el actual patrón de cultivos y el uso de fertilizantes verdes. En resumen, el análisis de decisión multicriterio muestra que la mejor solución involucra un cambio moderado en la política de precios y refuerza la opción de un enfoque integrado.

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA COMARCA LAGUNERA, LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA Y EL PROBLEMA DEL AGUA

Es importante conocer el contexto bajo el cual se desarrolla el problema de estudio, ya que esto permite generar un enfoque en el cual de manera referencial se pueden identificar los factores clave que influyen en el problema de escasez del agua en esta región. El presente capítulo describe el entorno regional del objeto de estudio con énfasis en los factores geográficos, demográficos y económicos relacionados al desarrollo del trabajo de investigación.

2.1. Aspectos generales de la Comarca Lagunera

En este apartado son presentados los elementos generales que ofrecen un panorama de la región objeto de estudio.

2.1.1. Ubicación geográfica, extensión territorial y división política

La Comarca Lagunera se encuentra localizada en la parte norte-centro de México, entre los meridianos 102° 22' y 104° 47' longitud oeste, y los paralelos 24° 22' y 26° 23' latitud norte; colinda al norte con el Estado de Chihuahua y los municipios de Sierra Mojada y Cuatrociénegas del Estado de Coahuila, al oeste con los municipios de Indé y Villa Hidalgo del Estado de Durango, al sureste con Zacatecas y al este, con el municipio de Parras, Coahuila.

Su extensión territorial es de 47, 887.5 Km²; de los cuales 22,031.2 km² corresponden al Estado de Coahuila representando un 46% del total y 25,856.3 km², los cuales equivalen al 54% restante pertenecen al Estado de Durango; en conjunto, la superficie total de la región, representa 2.5% del territorio nacional. Su altura media sobre el nivel del mar es de 1,139 msnm (García, 2004).

La región comprende quince municipios, diez de los cuales pertenecen al Estado de Durango (Lerdo, Gómez Palacio, Mapimpí, Nazas, Rodeo, Tlahualillo de Zaragoza, General Simón Bolívar, San Juan de Guadalupe, San Luis del Cordero y San Pedro del Gallo) y cinco que pertenecen al Estado de Coahuila (Matamoros, San Pedro de las Colonias, Torreón, Viesca y Francisco I. Madero), (SAGARPA, 2009).

Cuadro 2.1 Extensión territorial de la Comarca Lagunera.

Municipio	Superficie (km ²)
Lerdo	1,868.8
Gómez Palacio	990.0
Mapimí	7,126.7
Nazas	2,412.8
Rodeo	1,854.9
Tlahualillo de Zaragoza	3,709.8
General Simón Bolívar	2,998.0
San Juan de Guadalupe	2,343.1
San Luis del Cordero	543.9
San Pedro del Gallo	2,008.3
Región Laguna Durango	25,856.3
Matamoros	1,003.7
San Pedro de las Colonias	9,942.4
Torreón	1,947.7
Francisco I. Madero	4,933.9
Viesca	4,203.5
Región Laguna Coahuila	22,031.2
Total Región Lagunera	47,887.5

Fuente: Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria Región Lagunera 2009.

2.1.2. Fisiografía

La Comarca Lagunera cuenta con formaciones montañosas al norte y sur, cuyas altitudes van de 2,800 a 3,700 msnm, lo cual da origen a una cuenca endorreica, es decir, sus escurrimientos no tienen salida al mar, formándose en otros tiempos lagunas, de ahí el origen del nombre de la región. En la actualidad todos los ríos, arroyos o escorrentías que daban origen a esas lagunas se canalizan para irrigar la superficie agrícola. La parte montañosa está formada por las provincias fisiográficas de la Sierra y Llanuras del Norte, dentro de la que se encuentra la subprovincia del Bolsón de Mapimí; la provincia Sierra Madre Oriental, que incluye las subprovincias de la Sierra de Paila y Sierras Transversales.

La región también comprende una superficie plana y de pendientes suaves, que varían de 0.20 a 1.0 metro por kilómetro, generalmente hacia el norte y noreste, donde se localizan tanto las áreas agrícolas como los centros de población (SAGARPA, 2002).

2.1.3 Clima, precipitación y fenómenos hidrometeorológicos

El clima, según la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, corresponde a BWhw, que se caracteriza por ser muy seco o desértico, semicálido con invierno fresco,

temperatura media anual entre 18 y 22 °C y la del mes más frío menor de 18 °C; con régimen de lluvias de verano, por lo menos 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el mes más seco, un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 de la total anual; muy extremoso, oscilación mayor de 14 °C; con una precipitación media de 250 mm y una evaporación potencial del orden de 2,500 mm anuales, es decir, diez veces mayor a la precipitación pluvial (CETENAL y UNAM, 1970).

De acuerdo con las características climatológicas de la región se presentan fenómenos hidrometeorológicos contrastantes como sequía e inundaciones que inciden directamente en el aprovechamiento del agua y afectan el desarrollo de las actividades agropecuarias.

Los periodos más críticos de sequías que se han presentado en los últimos 50 años son los ocurridos en el periodo 1948-1952, y en el periodo 1960-1964. Estos fenómenos ocurren con frecuencia cada 10 años y tienen una duración promedio de 4 años. La ocurrencia de este fenómeno ocasiona bajas captaciones en las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco; situación que repercute en la insuficiencia del recurso para riego dentro de la región.

En contraste, las corrientes de los ríos Nazas y Aguanaval generan problemas de inundaciones. Las avenidas del Nazas afectan poblaciones y áreas productivas de los municipios de Lerdo, Gómez Palacio, Torreón, Francisco I. Madero, San Pedro y Matamoros. Por su parte, el río Aguanaval es el más problemático en lo que a inundaciones se refiere, afecta principalmente a las poblaciones y áreas productivas de los municipios de San Juan de Guadalupe, Torreón, Matamoros y Viesca; es la parte baja de Matamoros la más vulnerable, por encontrarse en la planicie de inundación natural de este río (CNA, 2001).

2.1.4 Hidrología

En la Comarca Lagunera la presión sobre los recursos hídricos es creciente, esto ocasionado por las condiciones geográficas y climatológicas propias de la región, así también debido a la intensa actividad agropecuaria e industrial de la zona. A continuación se describen las principales fuentes de los recursos hídricos en la zona.

2.1.4.1. Hidrología subterránea

La Región Lagunera se ubica por razones administrativas en la Región Hidrológica-Administrativa VII Cuencas Centrales del Norte, la cual se localiza en la mesa del norte de la República; abarca los estados de Durango, Coahuila y Zacatecas. Las Regiones

Hidrológico-Administrativas fueron definidas conforme a la delimitación de las cuencas en el país y están constituidas por municipios completos. La Región Lagunera se integra al Distrito de Riego No. 17 de las Cuencas Centrales del Norte. Este distrito cubre una superficie total de 116 577 hectáreas (CNA, 2006).

El Acuífero Principal, que corresponde administrativamente a la Región Cuencas Centrales del Norte, Subregión Comarca Lagunera, es la fuente subterránea de mayor importancia en la región; forma parte de las 653 unidades hidrogeológicas o acuíferos registrados en todo el país y está incluido en los 102 que se encuentran sobreexplotados, ya que presenta un severo déficit de recarga (CNA, 2004). El acuífero principal es el que abarca la mayor superficie y es de gran importancia al estar representado por aproximadamente 2 000 pozos de uso agrícola; es la principal fuente de abastecimiento de agua doméstica para las ciudades de Torreón, Francisco I Madero y San Pedro en el estado de Coahuila; Gómez Palacio y Lerdo en Durango. Además, en el distrito de riego, el agua subterránea está distribuida en ocho acuíferos: cuatro están localizados en Durango, dos en Coahuila y dos más que abarcan ambos estados. El principal acuífero provee más de las tres cuartas partes del suministro de irrigación, y tres acuíferos proveen el 90% del suministro (Levine, 1998).

En relación al Acuífero Principal, CNA (2007) publicó el inventario contenido en el Cuadro 2.2, donde se muestra que el acuífero principal Región-Lagunera presenta una relación 1.79 que incorpora la relación extracción/recarga. En tal sentido, se observa que los acuíferos de la subregión hidrológica del río Aguanaval y del río Nazas se encuentran en condición geohidrológica de sobreexplotación. Este acuífero tiene una relación de extracción/recarga negativa que indica una fuerte presión y, ello genera la extracción de aguas con alta salinidad o con problemas de altas concentraciones de arsénico.

SEMARNAT-CNA (2004) mencionan que debido a la sobreexplotación del acuífero, sus niveles descendieron progresivamente en el curso de las últimas cinco décadas: durante el lapso 1941-2002 se registraron abatimientos de 30 a más de 120 m en las áreas donde se concentra el bombeo de los pozos. Los abatimientos mayores se registraron en los sectores de Francisco I Madero, Matamoros y Bermejillo, así como en la zona conurbada de Torreón, donde el ritmo actual de abatimiento es de 1.8 a 3 m por año. El principal efecto de la sobreexplotación, derivado del abatimiento de los niveles del agua, es el deterioro de la calidad del agua subterránea que repercute en el detrimento de la salud de la población y en las actividades pecuarias.

Cuadro 2.2 Condición de los acuíferos en la Región Lagunera.

Unidad Hidrológica	Extracción hm ³ /año	Recarga hm ³ /año	Relación extracción/recarga	Condición geohidrológica	Fenómeno de salinización y aguas salobres
Villa Juárez	63.1	100.7	0.63	Subexplotado	
Oriente Aguanaval	66.9	51.7	1.30	Sobreexplotado	
Nazas	47.7	113.6	0.42	Subexplotado	
Vicente Suárez	63.0	13.0	4.85	Sobreexplotado	
La Paila	40.9	35.7	1.15	Sobreexplotado	FSS
Hércules	8.0	8.0	1.00	Subexplotado	
Principal	930.9	518.9	1.79	Sobreexplotado	FSS
Acatita	6.0	15.0	0.40	Subexplotado	FSS
Las Delicias	11.0	12.0	0.92	Subexplotado	FSS

Fuente: Tomado de Soto y Gómez 2009.

2.1.4.2. Hidrología superficial

La fisiografía de la región da origen a cuencas endorreicas, de las cuales las más importantes por su dimensión e importancia para las actividades económicas son el río Nazas y Aguanaval. La Comarca Lagunera está ubicada en la región hidrológica 36 Nazas-Aguanaval, que integra las subregiones y cuencas hidrológicas que se muestran en el cuadro 2.3.

Cuadro 2.3 Cuencas hidrológicas en la Región Lagunera.

Clave	Región Hidrológica	Subregión	Cuenca hidrológica
36	Naza-Aguanaval	Nazas	Cañon de Fernández Agustín Melgar Salomé Acosta Sardinas Palmito
		Aguanaval	El Sauz Cazadero San Francisco La Flor
		Comarca Lagunera-Parras	Los Ángeles Laguna de Mayrán Bolsón Sur Laguna de Viesca

Fuente: Comisión Nacional del Agua. Lineamientos estratégicos de la región administrativa Cuencas Centrales del Norte. 1998.

Los ríos que generan los mayores escurrimientos son el Nazas y el Aguanaval, y sus principales afluentes son los ríos Santiago, Tepehuanes, de Ramos y de Sixtín del Oro para

el primero y los ríos Trujillo, de los Lazos y Saín el Alto, para el segundo. La cuenca de mayor captación en la región es la del Río Nazas, que aporta el 79.7% del escurrimiento medio anual de la Región Hidrológica arriba mencionada, con un volumen de 2,508 millones de m³ (CNA, 2001-2020). Este río comprende un área en la cuenca equivalente a 36,323 km², se forma a partir de la confluencia del Río Sixtín y del Río de Ramos. Se inicia en el Estado de Durango, hasta su desembocadura en la Laguna de Mayrán en el Estado de Coahuila, recorriendo una distancia total de 359 km. A lo largo de su cauce se encuentran las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco.

El Río Aguanaval por su parte, comprende un área en la cuenca equivalente a 25,532 km², nace en la unión de los Ríos Saín Alto y Trujillo en el Estado de Zacatecas, iniciando su recorrido a partir de la Presa El Cazadero, donde continua su recorrido a lo largo de 305 km pasando por el Estado de Durango, hasta desembocar en la Laguna de Viesca en el Estado de Coahuila (SAGARPA, 2002).

En general, el desarrollo de las actividades económicas de la región depende en gran medida del aprovechamiento del agua que se capta en las cuencas altas de los Ríos Nazas y Aguanaval, en donde la infraestructura hidráulica más importante es la Presa Lázaro Cárdenas con una capacidad de 3,336 Mm³ y la Presa Francisco Zarco, cuya capacidad corresponde a 438 Mm³.

2.2. Aspectos demográficos de la región

En este apartado se muestran las principales características de la población en la Región Lagunera, con el objetivo de conocer aspectos esenciales relacionados con la composición demográfica, y delimitar su relación hacia el objeto de estudio.

2.2.1. Población

Según datos estimados del Censo de Población y Vivienda 2010, la población total de la Comarca Lagunera para dicho año era de 1,488,508 habitantes en total, considerando la participación de los 15 municipios que conforman la región, Cuadro 2.4 . El 88.58% de la población se encuentra concentrado en solo cinco localidades de la región (Lerdo, Gómez Palacio, Matamoros, San Pedro de las Colonias y Torreón), mientras el 11.42% de la población se dispersa entre los 10 municipios restantes (INEGI, 2010). Con respecto a la población nacional, la población total de la Comarca Lagunera en el año 2010 representa el 1.32%, mientras que en el año 2000 la proporción fue de 1.27%. El crecimiento absoluto de

la población durante el periodo 2000-2010 fue de 239,066 habitantes, lo cual implica que la tasa de crecimiento de la población durante este periodo sea de 1.8% anual.

Cuadro 2.4 Población según sexo en la Comarca Lagunera.

Municipio	Total	Hombres	Mujeres
Lerdo	141,043	69,737	71,306
Gómez Palacio	327,985	161,736	166,249
Mapimí	25,137	12,549	12,588
Nazas	12,411	6,162	6,249
Rodeo	12,788	6,402	6,386
Tlahualillo de Zaragoza	22,244	11,137	11,107
General Simón Bolívar	10,629	5,290	5,339
San Juan de Guadalupe	5,947	2,930	3,017
San Luis del Cordero	2,181	1,112	1,069
San Pedro del Gallo	1,709	875	834
Laguna Durango	562,074	277,930	284,144
Matamoros	107,160	53,353	53,807
San Pedro de las Colonias	102,650	51,393	51,257
Torreón	639,629	312,135	327,494
Francisco I. Madero	55,676	27,739	27,937
Viesca	21,319	10,762	10,557
Laguna Coahuila	926,434	455,382	471,052
Total Región Laguna	1,488,508	733,312	755,196

Fuente: Elaboración propia, con datos del Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

De acuerdo con las tendencias del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2000), la población total de la Comarca Lagunera proyectada al año 2025 crecerá a 1,511,434 habitantes, de lo que se puede deducir que del 2000 al 2025 la población crecerá aproximadamente 17%, mientras que la población en el ámbito nacional crecerá en 20%, aproximadamente.

2.2.2. Población económicamente activa

En la Comarca Lagunera la población económicamente activa (PEA) para el año 2000 asciende a 445,590 personas, lo cual equivale al 35.6% de la población total en el mismo año. Los municipios donde se concentra la mayor actividad económica son Torreón, Gómez Palacio, Lerdo y Matamoros, a los cuales corresponde el 77.2% de la PEA en la región (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5 Población Económicamente Activa por municipio en la Comarca Lagunera, 2000.

Municipio	Total	Hombres	Mujeres
Lerdo	38,367	27,077	11,290
Gómez Palacio	99,819	68,168	31,651
Mapimí	6,203	4,574	1,629
Nazas	3,168	2,486	682
Rodeo	2,991	2,237	754
Tlahualillo de Zaragoza	5,830	4,131	1,699
General Simón Bolívar	2,366	1,916	450
San Juan de Guadalupe	1,470	1,237	233
San Luis del Cordero	408	322	86
San Pedro del Gallo	565	488	77
Laguna Durango	161,187	112,636	48,551
Matamoros	31,904	22,745	9,159
San Pedro de las Colonias	26,160	18,711	7,449
Torreón	205,843	134,478	71,365
Francisco I. Madero	14,983	10,898	4,085
Viesca	5,513	4,237	1,276
Laguna Coahuila	284,403	191,069	93,334
Total Región Laguna	445,590	303,705	141,885

Fuente: Elaboración propia, con datos del XII Censo de Población y Vivienda 2000. (INEGI, 2002).

La ubicación de la PEA por sector económico está en función de la distribución de la población rural y urbana. Así, en los municipios de Simón Bolívar, San Juan de Guadalupe, San Luis del Cordero y San Pedro del Gallo, donde la población rural presenta una fuerte presencia en el total, se encuentran los mayores porcentajes de la PEA ocupada en el sector primario; a diferencia del resto de las localidades donde debido al grado de urbanización, la PEA mayormente se emplea en los sectores secundarios y terciarios (Cuadro 2.6).

En conjunto para la región el sector terciario, que está integrado por el comercio, gobierno y otros servicios, ocupa el 51% de la PEA; le sigue en orden de importancia el sector secundario, compuesto por la minería, extracción de petróleo y gas, industria manufacturera, electricidad, construcción y agua, cuya ocupación de la PEA asciende al 37.9% del total. Por último, se encuentra el sector primario, el cual comprende la agricultura, ganadería, silvicultura, caza y pesca, ocupa solo el 8.3% de la población económicamente activa de la región (Cuadro 2.6).

Cuadro 2.6 Distribución de la Población Económicamente Activa por sector económico en la Comarca Lagunera, 2000.

Municipio	Sector primario	Sector secundario	Sector terciario	No especificado
Lerdo	11.6	40.1	45.3	3.0
Gómez Palacio	7.4	41.9	50.1	0.6
Mapimí	28.5	33.1	35.6	2.8
Nazas	38.8	20.6	39.1	1.5
Rodeo	35.9	20.8	41.3	2.0
Tlahualillo de Zaragoza	24.7	37.6	35.6	2.1
General Simón Bolívar	45.8	29.4	22.9	1.9
San Juan de Guadalupe	45.5	24.2	25.2	5.0
San Luis del Cordero	40.7	19.0	37.3	3.0
San Pedro del Gallo	63.4	10.7	25.3	0.6
Laguna Durango	12.2	39.7	45.5	2.7
Matamoros	14.9	46.1	36.9	2.0
San Pedro de las Colonias	17.2	40.9	40.6	1.3
Torreón	1.8	34.3	60.5	3.3
Francisco I. Madero	17.8	41.6	38.6	2.0
Viesca	31.0	46.7	20.6	1.8
Laguna Coahuila	6.1	36.9	54.1	2.9
Total Región Laguna	8.3	37.9	51.0	2.8

Fuente: Elaboración propia, con datos del XII Censo de Población y Vivienda 2000. (INEGI, 2002).

2.2.3 Servicios públicos y marginalidad

La Comarca Lagunera cuenta con una amplia infraestructura de servicios educativos y salud. Destacan, en cuanto a educación se refiere, la existencia de instituciones educativas de nivel superior como la Universidad Autónoma de Coahuila, la Universidad Iberoamericana, el Campus Laguna del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, la Unidad Laguna de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, el Instituto Tecnológico de la Laguna, la Unidad Laguna de la Universidad Autónoma del Noreste, la Unidad Regional de zonas Áridas de la Universidad Autónoma de Chapingo y la Unidad Gómez Palacio de la Universidad Juárez del Estado de Durango. De igual manera existen en la región diversas instituciones de todos los niveles de educación (Cuadro 2.7).

Cuadro 2.7 Infraestructura educativa en la Comarca Lagunera, 2003.

Tipo de institución	Número
Preescolar	593
Escuelas Primarias	894
Escuelas Secundarias	98
Escuelas Secundarias Técnicas	57
Bachillerato General	71
Bachillerato Técnico	20
Escuelas Profesionales Técnicas	27
Universidades e Instituciones de Educación Superior	21
Centros de Investigación	2
Centros de Investigación Universitarios	21
Total de Instituciones Educativas	1,504

Fuente: Elaboración propia con base en información de la Secretaria de Planeación y Desarrollo del Gobierno del Estado de Coahuila, 2003-2004.

Es notable que la Comarca Lagunera cuenta con una importante infraestructura en cuanto a servicios de educación se refiere, gracias a ello de la población de 6 años y más es alfabeta en un 94.5%, y tan sólo 5.4 es analfabeta.

En lo relativo los servicios de salud, la región cuenta con una importante cobertura médica, ya que el 63.1% de la población tiene acceso a servicios de salud, ya sea en instituciones públicas y privadas (INEGI, 2002^a e INEGI, 2002b). Se destaca también la calidad de los servicios de salud prestados en la región, ya que se le considera como uno de los centros de especialidades más relevantes del norte del país, debido a que en ella se encuentra un número importante de especialistas en diversas áreas, ubicándose como centro de atención médica para las áreas de Durango, Zacatecas, sur de Chihuahua y oeste de Coahuila.

Según datos de la CONAPO (2000), la mayoría de los municipios de la Región Lagunera se pueden definir de marginalidad “muy baja”; solo los municipios de Viesca, General Simón Bolívar, Mapimí, Nazas, San Luís del Cordero y San Pedro del Gallo tienen un grado de marginación “medio” y, San Juan de Guadalupe tiene un status de “alto”. En cuanto a los servicios en las viviendas, los principales índices de rezago se encuentran en el servicio de alcantarillado, siendo los municipios de Nazas, Rodeo, Mapimí, San Pedro del Gallo, General Simón Bolívar y San Juan de Guadalupe los que presentan mayor incidencia del problema.

2.3 Aspectos económicos de la Comarca Lagunera

En este apartado se presenta información referente al contexto económico de la Región Lagunera, con el objeto de presentar la participación y el comportamiento de los diferentes actores económicos en la dinámica de la economía regional.

2.3.1 PIB regional

Históricamente el desarrollo de la economía de la región hasta principios de los años 60's estuvo estrechamente ligado al cultivo del algodón, con lo cual se sentó las bases del desarrollo industrial y comercial de la zona. Sin embargo, con la aparición de las fibras sintéticas los precios internacionales del algodón empezaron a caer y con ello la región se vio inmersa en una importante crisis. Así, el enfoque del desarrollo sectorial se diversificó hacia otras actividades económicas lo que trajo consigo el crecimiento paulatino de la producción pecuaria, principalmente la agroindustria lechera, y la reconfiguración del patrón de cultivos, ya que a la par del crecimiento del hato ganadero también creció la demanda de forrajes para su alimentación. La industria, por su parte, tuvo grandes estímulos en la década de los 90's, ya que con la firma del Tratado de Libre Comercio con América del Norte (TLCAN) se instalaron plantas de manufactura relacionadas a industrias clave, y tal es su importancia en la economía de la región que hoy en día es la segunda fuente de ocupación de la PEA regional.

Actualmente, según datos reportados por El Siglo de Torreón (2010) la economía nacional tuvo una variación positiva de 5.0% en el año 2010 respecto al 2009; sin embargo, la dinámica de la economía regional permitió superar la tasa de crecimiento nacional al ubicarse en 6.22% dentro del mismo periodo de referencia. La participación en el PIB regional entre los diversos sectores económicos, en orden de importancia, se distribuye de la siguiente manera: el sector comercio y servicios aportó el 50% del total, la industria aportó el 41.3% y finalmente el sector agropecuario participó con el 8.8% (Cuadro 2.8).

Cuadro 2.8 PIB en la Comarca Lagunera 2008-2010, (miles de pesos a precios de 2008).

PIB	2008	2009	2010	Variación (%)
Nacional	8,487,137,134	7,315,288,659	7,374,514,591	5.00
Comarca Lagunera	128,843,485	110,373,641	112,557,822	6.22
Sector económico	2008	2009	2010	Participación del PIB regional (%)
Comercio y servicios	64,263,298	55,145,942	56,237,223	49.96
Industria	53,174,865	45,524,900	46,425,792	41.25
Agropecuario	11,405,322	9,702,799	9,894,807	8.79
Total	128,843,485	110,373,641	112,557,822	100.00

Fuente: Tomado del Siglo de Torreón, 2010.

2.3.2 Participación del sector agropecuario

De acuerdo con información estadística de SAGARPA, en el año 2009 el valor de la producción en el sector agropecuario ascendió a 24,933,466 millones, de los cuales en su mayoría fueron aportados por los municipios de Gómez Palacio, Matamoros, Francisco I. Madero, Mapimí, Lerdo, Torreón, San Pedro de las Colonias y Viesca, los cuales en total aportan 94.7% (Cuadro 2.9)

Según los datos del mismo año, de manera desglosada el sector agrícola por si sólo generó 4,043,781 millones, en cuanto a valor de la producción se refiere. Son los municipios de San Pedro de las Colonias, Matamoros, Gómez Palacio, Francisco I. Madero, Lerdo y Mapimí los que desarrollan mayor actividad agrícola, por consiguiente en conjunto generan el 78.5% del valor de la producción total. Cabe destacar que son sólo cinco cultivos (alfalfa, algodón, maíz forrajero, melón y sorgo forrajero) los que mayor valor de la producción generan con 72.1% del total, ocupando para el desarrollo de dichos cultivos 63.5% de la superficie sembrada en la región dentro del mismo año de referencia (Cuadro 2.10).

En cuanto al sector pecuario, la mayor parte de la actividad pecuaria se concentra en los municipios de Gómez Palacio, Lerdo, Mapimí, Matamoros, Torreón y Francisco I. Madero, los cuales en conjunto concentran el 87.6% del valor de la producción. Dentro de este sector los productos que generan mayor valor son la leche de vaca, la carne de pollo, la carne de res y el huevo, los cuales aportan el 96.4% del valor de la producción en el sector pecuario (Cuadro 2.9)

Cuadro 2.9 Valor de la producción agropecuaria de la Comarca Lagunera, 2009 (Miles de pesos).

Municipios	Valor de la producción agrícola	Valor de la producción pecuaria	Total	Participación
Lerdo	315,093.27	1,968,080.60	2,283,173.87	9.16%
Gómez Palacio	540,703.16	6,377,130.70	6,917,833.86	27.75%
Mapimí	305,522.48	2,035,526.30	2,341,048.78	9.39%
Nazas	127,117.15	62,247.20	189,364.35	0.76%
Rodeo	52,166.80	43,825.80	95,992.60	0.38%
Tlahualillo de Zaragoza	202,657.77	534,616.50	737,274.27	2.96%
General Simón Bolívar	89,724.05	60,652.10	150,376.15	0.60%
San Juan de Guadalupe	10,414.95	66,633.10	77,048.05	0.31%
San Luis del Cordero	9,837.60	21,280.00	31,117.60	0.12%
San Pedro del Gallo	5,806.00	37,725.90	43,531.90	0.17%
Matamoros	563,545.31	3,816,774.40	4,380,319.71	17.57%
San Pedro de las Colonias	1,030,455.81	721,619.40	1,752,075.21	7.03%
Torreón	114,815.95	2,038,773.10	2,153,589.05	8.64%
Francisco I. Madero	418,759.80	2,056,955.90	2,475,715.70	9.93%
Viesca	257,161.35	1,047,843.20	1,305,004.55	5.23%
Total	4,043,781.45	20,889,684.20	24,933,465.65	100.00%

Fuente: Elaboración propia con datos del Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria de la Región Lagunera 2009 (SAGARPA).

Cuadro 2.10 Valor de la producción agrícola de la Comarca Lagunera, 2009 (miles de pesos).

Cultivo	Valor de la producción	Participación (%)
Alfalfa	1,129,951.00	27.94
Algodón	708251.3735	17.51
Maíz forrajero	437901.225	10.83
Melón	329059.2	8.14
Sorgo forrajero	311194.05	7.70
Nogal	281280.6	6.96
Tomate rojo	202773	5.01
Avena forrajera	174199.9	4.31
Tomate invernadero	117752	2.91
Chile	74912.25	1.85
Sandia	60362.1	1.49
Sorgo escobero	46003.4	1.14
Maiz grano	40323.4	1.00
Otros	129,818.00	3.21

Fuente: Elaboración propia con datos del Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria de la Región Lagunera 2009 (SAGARPA).

Cuadro 2.11 Valor de la producción pecuaria de la Comarca Lagunera, 2009 (miles de pesos).

Producto	Especie	Valor de la producción	Participación (%)
Leche	Bovinos	10,760,519.20	51.51%
	Caprinos	328,793.10	1.57%
Carne	Bovinos	1,473,678.10	7.05%
	Caprinos	149,406.20	0.72%
	Porcinos	250,932.20	1.20%
	Ovinos	6,659.90	0.03%
	Aves	6,447,307.00	30.86%
Huevo	Aves	1,450,518.00	6.94%
Miel	Abeja	18,643.80	0.09%
Cera	Abeja	2,310.80	0.01%

Elaboración propia con datos del Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria de la Región Lagunera 2009 (SAGARPA).

En cuanto al sector pecuario, la mayor parte de la actividad pecuaria se concentra en los municipios de Gómez Palacio, Lerdo, Mapimí, Matamoros, Torreón y Francisco I. Madero los cuales en conjunto concentran el 87.57% del valor de la producción. Dentro de este sector los productos que generan mayor valor son la leche de vaca, la carne de pollo, la carne de res y el huevo los cuales aportan el 96.4% del valor de la producción en el sector pecuario (Cuadro 2.11).

2.4 Disponibilidad y consumo de agua por tipo de consumidor en la Comarca Lagunera

El contenido de este apartado concierne a la distribución y comportamiento del consumo del agua entre los diversos actores implicados en la problemática de la escasez de agua en la región. También, se describen las fuentes existentes del recurso, de tal forma que sea conocido el contexto de la disponibilidad del agua en la Comarca Lagunera.

2.4.1 Oferta de agua en la Comarca Lagunera

Las fuentes de abasto de agua superficial en la Comarca Lagunera provienen directamente de los afluentes del Río Nazas y el Río Aguanaval. El primero aporta un volumen medio anual de 1,241.5 millones de m³ y el segundo, aporta 141.5 millones de m³ que sumados a los 222.8 millones de m³ existentes en los cuerpos de agua de la región y a 60.9 millones de

m³ provenientes de descargas de aguas superficiales da un total disponible de 1,666.7 millones de m³; sin embargo, se pierde por infiltración y evaporación el 18%, por lo que únicamente se aprovechan 1,368.4 millones de m³, aproximadamente (CNA, 2002).

Cabe destacar que para la captación de las aguas superficiales solo se cuenta con dos obras hidráulicas importantes, y ambas se encuentran sobre la cuenca del Río Nazas. Estas obras son la presa Lázaro Cárdenas y la Francisco Zarco, además de 40 presas de derivación, 655 km de canales de conducción principales y 1,778 km de canales de conducción secundarios (Cuadro 2.12).

Cuadro 2.12 Presas de almacenamiento del Distrito de Riego 017.

Obra	Capacidad Total (millones de m ³)	Capacidad Útil (millones de m ³)	Corriente
Lázaro Cárdenas	3,336	2,936	Río Sixtín-Ramos
Francisco Zarco	436	365	Río Nazas

Fuente: Comisión Nacional del Agua. Diagnóstico Regional, 1998.

Con respecto al Río Aguanaval solo se puede mencionar la existencia de 11 presas derivadoras y 513 canales de conducción principales que derivan directamente el agua a las parcelas (CNA, 2003).

En torno a la disponibilidad de agua subterránea, en la región se considera de importancia para el abasto del agua la existencia de 9 acuíferos, de los cuales 4 se encuentra sobreexplotados. El volumen total de recarga de dichos acuíferos asciende a 868.6 millones de m³, sin embargo, la extracción total en los mismos tiene un valor reportado de 1,237.5 millones de m³, por lo cual existe déficit de 368.9 millones de m³ (Cuadro 2.2).

2.4.2 Consumo de agua por tipo de consumidor

En lo referente al consumo de agua por tipo de consumidor en la Comarca Lagunera existen registrados 8,384 aprovechamientos (pozos profundos, norias, estanques, entre otros); de los cuales 61.8% se explotan con fines agropecuarios, el 36% para uso residencial y el 2.2% restante corresponde al uso industrial. El volumen de extracción total de estos pozos, asciende a 1,237.5 millones de m³ (Ortigoza, 2005).

2.4.2.1 Sector agrícola

Durante el periodo comprendido entre 1998 y 2003, en la Región Lagunera fueron utilizados 1,900 Mm³ de agua, de los cuales más de 90% se destinó a la producción agrícola. El 62% de este volumen, provino de fuentes subterráneas y el resto de las aguas superficiales. De acuerdo con Godoy (2003), del volumen de agua destinado para riego solo 800 Mm³ son suficientes para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos y resto (910 Mm³) se pierde por ineficiencias de las prácticas de riego, lo que implica la pérdida de más de la mitad del recurso extraído por ambas fuentes. Lo anterior, básicamente se debe a que en el Distrito de Riego 017, en el cual se desarrollan las actividades agrícola de la región, existe una eficiencia de operación de 37%, producto de importantes pérdidas por infiltración, evaporación, carencia de estructuras de medición, obsolescencia de la infraestructura y falta de mantenimiento de la misma (Ortigoza, 2005).

2.4.2.2 Sector pecuario

En la Región Lagunera, las actividades agrícolas y pecuarias están estrechamente relacionadas; en forma indirecta, la ganadería utiliza el agua que se destina a la producción de forrajes en las zonas de riego (CNA, 2001), ya que algunos ganaderos también realizan actividades agrícolas para abastecer su hato con forrajes, o bien algunos productores se dedican al abasto de forrajes para los establos existentes en la región.

El consumo de agua en el sector pecuario está determinado por el inventario según especie pecuaria; en el año 2002, para cubrir las necesidades de agua del hato ganadero, se demandó una cantidad de alrededor de 40 millones de litros de agua. Del total, el mayor consumo de agua (58.5%), lo captó la especie bovina para leche y carne, en segundo lugar la producción de aves para carne con una demanda equivalente a 30.7%; el resto de la demanda fue de las especies porcina, caprina y ovina en su mayoría.

2.4.2.3 Sector residencial

La demanda de agua para uso público-urbano se satisface a través de la explotación de aguas subterráneas, para ello se extrajo un volumen de 142 millones de m³ para cubrir las necesidades de la población en el año 2000, la cual ascendía a 1,249,442 personas distribuidas en 15 cabeceras municipales y 942 localidades rurales. Para abastecer a la población se cuenta con una infraestructura de 646 pozos para el servicio doméstico y 509 para el servicio público-urbano.

La cobertura del servicio de agua potable en la región es de 85%, y los municipios donde se observan los principales rezagos en cuanto al servicio son Mapimí, San Pedro del Gallo, Simón Bolívar, San Juan de Guadalupe y Viesca; mientras que los municipios con mayor cobertura son Torreón, Gómez Palacio y Lerdo (CNA, 2002).

2.4.2.4 Sector industrial

La industria se abastece mediante la red de agua potable de los municipios, y en forma autoabastecida mediante pozos. Gran parte de las industrias conectadas a los sistemas de agua potable utilizan un volumen anual de 8.6 millones de m³ (CNA, 2002).

En lo concerniente a los usuarios autoabastecidos, se poseen 85 pozos de los cuales 32 están en Coahuila y aportan un volumen de 12.2 millones de m³. Los otros 53 pozos se localizan en el Estado de Durango y suministran 35.8 millones de m³. Asimismo, en la generación de energía eléctrica, 4 plantas termoeléctricas utilizan el agua proveniente de 15 pozos profundos (CNA, 2002).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen las bases teóricas que desde el punto de vista microeconómico caracterizan el problema de estudio, particularmente, se aborda el problema bajo los conceptos teóricos de la teoría de la producción y la eficiencia en el sentido de Pareto. También se describen las principales características de la programación lineal, así como algunos métodos de programación multiobjetivo utilizados para desarrollar diversos enfoques de optimización del problema objeto de estudio en esta investigación. El propósito del presente capítulo es definir la teoría que sustenta el planteamiento de este trabajo, así como los métodos utilizados para alcanzar los objetivos planteados.

3.1 Teoría microeconómica

La economía se auxilia en la construcción de modelos para el estudio de los fenómenos sociales. Se entiende por modelo una representación simplificada de la realidad. Por “simplificar” se puede entender que en modelo económico se tienen que suprimir detalles irrelevantes para poder enfocar toda la atención en los factores importantes de la realidad económica y que, en su mayoría, explican el fenómeno que se desea comprender.

En el contexto del presente trabajo, la construcción de un modelo de programación lineal sirve como herramienta de análisis para la consecución de los objetivos planteados. La determinación de los elementos que componen el modelo obedece al criterio anterior, donde solo son incluidos aquellos factores cuya importancia sea relevante desde el punto de vista económico.

3.1.1 Teoría de la producción

El objetivo primordial de la empresa es la maximización del beneficio neto. Los beneficios se definen como los ingresos menos los costes (Varian, 2011). Una empresa que produce n bienes (y_1, \dots, y_n) y utiliza m factores (x_1, \dots, x_m) , cuyos precios pagados por sus productos

sean (p_1, \dots, p_n) y (w_1, \dots, w_m) los precios de los factores de la producción utilizados, puede expresar sus beneficios netos (π) de la siguiente manera:

$$\pi = \sum_{i=1}^n p_i y_i - \sum_{i=1}^m w_i x_i$$

En la anterior expresión matemática el primer término representa el ingreso y el segundo los costos de producción. Es importante señalar que en la expresión del costo se deben incluir todos los factores de producción que utiliza la empresa, valorados a su precio de mercado. Sin embargo, en economía existe una definición más adecuada llamada costo de oportunidad. El término se basa en la idea de que si un individuo utiliza, por ejemplo, su trabajo pierde la oportunidad de emplearlo en otra parte. Por lo tanto, los salarios perdidos forman parte del costo de producción. Lo mismo sucede con el ejemplo de la tierra. El agricultor tiene la oportunidad de arrendarla a otra persona, pero decide renunciar a esa renta a cambio de rentársela a sí mismo. Las rentas perdidas forman parte del costo de producción. De esta manera, la definición económica del beneficio obliga a valorar todos los factores y los productos a su costo de oportunidad.

Si una empresa maximiza sus beneficios y decide ofrecer un nivel de producción y debe estar minimizando el coste de producirlo, ya que de lo contrario existiría una forma más barata de obtener y unidades de producción, lo que significaría que la empresa no estaría maximizando los beneficios.

Esta sencilla observación es muy útil para analizar la conducta de la empresa. El problema de la maximización del beneficio puede dividirse en dos fases: a) primero se averigua cómo se minimizan los costos de producir cierta cantidad y; b) segundo se analiza qué cantidad de producción maximiza los beneficios.

3.1.2 Asignación eficiente en el sentido de Pareto

Algunas de las decisiones que toman los agentes económicos tienen un costo de oportunidad, externalidad o efecto adverso sobre otros agentes. Dentro del marco de las

decisiones al interior de una empresa, por ejemplo, es posible encontrar el dilema de aumentar la producción y los beneficios netos, aunque esto represente el incremento de la emisión de contaminantes. En este caso, las actividades desarrolladas por los productores generan un costo ambiental, que es representado por el volumen de agua utilizado para sus actividades y que limita la disponibilidad de este recurso insustituible para el resto de los agentes económicos del entorno de referencia. Dada la naturaleza de este problema, es necesario recurrir al concepto de asignación eficiente en el sentido de Pareto, así una asignación eficiente de este tipo es aquella en la que:

1. No es posible mejorar el bienestar de todas las persona involucradas; o
2. No es posible mejorar el bienestar de una de ellas sin empeorar el de otra; o
3. Se han agotado todas las ganancias derivadas del comercio; o
4. No es posible realizar ningún intercambio mutuamente ventajoso; etc.

En términos generales, el concepto de asignación eficiente en el sentido de Pareto es fundamental en el uso de la programación multiobjetivo, ya que se persigue una solución de tipo Pareto para la obtención de un patrón óptimo de cultivos donde no se afecte las ganancias de los productores, pero a la vez se disminuya el impacto ecológico a través de un menor consumo de agua para riego.

3.2 Programación lineal

La economía es la ciencia que se encarga del estudio de la satisfacción de las necesidades humanas mediante bienes, que siendo escasos, tienen usos alternativos entre los cuales hay que optar. Así, dentro de este marco conceptual, la aplicación de la programación lineal en la economía es amplia, ya que mediante esta técnica se puede optimizar el uso de los recursos disponibles con el fin de satisfacer un objetivo determinado.

El nacimiento de la programación lineal está relacionado con el desarrollo del Método Simplex en 1947 por George B. Dantzig, aunque el origen de la programación lineal tuvo sus bases en las aportaciones matemáticas de científicos como John Von Neumann, que desarrolló la teoría de la dualidad en el mismo año; Leonid Kantorovich, quién en 1957 ganó el Nobel de economía por sus contribuciones a la teoría de la asignación óptima de recursos, y Leonid Khachiyan, quien diseñó el algoritmo del elipsoide a través del cual

demonstró que el problema de la programación lineal es resoluble de manera eficiente. El primer uso práctico para la programación lineal fue durante la Segunda Guerra Mundial, donde se utilizó para planificar los gastos y los retornos, a fin de reducir los costos al ejército y aumentar las pérdidas del enemigo. De esta manera, el desarrollo de la programación lineal está muy ligado a la economía como una técnica para lograr la asignación y uso más eficiente de los recursos.

Un problema de programación lineal es un problema de maximizar o minimizar una función lineal en la presencia de restricciones lineales de igualdad o desigualdad (Bazaraa, 2009). Por lo tanto, esta técnica es aplicable siempre y cuando exista:

- a) Un objetivo de optimización
- b) Un conjunto de actividades alternativas
- c) Recursos disponibles, pero escasos.

De acuerdo al concepto anterior, la programación lineal es una metodología que se utiliza en la solución de problemas en los que se desea maximizar o minimizar una función lineal de una o más variables, llamada función objetivo, sujeta a ciertas limitaciones (restricciones) que se pueden presentar como desigualdades o igualdades de funciones lineales de las variables (Bueno, 1987).

Actualmente, el uso de la programación lineal se ha extendido a diversas áreas de estudio y su aplicación trasciende a diferentes ámbitos cotidianos, como la adopción de esta técnica en diversas industrias para la planificación de la producción, distribución de las rutas de transporte, combinación óptima de productos, entre otros tantos. Dentro del campo de la economía agrícola, esta herramienta matemática generalmente se le asocia con problemas para la asignación óptima de recursos (agua, tierra, mano de obra), determinación de patrones de cultivos y, con respecto a las actividades pecuarias, el uso más común es el balanceo de raciones alimenticias.

Sin embargo, en el área de la economía ambiental esta herramienta ha tomado auge ya que los recursos naturales, debido al crecimiento de la población, cada día escasean más y, por ello, la programación lineal es un instrumento que permite una asignación óptima entre los diversos agentes económicos para lograr un consumo sustentable. En la actualidad, uno de

los problemas más comunes que se enfrenta es la distribución eficiente del agua y usos alternativos entre los tres principales consumidores (agricultura, industria, asentamientos urbanos), para ello se utilizan diversos modelos de programación lineal donde no solo se estima la distribución eficiente de los consumidores, sino también patrones de actividades económicas ad hoc a la disponibilidad del recurso para asegurar el consumo intertemporal del mismo.

3.2.1 Componentes del modelo de programación lineal

En la modelación de problemas de programación lineal debe existir un mínimo de componentes, los cuales aportan coherencia y solidez al modelo que se busca ejecutar para la obtención de soluciones eficientes relacionadas a un problema particular. Dentro de los requisitos mínimos que se deben considerar se encuentran los siguientes:

Función objetivo: Es una expresión matemática lineal que representa el objetivo del problema. Es la expresión que se maximiza o minimiza para alcanzar el propósito deseado. Esta función se encuentra integrada por los siguientes elementos:

- a) **Actividades:** también conocidas como variables de elección, son las diferentes opciones a las cuales se pueden destinar los recursos disponibles para la solución del problema.
- b) **Coefficientes:** son los factores multiplicativos vinculados a cada actividad considerada dentro de la función objetivo. Cuando el objetivo es maximizar la utilidad económica representan el ingreso neto por cada unidad de actividad. Caso contrario, cuando la función minimiza costos los coeficientes simbolizan el costo incurrido por cada unidad de actividad realizada.

Restricciones: refleja factores como la limitación o escasez de los recursos disponibles para la obtención del fin deseado. Se constituyen como un sistema de igualdades o desigualdades que representan las condiciones que son necesarias satisfacer. El tamaño de dicho sistema está sujeto al número de condiciones que sea necesario cubrir en la ejecución del problema, así como también del número de recursos considerados. Es muy importante hacer notar que las relaciones entre las distintas variables deben dar como resultado

expresiones algebraicas que relatan funciones lineales; de otro modo, el sistema no podrá resolverse aplicando los métodos de programación lineal (Trujillo, 1984).

- a) **Coefficientes técnicos:** en este caso representan la cantidad de un recurso en particular necesario para producir una unidad de actividad o variable de elección dentro del sistema de restricciones.

Restricciones de no negatividad: es importante considerar dentro de la elaboración del modelo la inclusión de restricciones de no negatividad, cuya función es asegurar que los valores de las variables de elección no resulten negativos.

3.2.2 Supuestos del modelo de programación lineal

A fin de representar un problema de optimización en programación lineal, es necesario definir una serie de supuestos que son implícitos en la formulación de la programación lineal. A continuación se describen estos supuestos que dan validez a los resultados de un modelo.

1. Linealidad: se refiere a que la relación funcional entre la cantidad de recursos y el resultado correspondiente es constante, ya que existe una relación lineal de causa-efecto.
2. Proporcionalidad: dada una variable x_j , su contribución al costo es $c_j x_j$ y su contribución a la i ésima restricción es $a_{ij} x_j$. Esto significa que si x_j se duplica, también se duplica su contribución al costo y a cada una de las restricciones. En otras palabras, ya que el objetivo es lineal, la contribución al objetivo de cualquier decisión es proporcional al valor de la variable de decisión. Producir dos veces más de un producto producirá dos veces más de ganancia o incrementará en la misma proporción los costos de producción, según sea el caso.
3. Aditividad: este supuesto garantiza que el valor total de la función objetivo es igual a la suma de los valores individuales, y que la contribución total de la i ésima restricción es la suma de las contribuciones individuales de las actividades o variables de elección.

4. Divisibilidad: este supuesto asegura que las variables de decisión pueden ser divididas en cualquier nivel fraccionario, de tal manera que los valores no enteros para las variables de decisión son permitidos.
5. Certidumbre: la programación lineal no permite la incertidumbre en los valores de los coeficientes y las cantidades de recursos disponibles, debido a que se trata de un modelo de tipo determinístico.

3.2.3 Formulación general de los problemas lineales

La formulación de un problema específico dentro de la programación lineal puede tomar tres formas, las cuales dependen en su elección del criterio de quien realiza la formulación del problema y del tamaño del mismo, ya que en algunos casos se pueden contar con cientos de restricciones y variables de decisión. A continuación se presentan cada una de las formas para expresar un problema lineal:

- a) Forma completa: en forma completa un problema de maximización con n variables y m restricciones tendría la siguiente forma:

$$\text{Max } \pi = c_1x_1 + \dots + c_nx_n$$

sujeta a:

$$\begin{array}{rcl} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n & & r_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n & & r_2 \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n & & r_m \end{array}$$

$$\text{y } x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

- b) Notación sumatoria: cuando el problema que se desea expresar es muy extenso, se utiliza como alternativa para simplificar el uso de la notación de sumatoria (\sum). De esta manera el problema anterior puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\text{Max } \pi = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

sujeta a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq r_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m)$$

$$\text{y } x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

- c) Forma matricial: para expresarse en forma matricial, primero se deben definir las siguientes cuatro matrices:

$$c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, \quad r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_m \end{bmatrix}$$

Dimensión

Vector c $n \times 1$

Vector x $n \times 1$

Vector r $m \times 1$

Vector A $m \times n$

Una vez definidos los vectores y matrices, el problema de programación lineal puede expresarse en los siguientes términos:

$$\text{Max } \pi = c'x$$

sujeto a: $Ax \leq r$

y $x \geq 0$

El signo de desigualdad significa “desigualdad elemento por elemento”, esto es, la *i*-ésima fila de la matriz Ax debe ser menor o igual que la *i*-ésima fila de la matriz r para todo *i* (García, 2006).

3.3 Programación multiobjetivo

Un problema clásico de programación matemática lineal consiste en la búsqueda de un óptimo en una función lineal, sujeta a un sistema de ecuaciones o inecuaciones lineales. De hecho, muchos de los problemas que se plantean en la vida real comparten esta estructura lógica común: la búsqueda de la mejor solución de cierto problema bajo determinadas restricciones. Sin embargo, en la práctica pocas veces es posible evaluar una situación y decidir con base en un solo criterio; incluso, en áreas como la economía para la elección de la mejor solución se toman en cuenta varios criterios y, por tanto, se desea alcanzar más de un objetivo. Es por ello que se desarrolla la programación multiobjetivo, técnica que consiste en la optimización simultánea de varias funciones objetivo que en muchos casos pueden estar en conflicto, ya que no es deseable o posible reducir un problema a una sola función objetivo y, por tanto, hay que tratarlas de una manera conjunta.

En otras palabras, la programación multiobjetivo u optimización vectorial se enfrenta al problema de optimizar simultáneamente varios objetivos sujetos a un conjunto de restricciones, usualmente lineales. Desde un punto de vista tanto lógico como operativo es imposible definir un óptimo cuando existen varios objetivos, la programación multiobjetivo pretende establecer el conjunto de soluciones eficientes (no dominadas o Pareto óptimas) en vez de buscar un único óptimo (Romero y Rehman, 1986).

Dentro de este trabajo de investigación por las cualidades arriba descritas se hace uso de dicha herramienta para el análisis del objeto de estudio. Ahora bien, es importante definir, en los apartados siguientes conceptos que ayudaran a profundizar el entendimiento de este método.

3.3.1 Conceptos básicos en Programación Multiobjetivo

Es importante la definición de algunos conceptos básicos para la familiarización del lector con el desarrollo de los siguientes apartados donde se exponen las técnicas de programación multiobjetivo que serán utilizadas dentro de esta investigación.

Atributo: este término dentro del presente contexto hace referencia a las características que describen cada una de las alternativas disponibles en una situación de decisión.

Objetivos: representan direcciones de mejora o preferencia de los atributos. Es decir, el objetivo recoge los deseos del decisor indicando en qué dirección debe caminar para encontrar una alternativa adecuada. Para estas direcciones de mejora sólo se admiten dos posibilidades: maximizar (se desea más del atributo) o minimizar (se desea menos del atributo).

Criterio: el término criterio engloba los conceptos anteriores de atributos y objetivos haciendo referencia a todos ellos. Se considera que criterios son todos aquellos atributos y objetivos que han sido juzgados relevantes en una cierta situación decisional.

Tasa de intercambio: este término mide el sacrificio necesario en cierto objetivo, a razón de poder compensar un incremento unitario en la consecución de otro objetivo. De esta forma, si existen dos soluciones eficientes x^1 y x^2 la tasa de intercambio T_{jk} entre los objetivos j ésimo y k ésimo, esta dada por:

$$T_{jk} = \frac{Z_j(x^1) - Z_j(x^2)}{Z_k(x^1) - Z_k(x^2)}$$

donde, $Z_j(x)$ y $Z_k(x)$ representan los niveles alcanzados por los correspondientes objetivos.

Matriz de pagos: es una matriz que se construye a partir de los óptimos individuales de cada uno de los objetivos y permite cuantificar el nivel de conflicto existente entre los objetivos considerados.

El proceso a seguir para su construcción es el siguiente: en primer lugar, se optimiza cada uno de los objetivos $Z_j(x)$ por separado, a la solución obtenida la denominamos x^j . Con las soluciones de estos k problemas se construye un vector formado por las evaluaciones de las funciones objetivo en estos puntos, este vector será el *punto ideal positivo* y es denotado por $Z_j^* = (Z_1(x^1), Z_2(x^2), \dots, Z_k(x^k))$. Este punto representa los valores óptimos de cada uno de los objetivos que en la mayoría de los casos es inalcanzable, debido al conflicto existente entre los objetivos. A partir del punto ideal positivo se calculan los valores que toman el resto de las funciones objetivo en los puntos máximos individuales; obteniendo así una matriz cuadrada en cuya diagonal principal se encuentra el punto ideal positivo. También es posible determinar el peor valor de cada función objetivo en la matriz, con estos valores se define un nuevo vector llamado *punto anti-ideal* el cual se denota como $Z_{.j}$. De esta forma se conocerá para cada función objetivo su rango de variación dentro del conjunto factible:

$$Z_j^* = Z_j(x) = Z_{j,j}, \quad j = 1, \dots, k \quad x / Ax = b, \quad x \geq 0$$

En la resolución de problemas con un único objetivo a optimizar, el cual es una solución factible (o más de una) que da el mejor valor a la función objetivo, que en este caso es un valor único. En contraste, en el caso de múltiples objetivos no es aplicable este concepto de óptimo, ya que una solución que maximice un objetivo en general no maximizará los restantes objetivos. Esta situación lleva a un nuevo concepto denominado “punto eficiente”, también conocido como punto no inferior o no dominado, y en vez de buscarse una solución óptima se busca un conjunto de soluciones eficientes.

Soluciones Pareto-óptimas o eficientes: se dice que una solución es eficiente o Pareto-óptima cuando es una solución factible tal que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo cualquiera sin que produzca, de forma simultánea, un empeoramiento en, al menos, otro de los atributos (Arenas, *et al.* 1999).

El conjunto de soluciones eficientes está integrado por soluciones factibles (esto es, que cumplen las restricciones) tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un objetivo sin producir deterioro en alguno de los otros objetivos planteados. Una vez que se ha definido a la programación multiobjetivo como el método para la solución de un conjunto de funciones, y con ello definir el conjunto eficiente, el problema puede expresarse, de manera general, en la siguiente forma:

$$Eff Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_q(x)]$$

sujeto a: $x \in F$

donde *Eff* significa la búsqueda de las soluciones eficientes y *F* representa el conjunto posible o alcanzable.

Hasta este punto han sido descritos los principales conceptos técnicos dentro de la programación multiobjetivo, que generan una visión global de esta técnica y sus alcances. Sin embargo, es de igual importancia mencionar que cuando se tienen problemas simples, de no más de dos variables de decisión, la tarea de obtener o delimitar el conjunto eficiente se alcanza a través de técnicas específicas dentro de la programación multiobjetivo, las cuales permiten generar o aproximarse al conjunto eficiente. Dichas técnicas de programación son descritas en los apartados siguientes.

3.3.2 Métodos de las restricciones

La idea básica del Método de las restricciones consiste en optimizar solo uno del total de objetivos considerados, siendo el resto incluido dentro del conjunto de restricciones. Con respecto a la selección del objetivo a optimizar, ella es arbitraria y no afecta a la generación de la solución eficiente (Willis y Perlack, 1980). Luego, por medio de variaciones paramétricas de los términos independientes de los objetivos incluidos como restricciones, se va generando el conjunto de soluciones eficientes (Marglin, 1967). Así, para un problema multiobjetivo en el que se desea maximizar los q objetivos considerados la estructura del modelo a formular dentro del método de las restricciones sería:

$$\text{Maximizar } Z_k(x)$$

sujeto a:

$$x \in F$$

$$Z_j(x) \leq L_j \quad j = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, q$$

El objetivo k -ésimo es el objetivo a optimizar. Por medio de las variaciones paramétricas de los términos independientes L_j se va generando el conjunto de soluciones eficientes (Romero y Rehman, 1986). Marglin (1967) demostró que para cada conjunto de valores que se dé al vector de parámetros, se genera un punto eficiente. Consecuentemente, mediante variaciones paramétricas de los términos independientes se generará el conjunto eficiente.

Se ha demostrado que cuando en el óptimo alguna de las restricciones paramétricas no es activa, esto es, cuando alguna de estas restricciones se satisface como desigualdad, si además existen óptimos alternativos, entonces la solución generada por el método - de las restricciones puede no ser eficiente. Por lo tanto, conviene subrayar que el método de las restricciones garantiza la obtención de soluciones eficientes sólo cuando todas las restricciones paramétricas son activas, es decir, cuando la correspondiente variable de holgura se hace cero, con lo que la restricción se satisface como igualdad (García, 1998b).

Este método requiere la resolución de p^{q-1} corridas del problema lineal correspondiente, siendo q el número de objetivos y p es el número de subintervalos en que se ha dividido el campo de variación de los objetivos situados como restricciones. Para reducir los cálculos se recurre a códigos de programación lineal paramétrica.

El uso del método, depende de la intuición de quién analiza el problema, ya que las soluciones mostradas corresponden a un nivel dado de la restricción paramétrica, de esta manera, se obtienen los distintos niveles que toman las actividades dado un valor en dicha restricción. Bajo esta circunstancia, será el decisor quien obedeciendo a ciertos criterios selecciona el mejor conjunto compromiso. Sin embargo, el uso que se le da a este método en el presente trabajo es el de mostrar una matriz de soluciones para observar el comportamiento de las actividades de selección bajo diferentes escenarios de escasez del agua disponible para riego. Ya que, será mediante la Programación Compromiso la obtención de un conjunto compromiso que se acerque a la solución deseada bajo el concepto Pareto-óptimo.

3.3.3 Programación Compromiso

La idea básica de la Programación Compromiso consiste en utilizar el concepto de punto ideal (la solución donde todos los objetivos alcanzan su valor óptimo) como punto de referencia para el centro decisor. Es evidente que este punto es inalcanzable debido a que en el mundo real los distintos objetivos suelen estar en conflicto unos con otros (Pérez *et al.*, 2002).

A partir de estos dos conceptos, la existencia de un punto ideal y la no accesibilidad de éste, Yu (1973) y Zeleny (1973) desarrollan la Programación Compromiso cuya idea básica consiste en encontrar el punto del espacio imagen que minimice la distancia, en dicho espacio, al punto ideal.

A detalle, el nuevo método desarrollado por Zeleny en 1973 ayuda en la elección de la solución óptima entre un conjunto de soluciones eficientes. Para ello es necesario establecer lo que Zeleny llama el punto ideal. Este punto está determinado por los valores óptimos de los diferentes objetivos considerados en la toma de decisión. Sin embargo, el punto ideal es inalcanzable dado la existencia de conflicto entre los objetivos. En este caso, el elemento óptimo o solución compromiso se encuentra bajo el argumento del *axioma de Zeleny*, el cual establece que dadas dos soluciones posibles, la preferida será la más cercana al punto ideal. De esta manera, dependiendo de la medida de distancia utilizada se establece un conjunto de soluciones compromiso.

Así, dentro de este contexto se introduce el concepto de grado de proximidad d_j entre el objetivo j -ésimo y su ideal, lo cual queda representado en la siguiente expresión:

$$d_j = Z_j^* - Z_j(x)$$

cuando el objetivo j -ésimo se maximiza, y por medio de:

$$d_j = Z_j(x) - Z_j^*$$

cuando el objetivo j -ésimo se minimiza. En ambos casos Z_j^* representa el punto ideal. En cambio, cuando las unidades en las cuales vienen expresados los objetivos son diferentes, se debe utilizar en el análisis desviaciones relativas en lugar de desviaciones absolutas (Zeleny, 1973). Para esto último, el grado de proximidad se expresa:

$$d_j = \frac{Z_j^* - Z_j(x)}{Z_j^* - Z_{:,j}} \quad \text{o} \quad d_j = \frac{Z_j(x) - Z_j^*}{Z_{:,j} - Z_j^*}$$

donde $Z_{:,j}$ es el anti-ideal para el objetivo j -ésimo; esto es, el valor del objetivo j -ésimo cuando el objetivo en conflicto se optimiza.

Ahora, con el propósito de obtener las distancias entre cada solución y el punto ideal de la programación compromiso se introduce la siguiente familia de funciones de distancia:

$$L_p(\delta, k) = \left\| \sum_{j=1}^k \delta_j d_j \right\|^{1/p}$$

donde los coeficientes δ_j ponderan la importancia de la discrepancia entre el objetivo j -ésimo y su valor ideal.

En programación compromiso la función anterior se utiliza para determinar las métricas $p=1$ (la distancia más larga en un sentido geométrico), $p=2$ (la distancia más corta en un sentido geométrico; esto es, la línea recta) y $p=\infty$ (la distancia chebysev). Para $p \geq 2$, el uso de la función anterior tiene sentido, pues las funciones de distancia no se utiliza en este contexto en un sentido geométrico, sino como una medida de proximidad entre cada solución y el punto ideal como indicador de las preferencias humanas.

Es importante observar que aumentos en el valor de p suponen dar una mayor ponderación a la desviación mayor. Así, cuando $p=\infty$, lo que se hace es minimizar la máxima desviación individual. En otras palabras, el factor p pondera las diferentes desviaciones de acuerdo con sus magnitudes, mientras que el factor δ_j pondera las desviaciones de acuerdo con la importancia relativa de cada objetivo. Así, para diferentes valores de p y δ_j se pueden generar diferentes soluciones compromiso.

De acuerdo a Yu (1973) las métricas L_1 y L_q definen un subconjunto del conjunto eficiente al que Zeleny (1974) denominó el *conjunto compromiso*. Las otras “mejores” soluciones compromiso (para $1 < p < \infty$) están situadas entre las métricas L_1 y L_q . De esta manera, para delimitar el conjunto compromiso es necesario determinar dos puntos, los cuales serán aquellos que acotan la solución óptima o punto más próximo al ideal. La primera distancia o punto será $p = 1$:

$$\text{Min } L_1 = \sum_{j=1}^q w_j \left(\frac{Z_j^* - Z_j(x)}{Z_j^* - Z_{ij}} \right)$$

sujeto a: $x \in F$

Esta distancia representa a un punto extremo eficiente, dado el carácter lineal en los objetivos de la función L_1 a minimizar.

En cambio, para la métrica $p = \infty$ se minimiza la máxima desviación de entre todas las desviaciones individuales; esto es, sólo la desviación mayor influye en el proceso de minimización. Para la obtención de esta métrica, que representa la mejor solución compromiso o punto más próximo al ideal, se resuelve la siguiente función lineal:

$$\text{Min } L_q = d$$

sujeto a: $x \in F$

$$w_j \left(\frac{Z_j^* - Z_j(x)}{Z_j^* - Z_{ij}} \right) \leq d, \quad j = 1, \dots, q$$

donde d representa la desviación más grande.

Las soluciones proporcionadas por las anteriores funciones lineales caracterizan los límites del conjunto compromiso, perteneciendo las otras mejores soluciones compromiso al conjunto acotado por los puntos L_1 y L_q .

Obsérvese que minimizar la distancia L_1 es equivalente a maximizar la siguiente función:

$$\text{Max } \sum_{j=1}^q w_j \frac{Z_j(x)}{Z_j^* - Z_{ij}}$$

expresión que se puede entender como representativa de la utilidad del decisor, ya que depende del máximo logro de sus objetivos. Se trata de una función de utilidad lineal y separable en los atributos.

En términos económicos la solución L_i del conjunto compromiso, se explica a través del siguiente lema (Ballester y Romero 1991): en el cual L_i satisface las siguientes relaciones entre los atributos:

$$w_1 \frac{Z_1^* - Z_1(x)}{Z_1^* - Z_{i1}} = \dots = w_j \frac{Z_j^* - Z_j(x)}{Z_j^* - Z_{ij}} = \dots = w_q \frac{Z_q^* - Z_q(x)}{Z_q^* - Z_{iq}}$$

De la anterior expresión, se deduce que la solución asociada al punto L_i es una solución equilibrada debido a que las discrepancias (ponderadas) entre el valor alcanzado por cada atributo y sus respectivos ideales son iguales.

Si se acepta que la maximización de la utilidad social depende de la maximización del logro normalizado de los objetivos considerados, entendiendo por logro la proximidad mayor entre un objetivo y su ideal, entonces la solución L_i que se obtiene considerando sólo en el proceso de minimización la desviación mayor, económicamente implicaría la maximización de una función de utilidad Rawlsiana. La solución L_i minimiza las discrepancias entre los objetivos y sus ideales ofreciendo una solución de equilibrio entre los mismos (Pérez *et al.*, 2002).

Bajo los fundamentos teóricos mostrados en este capítulo serán desarrollados los modelos de programación lineal y multiobjetivo, dirigidos hacia el objetivo de investigación, en el siguiente apartado.

CAPÍTULO IV

FORMULACIÓN EMPÍRICA DEL MODELO

En este capítulo se presenta el desarrollo de la metodología empleada para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo. Además, son mostrados los datos que alimentan los modelos de programación lineal que a detalle serán descritos en el proceso de formulación.

4.1 Modelo empírico de programación lineal

Para el desarrollo de la programación multiobjetivo, es indispensable obtener una matriz de pagos donde los valores de la diagonal principal muestran la situación de conflicto entre los objetivos perseguidos. Determinar dichos valores se logra a través de la maximización y minimización de las funciones que representan los objetivos en conflicto. De acuerdo a los objetivos planteados, primero se elabora un escenario base donde se replica el actual patrón de cultivos de la región objeto de estudio, esto a fin de tener un contexto para referenciar los cambios propuestos en el presente trabajo. Posteriormente, en el desarrollo de este apartado serán descritas las modificaciones efectuadas al modelo base. A continuación se muestran los modelos lineales base en su forma matemática:

$$\text{Max } Z = \sum_{j=1}^{28} c_j x_j + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_{28} x_{28}$$

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^{28} h_j x_j + h_2 x_2 + h_3 x_3 + \dots + h_{28} x_{28}$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{34} a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, 34$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{para } j = 1, 2, 3, \dots, 28$$

4.1.1 Función objetivo

La primera función objetivo maximiza la utilidad neta de los productores, donde c_j corresponde a la utilidad neta generada por la actividad x_j . En cambio, la segunda función minimiza el consumo de agua en el desarrollo de las actividades consideradas en el modelo, de esta manera, h_j representa la lámina bruta de riego aplicada a la actividad x_j . Ambas funciones están sujetas a las mismas restricciones.

Actividades (x_j): las actividades seleccionadas para los modelos de programación lineal fueron seleccionados de acuerdo con su importancia económica, y a la disponibilidad de información. Se utilizó información del periodo 2007-2009, donde los cultivos seleccionados representaron el 97% de la superficie sembrada bajo la modalidad de riego y aportaron el 80% del valor de la producción generado por la agricultura de riego en la región. En el Cuadro 4.1 se muestran los cultivos seleccionados, clasificados por tipo de tecnología de riego usada para efectuar dichas actividades.

Cuadro 4.1 Cultivos seleccionados.

Primavera-Verano		Otoño-Invierno		Perennes					
Gravedad	Bombeo	Gravedad	Bombeo	Gravedad	Bombeo				
x_1	Maíz grano	x_{14}	Maíz grano	x_{13}	Trigo	x_3	Alfalfa	x_{17}	Alfalfa
x_2	Sorgo grano	x_{15}	Frijol	x_{18}	Avena forrajera	x_{11}	Nogal	x_{28}	Nogal
x_4	Maíz forrajero	x_{16}	Sorgo grano	x_{19}	Zacate Ballico				
x_5	Sorgo forrajero	x_{20}	Maíz forrajero						
x_6	Melón	x_{21}	Sorgo forrajero						
x_7	Sandía	x_{22}	Melón						
x_8	Tomate	x_{23}	Sandía						
x_9	Chile	x_{24}	Tomate						
x_{10}	Algodón	x_{25}	Chile						
x_{12}	Sorgo escobero	x_{26}	Algodón						
		x_{28}	Sorgo escobero						

Fuente: elaboración propia, con datos de SAGARPA 2007-2009.

Utilidad neta (c_j): la utilidad neta se obtiene calculando la diferencia entre el ingreso bruto de cada actividad y su respectivo costo de producción. Para ello, es necesario estimar los rendimientos, precios medios rurales y costo de producción. Las respectivas utilidades para cada cultivo seleccionado se muestran en los Cuadros 4.2 y 4.3. A continuación se expresa matemáticamente la obtención de la utilidad neta para cada actividad seleccionada:

$$c_j = R_j P_j - C_j$$

donde:

c_j : utilidad neta

R_j : rendimiento por hectárea del cultivo j

P_j : precio medio rural por tonelada del cultivo j

C_j : costo de producción por hectárea del cultivo j

Cuadro 4.2 Utilidad Neta en Riego por Gravedad.

Cultivos	Precio \$/ton	Precio \$/ton	Ingreso \$/ha	Costo Producción \$/ha	Utilidad Neta \$/ha
Maíz grano	2,974	3.22	9,576	8,398	1,178
Sorgo grano	2,417	3.70	8,943	7,605	1,338
Alfalfa	346	73.38	25,389	5,818	19,571
Maíz forrajero	421	43.32	18,238	9,112	9,126
Sorgo forrajero	352	47.84	16,840	8,404	8,436
Melón	2,364	25.03	59,171	17,957	41,214
Sandía	1,320	32.01	42,253	13,438	28,815
Tomate	4,338	48.08	208,571	15,617	192,954
Chile	3,437	11.88	40,832	14,032	26,800
Algodón	7,126	4.66	33,207	19,983	13,224
Nogal	32,283	1.29	41,645	8,622	33,023
Sorgo escobero	2,343	4.64	10,872	8,041	2,831

Fuente: Elaboración propia, con datos de SAGARPA (2007-2009).

Cuadro 4.3 Utilidad Neta en Riego por Bombeo.

Cultivos	Precio \$/ton	Rendimiento Ton/ha	Ingreso \$/ha	Costo Producción \$/ha	Utilidad Neta \$/ha
Trigo	2,196	4.34	9,531	8,122	1,409
Maíz grano	2,974	3.38	10,052	8,675	1,377
Frijol	6,472	1.13	7,313	6,636	677
Sorgo grano	2,417	4.12	9,958	7,923	2,035
Alfalfa	346	82.98	28,711	5,265	23,446
Avena forrajera	295	37.56	11,080	5,746	5,334
Zacate ballico	281	36.77	10,332	7,779	2,553
Maíz forrajero	421	44.64	18,793	9,369	9,424
Sorgo forrajero	352	49.32	17,361	8,377	8,984
Melón	2,364	26.50	62,646	18,695	43,951
Sandía	1,320	36.28	47,890	14,562	33,328
Tomate	4,338	47.82	207,443	15,956	191,487
Chile	3,437	25.23	86,716	14,214	72,502
Algodón	7,126	4.84	34,490	21,226	13,264
Nogal	32,283	1.18	38,094	8,777	29,317
Sorgo escobero	2,343	5.23	12,254	8,261	3,993

Fuente: Elaboración propia, con datos de SAGARPA (2007-2009).

Los coeficientes para la función donde se minimiza el consumo de agua serán presentados posteriormente, ya que éstos también son utilizados como coeficientes técnicos dentro de las restricciones consideradas para ambos modelos.

Rendimiento: cantidad en toneladas obtenidas por unidad de superficie para un cultivo en particular. Los rendimientos fueron obtenidos a partir de los datos proporcionados por SAGARPA (2007-2009).

Precios medios rurales: son los precios pagados a los productores por la venta de los productos obtenidos en cada una de las actividades que desempeñan. Para el cálculo de los precios medios rurales se usó información de SAGARPA para el periodo 2007-2009, dichos precios fueron deflactados para obtener los precios reales pagados al productor, se utilizó como año base el periodo 2008 del INPC.

Costos de producción: representan el monto total de los costos incurridos por cada unidad de actividad seleccionada. Se estimaron en base al promedio de los costos reportados por SAGARPA para el mismo periodo y, se deflactaron con el mismo año base utilizado para los precios medios rurales. Sin embargo, cabe resaltar que del monto total de los costos incurridos fueron excluidos, la tierra porque su renta está en función de la disponibilidad

del agua, el agua porque es el valor a encontrar, y a la mano de obra se le consideró como cero su costo de oportunidad (Godínez, 2005).

4.1.2. Restricciones (b_i)

Las restricciones consideradas para las funciones lineales son relativas a la disponibilidad de los recursos tierra, agua y mano de obra, y también, son consideradas restricciones de producción.

Tierra: durante los años 2007-2009, en la Comarca Lagunera fueron sembradas en promedio 144,107 ha de riego de las actividades seleccionadas; de las cuales 58% corresponden a riego por bombeo (83,500 ha) y 42% a riego por gravedad (60,607 ha).

Agua: la disponibilidad total de agua para ambos tipos de riego, fue estimada con base en el volumen de agua utilizado por los cultivos considerados dentro del mismo periodo. El volumen de agua total utilizado para cada cultivo fue e

timado como el producto de la superficie (ha) por su respectiva lámina bruta de riego. Las láminas brutas de riego fueron tomadas de Godínez, 2005. Con base en las estimaciones, las disponibilidad de agua de gravedad fue de 1,161,782 miles de m^3 y de 955,867 miles de m^3 de agua subterránea.

Mano de obra: dentro de la formulación del modelo se consideró la disponibilidad de la mano de obra en función de la PEA ocupada en el sector primario dentro de la región de estudio. Según datos de INEGI (2000), el total de personas dedicadas a las actividades primarias fue de 23,205; de acuerdo con Godínez (2005) la superficie regada con agua de bombeo absorbe aproximadamente el 61 % y el 39% restante es utilizado en el riego de gravedad.

En función de los datos anteriores, la disponibilidad anual de mano de obra para ambas modalidades de riego se estimó multiplicando por 24 las cantidades respectivas, ya que se supone que cada persona trabaja 6 días a la semana. Por lo tanto, existen 4,076,654 jornales para realizar riego por bombeo y 2,606,386 jornales para efectuar el riego por gravedad.

Restricciones de la producción: para el modelo base se utilizan restricciones de máximo y mínimo que permitan al modelo recrear las condiciones actuales del patrón de cultivos. En este caso, se estimaron las superficies sembradas de los cultivos seleccionados. Este

comportamiento en la distribución de los recursos tierra y agua principalmente, entre las actividades seleccionadas obedece en algunos casos a los criterios de los planeadores en el distrito de riego, en otros casos obedece a las necesidades de insumos en la región, y finalmente a factores socioeconómicos que determinan la decisión del productor a la hora de planificar sus siembras.

Superficie mínima de granos básicos:

x_1	Maíz grano gravedad	2,562 hectáreas
x_2	Sorgo grano gravedad	816 hectáreas
x_{13}	Trigo bombeo	318 hectáreas
x_{14}	Maíz grano bombeo	408 hectáreas
x_{15}	Frijol bombeo	39 hectáreas
x_{16}	Sorgo grano bombeo	170 hectáreas

En el caso de los granos básicos éstos representan tan solo el 3% de la superficie total sembrada bajo cualquier modalidad de riego y su consumo respectivo de agua corresponde a un 3% del total disponible. En el modelo base se le asigna una restricción de mínimo debido a que a pesar de su baja rentabilidad estas actividades tienen un peso social que explica fuera de los términos económicos su presencia dentro del patrón de cultivos.

Superficie máxima de forrajes

x_3	Alfalfa gravedad	5,736 hectáreas
x_4	Maíz forrajero gravedad	14,659 hectáreas
x_5	Sorgo forrajero gravedad	12,064 hectáreas
x_{17}	Alfalfa bombeo	33,505 hectáreas
x_{18}	Avena forrajera bombeo	14,882 hectáreas
x_{19}	Zacate ballico bombeo	865 hectáreas
x_{20}	Maíz forrajero bombeo	15,489 hectáreas
x_{21}	Sorgo forrajero bombeo	7,268 hectáreas

Las actividades dominantes en cuanto el uso de los recursos tierra y agua son aquellas relacionadas a la producción de forrajes, ya que en conjunto representan el 72% de la superficie sembrada y consumen 69% del agua total disponible. La importancia dentro del patrón de cultivo actual tiene su explicación en la fuerte presencia de actividades pecuarias como la producción de leche en la región que demanda grandes cantidades de forrajes como insumo principal.

Superficie máxima de hortalizas

x_6	Melón gravedad	900 hectáreas
x_7	Sandía gravedad	611 hectáreas
x_8	Tomate gravedad	240 hectáreas
x_9	Chile gravedad	792 hectáreas
x_{22}	Melón bombeo	4,007 hectáreas
x_{23}	Sandía bombeo	743 hectáreas
x_{24}	Tomate bombeo	825 hectáreas
x_{25}	Chile bombeo	345 hectáreas

Superficie máxima de frutales

x_{11}	Nogal gravedad	2,826 hectáreas
x_{27}	Nogal bombeo	3,471 hectáreas

Superficie máxima de oleaginosas

x_{10}	Algodón gravedad	16,752 hectáreas
x_{26}	Algodón bombeo	822 hectáreas

Superficie máxima de industriales

x_{12}	Sorgo escobero gravedad	2,649 hectáreas
x_{28}	Sorgo escobero bombeo	343 hectáreas

Respecto al resto de actividades seleccionadas fueron sujetas a restricciones de máximo de acuerdo a lo observado en el periodo de referencia para el modelo base. Sin embargo, con el fin de optimizar los recursos en la región dando prioridad al agua como un factor de vital importancia, bajo el análisis multiobjetivo es necesario modificar algunas de las anteriores restricciones que serán expuestas en la formulación de los modelos de programación multiobjetivo a desarrollarse posteriormente.

4.1.3 Coeficientes técnicos (α_i)

Los coeficientes corresponden a los insumos considerados en la formulación del modelo; estos son: tierra, agua y mano de obra. Las cantidades anuales respectivas para cada actividad quedan expresadas por unidad de superficie (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4 Coeficientes técnicos.

Cultivos	<u>Gravedad</u>			<u>Bombeo</u>		
	Mano de obra (jornales)	Riego (m ³ /ha)	Tierra (ha)	Mano de obra (jornales)	Riego (m ³ /ha)	Tierra (ha)
Trigo	-	-	-	17	7,061	1
Maíz grano	22	15,112	1	23	9,920	1
Frijol	-	-	-	27	7,729	1
Sorgo grano	21	17,455	1	21	6,300	1
Alfalfa	22	15,811	1	22	16,924	1
Avena forrajera	-	-	-	15	6,101	1
Zacate Ballico	-	-	-	17	8,636	1
Maíz forrajero	16	19,437	1	15	7,864	1
Sorgo forrajero	16	19,818	1	17	7,455	1
Melón	127	25,781	1	140	6,794	1
Sandía	125	25,828	1	124	7,497	1
Tomate	170	24,042	1	168	6,493	1
Chile	162	18,633	1	162	8,950	1
Algodón	49	20,327	1	49	6,500	1
Nogal	63	17,348	1	62	16,596	1
Sorgo escobero	26	17,012	1	27	7,940	1

Fuente: elaboración propia con datos de SAGARPA (2007-2009).

Tierra: la unidad estándar para este insumo de la producción es de una hectárea.

Agua: los requerimientos técnicos relacionados a este insumo fueron tomados de Godinez, (2005), y representan las láminas brutas de riego aplicadas a los cultivos seleccionados durante el ciclo en que fue desarrollada la actividad, estas láminas de riego fueron estimadas dividiendo el volumen de agua suministrada a cada cultivo durante su respectivo ciclo, entre la superficie ocupada por el cultivo

Mano de obra: fue considerado como unidad base un jornal de 8 horas, de esta manera este coeficiente representa el número de jornales necesarios para el desarrollo de una actividad en particular (SAGARPA, 2007-2009).

4.2 Modelos de programación multiobjetivo

En este apartado son descritas las formulaciones empíricas de los modelos multiobjetivo que serán utilizados para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación. Así, en los siguientes párrafos será especificado el planteamiento matemático para el modelo base y cada uno de los escenarios planteados.

4.2.1 Modelo empírico bajo el método de las restricciones

Este método consiste en optimizar uno de los objetivos, mientras el otro se incluye dentro de las restricciones. Posteriormente, por medio de variaciones paramétricas de los términos independientes del objetivo incluido como restricción se genera el conjunto de soluciones eficientes. Bajo este método, las soluciones mostradas corresponden a un nivel dado de la restricción paramétrica, de esta manera, se obtienen los distintos niveles que toman las actividades dado un valor en dicha restricción.

4.2.1.1 Modelo base bajo el método de las restricciones

La formulación matemática del modelo base bajo este método de programación, queda expresada de la siguiente forma:

$$\text{Max } Z_1 = \sum_{j=1}^{28} c_j x_j = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + \dots + c_{28} x_{28}$$

sujeto a:

$$\sum_{j=1}^{34} a_{ij} x_j \leq b_i \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, 34$$

$$x_j \geq 0 \quad \text{para } j = 1, 2, 3, \dots, 28$$

$$\text{Min } Z_2(x) = k$$

$$\text{donde } 60,625 < k < 2,117,649$$

En este caso, se maximiza la función ganancia sujeta a las mismas restricciones del modelo base descrito en programación lineal, pero se agrega la función que minimiza el consumo de agua como una restricción paramétrica, donde el rango de valores entre los que puede tomar valor está determinado por las cantidades expresadas en la matriz de pagos con respecto al objetivo considerado como restricción dentro del modelo. En este modelo, estos valores representan el mínimo y el máximo volumen de agua utilizable dentro del modelo base.

4.2.1.2 Escenarios bajo el método de las restricciones

Para los modelos que representan los escenarios que plantean un cambio en la estructura de la distribución de los cultivos se utiliza el mismo criterio de formulación del modelo base; la diferencia en estos casos es la inclusión de nuevas restricciones y los valores que tomará la restricción paramétrica. Con el fin de no redundar en el planteamiento matemático de los modelos de programación, las restricciones para cada uno de los escenarios son expuestas a detalle en los párrafos correspondientes al método de programación compromiso. Solo se expone los valores de la restricciones paramétricas para cada uno de los escenarios.

Escenario A:

$$\text{Min } Z_2(x) = k$$

$$\text{donde } 1,586,525 < k < 2,117,649$$

Escenario B:

$$\text{Min } Z_2(x) = k$$

$$\text{donde } 1,483,018 < k < 2,117,649$$

4.2.2 Modelo empírico de programación compromiso

El objetivo de utilizar la programación compromiso como herramienta de análisis responde a la necesidad de optimizar los recursos no sólo desde un punto de vista económico sino también ambiental, debido a que un recurso tan importante como el agua es indispensable no sólo para el desarrollo de las actividades económicas, sino también para supervivencia

de los núcleos de población que componen la región de estudio. De esta manera, se busca con esta herramienta generar un patrón óptimo de cultivos que privilegie el uso sustentable del agua, considerando que el sector agrícola es el mayor usuario de este recurso y que existen otros usuarios que compiten por el mismo.

4.2.2.1 Modelo base en programación compromiso

Una vez definidas las funciones de maximización de utilidad y minimización del consumo de agua, ambas se optimizan, la obtención de los valores objetivo en cada una de ellas sirven para la obtención de la matriz de pagos. Así, una vez determinados dichos valores se procede a la obtención de un patrón de cultivo óptimo acorde a los criterios de la programación compromiso, bajo las condiciones actuales, el cual servirá de marco referencial para los resultados obtenidos en la construcción de escenarios de acuerdo con los objetivos perseguidos.

Matriz de pagos

	Maximizar ganancia	Minimizar uso de agua
Maximizar ganancia	Z_1^*	$Z_{:2}$
Minimizar uso de agua	$Z_{:1}$	Z_2^*

4.2.2.2 Escenario A

Hasta este punto se ha modelado el problema de estudio de acuerdo con los patrones de cultivos que existen en la actualidad en la Comarca Lagunera. Sin embargo, el objetivo es obtener un patrón óptimo de cultivos donde se maximice la ganancia con el menor impacto sobre el uso del agua, debido a la vital importancia del recurso para el resto de los usuarios y porque éste es un recurso insustituible. Por ello, de acuerdo con los datos observados en el periodo de referencia es preferible inducir en la región un cambio hacia cultivos como las hortalizas, debido a que solo consumen el 5% del recurso agua pero aportan un 21% del beneficio neto en la región (SAGARPA, 2007-2009).

Así, en el escenario A se incrementa en 15% la superficie sembrada de hortalizas, superficie que será sustituida del área que actualmente utilizan los forrajes. Este cambio obedece a que son los forrajes quienes mayor volumen de agua consumen en la región. A continuación se muestran las restricciones consideradas en este escenario:

Superficie mínima de granos básicos:

x_1	Maíz grano gravedad	2,562 hectáreas
x_2	Sorgo grano gravedad	816 hectáreas
x_{13}	Trigo bombeo	318 hectáreas
x_{14}	Maíz grano bombeo	408 hectáreas
x_{15}	Frijol bombeo	39 hectáreas
x_{16}	Sorgo grano bombeo	170 hectáreas

Superficie máxima de forrajes:

$$x_3 + x_4 + x_5 + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{20} + x_{21} \quad 103,199$$

La suma total de los cultivos forrajeros se ve disminuida en la cantidad que representa el 15% de aumento en la superficie de hortalizas. Así mismo, se incluye una restricción sobre la superficie máxima que debe ocupar la alfalfa cultivada en ambas modalidades de riego, la cual ha sido del 38% del total de la superficie destinada a los forrajes.

$$x_3 + x_{17} \quad 39,216$$

Superficie máxima de hortalizas:

$$x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} \quad 9,732$$

Esta restricción representa el incremento de un 15% en la superficie de hortalizas, con respecto a lo observado en el modelo base dentro del patrón de cultivos. También se consideró la inclusión de restricciones para cada actividad que integran el grupo de hortalizas; ésta restricciones son relacionadas con la participación que tiene cada una de las actividades del grupo a fin de preservar la misma proporción que guarda cada actividad dentro del total de la superficie destinada a la producción de hortalizas.

$x_6 + x_{22}$	Melón gravedad y bombeo	5,645 hectáreas
$x_7 + x_{23}$	Sandía gravedad y bombeo	1,557 hectáreas
$x_8 + x_{24}$	Tomate gravedad y bombeo	1,265 hectáreas
$x_9 + x_{25}$	Chile gravedad y bombeo	1,265 hectáreas

Utilidad mínima generada por el patrón de cultivos:

$$\sum_{j=1}^n UN_j x_j \quad \$ 2,374,193$$

Con esta restricción se busca que la solución generada al menos produzca el mismo nivel de utilidad para los productores. Es decir, el nuevo patrón de cultivos debe optimizar el uso del recurso agua sin empeorar el ingreso obtenido por las actividades anteriores.

Los criterios de formulación en programación compromiso son los mismos que los anteriores usados para el modelo base, pero ahora sujeto a las restricciones ya descritas.

4.2.2.3 Escenario B

En este escenario solo se plantea un incremento de 30% la superficie sembrada de hortalizas, utilizando el mismo criterio que en el escenario anterior de trasladar el incremento de la superficie hacia el área ocupada por los forrajes. A continuación se muestran las restricciones consideradas en este escenario:

Superficie mínima de granos básicos:

x_1	Maíz grano gravedad	2,562 hectáreas
x_2	Sorgo grano gravedad	816 hectáreas
x_{13}	Trigo bombeo	318 hectáreas
x_{14}	Maíz grano bombeo	408 hectáreas
x_{15}	Frijol bombeo	39 hectáreas
x_{16}	Sorgo grano bombeo	170 hectáreas

Superficie máxima de forrajes:

$$x_3 + x_4 + x_5 + x_{17} + x_{18} + x_{19} + x_{20} + x_{21} \quad 101,929$$

La suma total de los cultivos forrajeros se ve disminuida en la cantidad que representa el 30% de aumento en la superficie de hortalizas. Así mismo, se incluye una restricción sobre la superficie máxima que debe ocupar la alfalfa cultivada en ambas modalidades de riego, la cual ha sido del 38% del total de la superficie destinada a los forrajes.

$$x_3 + x_{17} \quad 38,733$$

Superficie máxima de hortalizas:

$$x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} \quad 11,002$$

Esta restricción representa el incremento de un 30% en la superficie de hortalizas, con respecto a lo observado en el modelo base dentro del patrón de cultivos. Al igual que en el escenario anterior se incluyen restricciones para las actividades del grupo de hortalizas a fin de conservar la estructura del mismo.

$x_6 + x_{22}$	Melón gravedad y bombeo	6,381 hectáreas
$x_7 + x_{23}$	Sandía gravedad y bombeo	1,761 hectáreas
$x_8 + x_{24}$	Tomate gravedad y bombeo	1,430 hectáreas
$x_9 + x_{25}$	Chile gravedad y bombeo	1,430 hectáreas

Utilidad mínima generada por el patrón de cultivos:

$$\sum_{j=1}^n UN_j \quad x_j \quad \$ 2,374,193$$

Con esta restricción se busca que la solución generada al menos produzca el mismo nivel de utilidad para los productores. Es decir, el nuevo patrón de cultivos debe optimizar el uso del recurso agua sin empeorar el ingreso obtenido bajo el esquema actual de cultivos en la Comarca Lagunera.

Hasta aquí, se ha mostrado el planteamiento matemático que permite expresar los modelos de programación utilizados para alcanzar los objetivos de investigación. En los capítulos siguientes serán presentados los resultados con su respectivo análisis, así mismo, las conclusiones derivadas de la presente investigación y las recomendaciones pertinentes para solucionar la problemática de estudio.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo son mostrados los resultados obtenidos a través de la metodología anteriormente descrita. Así mismo, se describen y analizan dichos resultados dentro del marco contextual de la problemática de estudio.

5.1 Modelo base en programación lineal

El objetivo del modelo base, como ya se mencionó anteriormente, es el de replicar las condiciones reales del patrón de cultivos dentro del periodo de referencia. Por lo tanto, los resultados mostrados en el Cuadro 5.1 muestran un esquema de la distribución de los cultivos dentro de la Comarca Lagunera y su respectiva aportación a la economía local en términos netos.

Como se puede apreciar en el cuadro inferior, la utilidad neta total que se obtiene con el patrón actual de cultivos, asciende a 2,374,193 miles de pesos y para ello fueron utilizados 2,117,649 miles de m³ de agua. La presencia de los forrajes dentro de la estructura es fuerte ya que, acorde a las actividades para el modelo base, los cultivos que componen dicho grupo representan el 72% de la superficie total (104,468 ha) y consumen el 69% del total del agua disponible (1,455,996 miles de m³). Sigue en orden de importancia, con respecto al nivel de recursos utilizados, el cultivo de algodón el cual ocupa el 12% (17,574 ha) de la superficie de cultivo y consume el 16% del recurso agua (345,860 miles de m³). El grupo de hortalizas, actualmente ocupa el 6% de la superficie total (8,463 ha) y consume el 5% del agua de riego disponible (100,748 miles de m³). Finalmente, el resto de los cultivos (granos básicos, nogal y sorgo escobero) ocupan en conjunto el 9% de la superficie disponible para cultivo dentro del modelo y consumen el 11% del agua para irrigación.

En la estructura productiva actual la participación en la utilidad neta generada queda distribuida, en orden de importancia, de la siguiente manera: los forrajes representa el 60% de la utilidad total, las hortalizas aportan el 21% del total, el algodón el 10% y, finalmente, el resto de los cultivos contribuyen con el 9% restante. Cabe destacar la importancia que tienen las hortalizas en términos económicos ya que utilizando tan solo el 5% de la superficie total y el 6% del agua disponible generan una utilidad mucho mayor. También, en menor proporción pero igual que el caso anterior se puede mencionar el cultivo de nogal, el cual utilizando 4% de la superficie de cultivo y un 5% del agua de riego disponible genera un 8% de la utilidad total. En contraste, el conjunto de cultivos que conforman al grupo de forrajes utiliza mayor cantidad de recursos y, sin embargo, su aportación a la utilidad neta generada por el actual patrón de cultivos en proporción es menor al nivel de

recursos utilizados. También es el caso de otros grupos de cultivos, donde los granos básicos utilizan el 3% de la superficie total del patrón de cultivo e igual proporción del agua total disponible, pero su contribución al total de la utilidad neta apenas llega al 0.2%.

Cuadro 5.1 Resultados de modelo base con patrón actual de cultivos.

Tecnología	Cultivo	Superficie (ha)	Utilidad neta total (miles de pesos)	Volumen total de agua (miles de m ³)
Gravedad	Maíz grano	2,562	3,018	38,717
	Sorgo grano	816	1,092	14,243
	Alfalfa	5,736	112,259	90,692
	Maíz forrajero	14,659	133,778	284,927
	Sorgo forrajero	12,064	101,772	239,084
	Melón	900	37,093	23,202
	Sandía	611	17,606	15,781
	Tomate	240	46,309	5,770
	Chile	792	21,226	14,757
	Algodón	16,752	221,528	340,518
	Nogal	2,826	93,323	45,065
	Sorgo escobero	2,649	7,499	45,065
Bombeo	Trigo	318	448	2,245
	Maíz	408	562	4,047
	Frijol	39	26	301
	Sorgo	170	346	1,071
	Alfalfa	33,505	785,558	567,039
	Avena forrajera	14,882	79,381	90,795
	Zacate	865	2,208	7,470
	Maíz forrajero	15,489	145,968	121,805
	Sorgo forrajero	7,268	65,296	54,183
	Melón	4,007	176,112	27,224
	Sandía	743	24,763	5,570
	Tomate	825	157,977	5,357
	Chile	345	25,013	3,088
	Algodón	822	10,903	5,343
	Nogal	3,471	101,759	57,605
	Sorgo escobero	343	1,370	2,723
	Total	144,107	2,374,193	2,117,649

Fuente: Elaboración propia con base a los resultados del modelo base.

Finalmente, con respecto al uso de mano de obra dentro del esquema actual de cultivos dentro de la Comarca Lagunera se obtuvieron los siguientes resultados: el modelo base solo utiliza el 68% (4,517,491 jornales) del total de jornales disponibles para las actividades primarias. Los dos principales grupos de actividades que emplean el mayor número de jornales son las actividades relacionadas con la producción de forrajes ya que en conjunto utilizan el 42% del total de jornales disponibles (1,884,696 jornales), así mismo, las actividades relacionadas con la producción de hortalizas emplean el 27% del total de jornales (1,207,381 jornales). Y, cultivos como el algodón y el nogal, utilizan el 19 y 9% respectivamente del total de jornales utilizados en el modelo; el resto de los jornales se destina a la producción de granos básicos y el cultivo de sorgo escobero.

Con los resultados obtenidos del modelo base se puede apreciar que el patrón actual de cultivos en la Comarca Lagunera en términos económicos y ambientales no es completamente eficiente. Como se puede observar en los resultados arrojados por el modelo de programación lineal se destina un importante cantidad de los recursos disponibles a la producción de forrajes; sin embargo, existe la posibilidad de realizar cambios en la presente estructura productiva a fin de maximizar la utilidad neta generada y a la vez hacer una mejor asignación del recurso agua dentro de dicho contexto. Actividades como la producción de hortalizas generan mayor utilidad, utilizan menor cantidad de agua y también contribuyen a la generación de empleos en el sector rural debido a que para realizar estas actividades se demanda una importante cantidad de mano de obra.

Es importante señalar que en la Región Lagunera la presión sobre los recursos hídricos es considerable, actualmente se encuentra sobreexplotados cuatro de los nueve acuíferos existentes dentro del área, y por ello se debe considerar todas las alternativas posibles que permitan un mejor uso del agua. Se sabe que en el caso del sector agrícola, el mayor consumidor del recurso, las actividades que realizan los productores están sujetas a decisiones de tipo económico y social, debido a esto se privilegia la producción de ciertos cultivos como los forrajes ya que estos tienen un mercado establecido dentro de la misma región en virtud de que la actividad pecuaria también es considerablemente grande y demanda alimento para las diversas especies animales que se explotan dentro de la Comarca Lagunera. Sin embargo, aun considerando la interdependencia de las actividades agrícolas y las pecuarias se debe tomar en cuenta el resto de los usuarios que también compiten por el recurso y la sustentabilidad de la actual estructura productiva y sus implicaciones en la disponibilidad intergeneracional del agua.

5.2 Programación multiobjetivo

El análisis de los resultados bajo el enfoque de la programación multiobjetivo que a continuación se desarrolla esta enfocado hacia la asignación óptima del agua considerando la importancia económica de la actividad agrícola dentro de la región.

5.2.1 Matriz de pagos

La matriz de pago representa los valores en conflicto que se obtienen al optimizar cada uno de los objetivos por separado. En el caso particular del modelo base la maximización de ganancia corresponde al valor que actualmente se obtiene por realizar las actividades seleccionadas y la minimización del recurso agua se realiza bajo las mismas restricciones empleadas al replicar el patrón actual de cultivos. Sin embargo, para la obtención de los valores utilizados en las matrices de pago para los escenarios A y B se utilizan las restricciones planteadas en el capítulo 4, cuya función es la de generar valores que optimicen ambos objetivos pero que al menos sea posible obtener una utilidad neta igual o mayor a la del esquema actual de cultivos con los recursos disponibles.

En el Cuadro 5.2 se presentan las matrices de pago del modelo base, así como de los escenarios planteados en el modelo de programación compromiso.

Cuadro 5.2 Matrices de pago del escenario base y de los escenarios A y B. Cifras en Miles de pesos y miles de m³.

	Modelo base		Escenario A		Escenario B	
	MG	MA	MG	MA	MG	MA
Max. ganancia (MG)	2,374,193	2,117,649	2,558,324	2,117,649	2,624,577	2,117,649
Min. Consumo de agua (MA)	5,492	60,625	2,374,193	1,586,625	2,374,193	1,483,018

Fuente: elaboración propia con datos de los modelos utilizados.

En la matriz de pagos quedan representados en la diagonal principal los valores que se obtienen al optimizar por separado los objetivos que se encuentran en conflicto. Así, para el modelo base el valor máximo que se puede obtener para maximizar la ganancia con el patrón actual de cultivos es de 2,374,193 miles de pesos utilizando para ello un volumen de agua de 2,117,649 miles m³; en contraste, al minimizarse el consumo de agua el valor asignado es de 60,625 miles de m³ con los cuales solo es posible conseguir una ganancia de 5,492 miles de pesos.

Para el escenario A, donde se considera incrementar la superficie de hortalizas un 15% y disminuir esta superficie en el cultivo de forrajes, el valor que se obtiene al maximizar la ganancia asciende a 2,558,324 miles de pesos utilizando para ello todo el volumen de agua disponible en el modelo base; ahora bien, si se optimiza la función de minimizar el consumo de agua el valor que toma esta función objetivo es de 1,568,625 miles de m³ de agua y con ello es posible obtener el mismo valor de la ganancia generada por el patrón actual de cultivos. Finalmente, se muestran los datos correspondientes al Escenario B, donde se estima un incremento en la superficie del grupo hortalizas del 30% es posible obtener un valor de 2,624,577 millones de pesos utilizando el mismo volumen de agua asignado al modelo base y, al minimizar el consumo de agua se asigna un valor óptimo de 1,483,018 miles de m³ de agua para obtener el mismo nivel de ganancia que en el modelo base.

5.2.2 Método de las restricciones

El objetivo de presentar resultados del modelo base y de cada uno de los escenarios bajo esta metodología es el de mostrar el comportamiento de la estructura productiva para cada nivel de agua estimado dentro del rango máximo y mínimo mostrado dentro de la matriz de pagos (Cuadro 5.2). El uso de esta herramienta de programación multiobjetivo es muy intuitivo, sin embargo, dentro del contexto del problema de estudio será utilizada para observar cuales cultivos son más sensibles a los cambios en la disponibilidad de agua de acuerdo a la tecnología de riego utilizada para realizar dichas actividades.

5.2.2.1 Método de las restricciones aplicado al modelo base

El Cuadro 5.3 presenta los resultados obtenidos para el modelo base bajo la tecnología de riego por gravedad. Se puede observar que en el modelo base, para esta tecnología de riego en particular, los cultivos que presentan mayor sensibilidad al cambio en la disponibilidad de riego son el sorgo escobero, sorgo forrajero, maíz forrajero, sandía y algodón; cultivos como la alfalfa, melón, tomate rojo, chile verde y nogal presentan mejor comportamiento ante las variaciones en la disponibilidad de agua. Los granos básicos no se consideran dentro del análisis puesto que la restricción de mínima superficie para ellos cumple la función de que a cualquier solución sean incluidas las mismas unidades observadas durante el periodo de referencia, para ambas modalidades de riego.

Cuadro 5.3 Resultados del modelo base bajo el método de las restricciones en la tecnología de riego por gravedad.

Utilidad neta (miles de \$)	Volumen de agua (miles de m ³)	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
2,374,193	2,117,649	2,562	816	5,736	14,659	12,064	900	611	240	792	16,752	2,826	2,649
2,299,286	1,911,946	2,562	816	5,736	14,659	4,335	900	611	240	792	16,752	2,826	0
2,206,472	1,706,244	2,562	816	5,736	8,496	0	900	611	240	792	16,752	2,826	0
2,102,950	1,500,542	2,562	816	5,736	0	0	900	611	240	792	14,891	2,826	0
1,969,127	1,294,839	2,562	816	5,736	0	0	900	611	240	792	4,771	2,826	0
1,806,476	1,089,137	2,562	816	5,736	0	0	900	0	240	792	0	2,826	0
1,558,347	883,435	2,562	816	3,721	0	0	900	0	240	792	0	2,826	0
1,282,054	677,732	2,562	816	0	0	0	900	0	240	792	0	2,826	0
997,081	472,030	2,562	816	0	0	0	900	0	240	792	0	2,826	0
712,107	266,328	2,562	816	0	0	0	900	0	240	792	0	2,826	0
5,492	60,625	2,562	816	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia con datos del modelo base.

En el caso de los cultivos sembrados bajo la tecnología de riego por bombeo los resultados son mostrados en el Cuadro 5.4, donde se destaca que los cultivos de zacate ballico y sorgo escobero son los que muestran una pronta respuesta ante la reducción del agua para riego, otros cultivos que presentan la misma tendencia, aunque en menor proporción, son los

cultivos forrajeros como la avena, maíz y sorgo. Los cultivos que presentan mejor comportamiento antes las reducciones en la disponibilidad de agua, son las hortalizas, el nogal y en menor medida el cultivo de la alfalfa.

Cuadro 5.4 Resultados del modelo base bajo el método de las restricciones en la tecnología de riego por bombeo.

Utilidad neta (miles de \$)	Volumen de agua (miles de m ³)	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈
2,374,193	2,117,649	318	408	39	170	33,505	14,882	865	15,489	7,268	4,007	743	825	345	822	3,471	343
2,299,286	1,911,946	318	408	39	170	33,505	14,882	0	15,489	7,268	4,007	743	825	345	822	3,471	343
2,206,472	1,706,244	318	408	39	170	33,505	14,882	0	15,489	7,268	4,007	743	825	345	822	3,471	343
2,102,950	1,500,542	318	408	39	170	33,505	14,882	0	15,489	7,268	4,007	743	825	345	822	3,471	0
1,969,127	1,294,839	318	408	39	170	33,505	14,882	0	15,489	7,268	4,007	743	825	345	822	3,471	0
1,806,476	1,089,137	318	408	39	170	33,505	0	0	15,216	7,268	4,007	743	825	345	822	3,471	0
1,558,347	883,435	318	408	39	170	33,505	0	0	0	0	4,007	743	825	345	822	3,471	0
1,282,054	677,732	318	408	39	170	24,827	0	0	0	0	4,007	743	825	345	822	3,471	0
997,081	472,030	318	408	39	170	12,672	0	0	0	0	4,007	743	825	345	822	3,471	0
712,107	266,328	318	408	39	170	518	0	0	0	0	4,007	743	825	345	822	3,471	0
5,492	60,625	318	408	39	170	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia con datos del modelo base.

5.2.2.2 Método de las restricciones aplicado al Escenario A

Los resultados para este escenario, en el caso de las actividades que se realizan bajo riego por gravedad, muestran que cultivos como el sorgo forrajero, melón, sandía y chile verde no se consideran dentro del patrón de cultivo para ningún nivel de agua dado. Caso contrario en el cultivo de alfalfa el cual incrementa su participación en la medida que disminuye la disponibilidad de agua, ya que este cultivo forrajero dentro de esta modalidad de riego es el que menor lámina de riego utiliza (Cuadro 5.5).

Cuadro 5.5 Resultados del Escenario A bajo el método de las restricciones en la tecnología de riego por gravedad.

Utilidad neta (miles de \$)	Volumen de agua (miles de m ³)	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
2,558,324	2,117,649	2,562	816	8,870	24,867	0	0	0	1,265	0	16,752	2,826	2,649
2,552,850	2,064,536	2,562	816	8,870	24,867	0	0	0	1,265	0	16,752	2,826	715
2,539,900	2,011,424	2,562	816	11,570	21,824	0	0	0	1,265	0	16,752	2,826	0
2,524,924	1,958,312	2,562	816	15,757	17,637	0	0	0	1,265	0	16,752	2,826	0
2,509,949	1,905,199	2,562	816	19,943	13,451	0	0	0	1,265	0	16,752	2,826	0
2,494,973	1,852,087	2,562	816	24,130	9,264	0	0	0	1,265	0	16,752	2,826	0
2,479,997	1,798,974	2,562	816	28,317	5,077	0	0	0	1,265	0	16,752	2,826	0
2,465,021	1,745,862	2,562	816	32,503	891	0	0	0	1,265	0	16,752	2,826	0
2,443,234	1,692,750	2,562	816	34,659	0	0	0	0	0	0	15,856	2,826	0
2,408,681	1,639,637	2,562	816	34,659	0	0	0	0	0	0	13,243	2,826	0
2,374,193	1,586,625	2,562	816	34,659	0	0	0	0	0	0	10,635	2,826	0

Fuente: elaboración propia con datos del modelo correspondiente al Escenario A.

En el caso de las actividades que se realizan bajo la tecnología de riego por bombeo se aprecia, al igual que en el caso anterior, hay actividades que no se considera óptimo introducir dentro de las soluciones para cualquier nivel disponible de agua; estas actividades son el zacate ballico, avena forrajera y sorgo forrajero. En el caso de actividades forrajeras como la alfalfa y el maíz, se tiene para el primer cultivo una disminución de la superficie a medida que decrece la disponibilidad de agua y, para el segundo cultivo un incremento en la participación de la superficie destinada al mismo, bajo la misma condición. El tomate rojo tiene un comportamiento que se caracteriza por la activación de este cultivo solo en los niveles más bajos de disponibilidad de agua ya que a niveles superiores el modelo asigna esta superficie a la tecnología de riego por gravedad (Cuadro 5.6)

Cuadro 5.6 Resultados del Escenario A bajo el método de las restricciones en la tecnología de riego por bombeo.

Utilidad neta (miles de \$)	Volumen de agua (miles de m ³)	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈
2,558,324	2,117,649	318	408	39	170	30,346	0	0	39,116	0	5,645	1,557	0	1,265	822	3,471	343
2,552,850	2,064,536	318	408	39	170	30,346	0	0	39,116	0	5,645	1,557	0	1,265	822	3,471	343
2,539,900	2,011,424	318	408	39	170	27,646	0	0	42,159	0	5,645	1,557	0	1,265	822	3,471	0
2,524,924	1,958,312	318	408	39	170	23,459	0	0	46,346	0	5,645	1,557	0	1,265	822	3,471	0
2,509,949	1,905,199	318	408	39	170	19,273	0	0	50,532	0	5,645	1,557	0	1,265	822	3,471	0
2,494,973	1,852,087	318	408	39	170	15,086	0	0	54,719	0	5,645	1,557	0	1,265	822	3,471	0
2,479,997	1,798,974	318	408	39	170	10,899	0	0	58,906	0	5,645	1,557	0	1,265	822	3,471	0
2,465,021	1,745,862	318	408	39	170	6,713	0	0	63,092	0	5,645	1,557	0	1,265	822	3,471	0
2,443,234	1,692,750	318	408	39	170	4,557	0	0	63,983	0	5,645	1,557	1,265	1,265	822	3,471	0
2,408,681	1,639,637	318	408	39	170	4,557	0	0	63,983	0	5,645	1,557	1,265	1,265	822	3,471	0
2,374,193	1,586,625	318	408	39	170	4,557	0	0	63,983	0	5,645	1,557	1,265	1,265	822	3,471	0

Fuente: elaboración propia con datos del modelo correspondiente al Escenario A.

5.2.2.3 Método de las restricciones aplicado al Escenario B

Al igual que en el escenario anterior actividades como el sorgo forrajero, melón, sandía y chile verde no son parte del conjunto de las soluciones óptimas mostradas en el Cuadro 5.7. El comportamiento en el incremento de la superficie destinada a la alfalfa responde al mismo criterio presentado en el Escenario A. El cultivo de tomate de igual manera presenta el mismo comportamiento del escenario anterior ya que, se incluye toda la superficie destinada a este cultivo en el riego por gravedad, sin embargo, cuando los niveles de disponibilidad de agua descienden casi al mínimo considerado la mejor opción es realizar esta actividad con riego por bombeo. La actividad cuya superficie no varía con los descensos en el volumen de agua disponible es el cultivo de nogal, en ambas modalidades de riego para cada uno de los escenarios e incluso en el modelo base.

Cuadro 5. 7 Resultados del Escenario B bajo el método de las restricciones en la tecnología de riego por gravedad.

Utilidad neta (miles de \$)	Volumen de agua (miles de m ³)	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂
2,624,577	2,117,649	2,562	816	8,312	25,260	0	0	0	1,430	0	16,752	2,826	2,649
2,616,895	2,054,186	2,562	816	8,311	25,211	0	0	0	1,430	0	16,752	2,826	0
2,599,531	1,990,723	2,562	816	12,863	20,366	0	0	0	1,430	0	16,752	2,826	0
2,581,636	1,927,260	2,562	816	17,865	15,364	0	0	0	1,430	0	16,752	2,826	0
2,563,742	1,863,797	2,562	816	22,868	10,361	0	0	0	1,430	0	16,752	2,826	0
2,545,848	1,800,334	2,562	816	27,871	5,358	0	0	0	1,430	0	16,752	2,826	0
2,527,953	1,736,871	2,562	816	32,873	356	0	0	0	1,430	0	16,752	2,826	0
2,498,053	1,673,408	2,562	816	34,659	0	0	0	0	0	0	15,165	2,826	0
2,456,766	1,609,945	2,562	816	34,659	0	0	0	0	0	0	12,043	2,826	0
2,415,479	1,546,482	2,562	816	34,659	0	0	0	0	0	0	8,921	2,826	0
2,374,193	1,483,018	2,562	816	34,659	0	0	0	0	0	0	5,799	2,826	0

Fuente: elaboración propia con datos del modelo correspondiente al Escenario B.

El conjunto de soluciones óptimas generadas para el conjunto de cultivos replica los mismos comportamientos, para cada uno de los cultivos, descritos en el Escenario A para esta tecnología de riego en particular (Cuadro 5.8).

Cuadro 5.8 Resultados del Escenario B bajo el método de las restricciones en la tecnología de riego por bombeo.

Utilidad neta (miles de \$)	Volumen de agua (miles de m ³)	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈
2,624,577	2,117,649	318	408	39	170	30,421	0	0	37,936	0	6,381	1,761	0	1,430	822	3,471	343
2,616,895	2,054,186	318	408	39	170	30,421	0	0	37,985	0	6,381	1,761	0	1,430	822	3,471	293
2,599,531	1,990,723	318	408	39	170	25,870	0	0	42,830	0	6,381	1,761	0	1,430	822	3,471	0
2,581,636	1,927,260	318	408	39	170	20,868	0	0	47,832	0	6,381	1,761	0	1,430	822	3,471	0
2,563,742	1,863,797	318	408	39	170	15,865	0	0	52,835	0	6,381	1,761	0	1,430	822	3,471	0
2,545,848	1,800,334	318	408	39	170	10,862	0	0	57,838	0	6,381	1,761	0	1,430	822	3,471	0
2,527,953	1,736,871	318	408	39	170	5,860	0	0	62,840	0	6,381	1,761	0	1,430	822	3,471	0
2,498,053	1,673,408	318	408	39	170	4,074	0	0	63,196	0	6,381	1,761	1,430	1,430	822	3,471	0
2,456,766	1,609,945	318	408	39	170	4,074	0	0	63,196	0	6,381	1,761	1,430	1,430	822	3,471	0
2,415,479	1,546,482	318	408	39	170	4,074	0	0	63,196	0	6,381	1,761	1,430	1,430	822	3,471	0
2,374,193	1,483,018	318	408	39	170	4,074	0	0	63,196	0	6,381	1,761	1,430	1,430	822	3,471	0

Fuente: elaboración propia con datos del modelo correspondiente al Escenario B.

5.2.3 Programación Compromiso

En esta sección son expuestos los resultados obtenidos bajo este método para el modelo base y cada uno de los escenarios, así como el análisis y discusión correspondiente a cada uno de ellos.

5.2.3.1 Modelo Base

La situación actual de la Comarca Lagunera con respecto a la disponibilidad del agua es delicada, claramente existe una situación de conflicto debido a la importancia del recurso y su interrelación con las diversas actividades económicas desarrolladas dentro de la región. Por tanto, se consideró analizar el modelo base con un modelo de programación compromiso y discutir los resultados obtenidos bajo esta metodología (Cuadro 5.9).

Cuadro 5.9 Resultados del modelo base en programación lineal y programación compromiso.

Cultivo/Tecnología	Programación lineal				Programación compromiso			
	Maximizar ganancia		Min. consumo agua		Métrica L_1		Métrica L	
	Sup.	Cons. A	Sup.	Cons. A	Sup.	Cons. A	Sup.	Cons. A
Gravedad								
Maíz grano	2,562	38,717	2,562	38,717	2,562	38,717	2,562	38,717
Sorgo grano	816	14,243	816	14,243	816	14,243	816	14,243
Alfalfa	5,736	90,692					236	3,731
Maíz forrajero	14,659	284,927						
Sorgo forrajero	12,064	239,084						
Melón	900	23,202			900	23,202	900	23,202
Sandía	611	15,781						
Tomate	240	5,770			240	5,770	240	5,770
Chile	792	14,757			792	14,757	792	14,757
Algodón	16,752	340,518						
Nogal	2,826	49,025			2,826	49,025	2,826	49,025
Sorgo escobero	2,649	45,064						
Bombeo								
Trigo	318	2,245	318	2,245	318	2,245	318	2,245
Maíz grano	408	4,047	408	4,047	408	4,047	408	4,047
Frijol	39	301	39	301	39	301	39	301
Sorgo grano	170	1,071	170	1,071	170	1,071	170	1,071
Alfalfa	33,505	567,039					33,505	567,039
Avena forrajera	14,882	90,795						
Zacate	865	7,470						
Maíz forrajero	15,489	121,805						
Sorgo forrajero	7,268	54,183						
Melón	4,007	27,224			4,007	27,224	4,007	27,224
Sandía	743	5,570			743	5,570	743	5,570
Tomate	825	5,357			825	5,357	825	5,357
Chile	345	3,088			345	3,088	345	3,088
Algodón	822	5,343			822	5,343	822	5,343
Nogal	3,471	57,605			3,471	57,605	3,471	57,605
Sorgo escobero	343	2,723						
Total	144,107	2,117,649	4,313	60,625	19,284	257,566	53,025	828,336

Fuente: elaboración propia con datos del modelo base

En el cuadro superior se observa los resultados obtenidos por ambas técnicas de programación aplicadas al modelo base. El modelo utilizado para optimizar los objetivos en conflicto con la metodología de programación lineal muestra resultados con una notable diferencia, ya que el maximizar la ganancia total para el patrón de cultivos actual conlleva al uso de todo el recurso agua disponible para ello, sin embargo, el minimizar el consumo de agua significa que solo se deban realizar aquellas actividades indispensables como es la producción de granos básicos. Las diferencias entre uno y otro escenario son significativas, ya que la reducción de la superficie sembrada y el uso de agua para realizar las actividades

seleccionadas descienden 97%. En cuanto a la diferencia entre las utilidades netas obtenidas en ambas funciones objetivos, resalta la disminución de la misma en 99.8%.

Cuando es utilizada la programación compromiso se definen dos valores lo cuales acotan el conjunto compromiso y las soluciones más cercanas al punto ideal. En este caso, las métricas L_1 y L_∞ representan el conjunto de soluciones eficientes que resulta al optimizar las funciones objetivos planteadas con anterioridad para el modelo base, considerando las restricciones planteadas con anterioridad. Debido a la condición natural del conflicto que existe entre los dos objetivos y dadas las restricciones planteadas para replicar el patrón actual de cultivos, los resultados entre una y otra métrica muestran diferencias significativas por ello se analizan cada una por separado con respecto al patrón actual de cultivos.

La métrica L_1 , como fue señalado anteriormente es considerada la solución más eficiente del conjunto compromiso, los resultados obtenidos para el modelo base en comparación con el patrón actual de cultivos muestran diferencias notables. La reducción más importante es la relacionada con la superficie destinada a los forrajes ya que en esta solución del conjunto compromiso no se considera sembrar alguna de las actividades pertenecientes a este grupo en ambas modalidades de riego. También se eliminan del patrón de cultivo actividades como la siembra de sandía, algodón y sorgo escobero bajo la modalidad de riego por gravedad, en este último cultivo también se elimina bajo la modalidad de riego por bombeo. Con estos cambios, la superficie total sembrada será de 19,284 ha y para ello serán destinadas 257,566 miles de m^3 de agua para riego, es decir, se reduce la superficie en 86.6% y el consumo de agua en 87.8%. Con respecto a la utilidad, en esta solución se obtiene un monto total de \$699,969 miles de pesos, lo cual es menor en un 70.5% con respecto a lo obtenido actualmente con el esquema de cultivos de la región (Cuadro 5.10).

Cuadro 5.10 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_1 del modelo base.

	Patrón actual	Métrica L_1	Diferencia	(%)
Superficie (ha)	144,107	19,284	124,823	86.6
Consumo de agua (miles de m^3)	2,117,649	257,566	1,860,083	87.8
Mano de obra (jornales)	4,517,491	1,657,437	2,860,054	63.3
Utilidad neta (miles de \$)	2,374,193	699,969	1,674,224	70.5

Fuente: elaboración propia con datos del modelo base.

En lo referente a la métrica L_1 , la cual se considera como la solución más equilibrada del conjunto compromiso, se puede resaltar que bajo la modalidad de riego por gravedad salen del patrón de cultivo la producción de forrajes (excepto alfalfa), sandía, algodón y sorgo escobero. En cambio, para la modalidad de riego por bombeo se eliminan todas las actividades relacionadas con la producción de forrajes, excepto la producción de alfalfa la cual queda en la misma proporción que en el modelo base, de igual forma es eliminada la superficie destinada a la producción de sorgo escobero. En comparación con el modelo

base, las reducciones en cuanto a superficie sembrada son de 63.2%, en agua de riego de 60.9% y de la utilidad en 37.2% (Cuadro 5.11).

Cuadro 5.11 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_1 del modelo base.

	Patrón actual	Métrica L_1	Diferencia	(%)
Superficie (ha)	144,107	53,025	91,082	63.2
Consumo de agua (miles de m ³)	2,117,649	828,336	1,289,313	60.9
Mano de obra (jornales)	4,517,491	2,399,739	2,117,752	46.9
Utilidad neta (miles de \$)	2,374,193	1,490,146	884,047	37.2

Fuente: elaboración propia con datos del modelo base.

5.2.3.2 Escenario A

Este escenario considera la posibilidad de incrementar la superficie destinada a la producción de hortalizas en 15% y reducir la superficie destinada al grupo de forrajes en la misma medida que crece el área sembrada de hortalizas. Los resultados obtenidos para el presente escenario son analizados en comparación con los datos observados del patrón actual de cultivos para cada una de las métricas que componen el conjunto compromiso (Cuadro 5.12).

Cuadro 5.12 Resultados obtenidos en el escenario A y diferencias con respecto al modelo base.

Cultivo/Tecnología	Sup. Patrón actual (ha)	Sup. Escenario B (ha)		Variación absoluta		Variación porcentual	
		L_1	L_2	Dif. 1	Dif. 2	Dif. 1	Dif. 2
Gravedad							
Maíz grano	2,562	2,562	2,562	0	0	0.0	0.0
Sorgo grano	816	816	816	0	0	0.0	0.0
Alfalfa	5,736	34,659	27,728	28,923	21,992	504.2	383.4
Maíz forrajero	14,659	0	0	-14,659	-14,659	-100.0	-100.0
Sorgo forrajero	12,064	0	0	-12,064	-12,064	-100.0	-100.0
Melón	900	0	0	-900	-900	-100.0	-100.0
Sandía	611	0	0	-611	-611	-100.0	-100.0
Tomate	240	0	1,265	-240	1,025	-100.0	427.1
Chile verde	792	0	0	-792	-792	-100.0	-100.0
Algodón	16,752	16,752	16,752	0	0	0.0	0.0
Nogal	2,826	2,826	2,826	0	0	0.0	0.0
Sorgo escobero	2,649	0	0	-2,649	-2,649	-100.0	-100.0
Bombeo							
Trigo	318	318	318	0	0	0.0	0.0
Maíz grano	408	408	408	0	0	0.0	0.0
Frijol	39	39	39	0	0	0.0	0.0
Sorgo grano	170	170	170	0	0	0.0	0.0
Alfalfa	33,505	4,557	11,488	-28,948	-22,017	-86.4	-65.7
Avena forrajera	14,882	0	0	-14,882	-14,882	-100.0	-100.0
Zacate ballico	865	0	0	-865	-865	-100.0	-100.0
Maíz forrajero	15,489	63,983	58,317	48,494	42,828	313.1	276.5
Sorgo forrajero	7,268	0	0	-7,268	-7,268	-100.0	-100.0
Melón	4,007	5,645	5,645	1,638	1,638	40.9	40.9
Sandía	743	1,557	1,557	814	814	109.6	109.6
Tomate	825	1,265	0	440	-825	53.3	-100.0
Chile verde	345	1,265	1,265	920	920	266.7	266.7
Algodón	822	822	822	0	0	0.0	0.0
Nogal	3,471	3,471	3,471	0	0	0.0	0.0
Sorgo escobero	343	0	0	-343	-343	-100.0	-100.0
Total	144,107	141,115	135,449	-2,992	-8,658	-2.1	-6.0

Fuente: elaboración propia con datos del modelo utilizado para el escenario A.

La comparación de los resultados obtenidos en la métrica L_1 contra lo observado en el patrón actual de cultivos en la Comarca Lagunera muestra la diferencia entre la utilidad neta que se actualmente se obtiene y lo que se podría obtener bajo esta solución, ya que se pueden obtener 80,885 miles de pesos más si es aplicado el patrón de cultivos que sugiere esta solución lo cual representa un incremento del 3.4% sobre la ganancia actual, y para ello fue requerido 1.2% adicional de jornales para el desarrollo de las actividades

seleccionadas. Sin embargo, se utiliza 19.2% menos de agua (406,694 miles de m³) en la solución generada al evaluar la métrica L_1 contra lo que actualmente se consume en la Región Lagunera (Cuadro 5.13).

Cuadro 5.13 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_1 del escenario A.

	Patrón actual	Métrica L_1	Diferencia	(%)
Superficie (ha)	144,107	141,115	-2,992	-2.1
Consumo de agua (miles de m ³)	2,117,649	1,710,955	-406,694	-19.2
Mano de obra (jornales)	4,517,491	4,570,594	53,103	1.2
Utilidad neta (miles de \$)	2,374,193	2,455,078	80,885	3.4

Fuente: elaboración propia con datos del modelo base y escenario A.

Esta solución del conjunto compromiso, disminuye en 2.1% la superficie destinada a la producción de las actividades seleccionadas por el modelo. Las diferencias en la distribución de la superficie del patrón de cultivos incluyen el considerable aumento de la superficie sembrada de alfalfa bajo riego de gravedad en 28,923 ha con respecto al modelo base y, la eliminación de otras actividades destinadas a la producción de forraje, hortalizas y sorgo escobero en la misma modalidad de riego. Bajo la modalidad de riego por bombeo destacan cambios en la estructura productiva como, la disminución de la superficie destinada a la producción de alfalfa en 86.4% (28,948 ha) y el incremento sustancial de la superficie sembrada de maíz forrajero en 48,494 ha, así también existen incrementos en la superficie de actividades relacionadas a la producción de hortalizas, debido a que todas las actividades de este grupo se concentran en riego por bombeo.

Con respecto a la métrica L_i , la superficie total para el desarrollo de las actividades seleccionadas asciende a 135,449 ha superficie menor a la del escenario base en 6.0%, y para ello fueron utilizados 1,696,312 miles de m³ de agua (Cuadro 5.14). Esta cantidad es inferior al volumen total utilizado en el modelo base en 19.9%, sin embargo, se obtiene un beneficio neto de \$2,430,395 miles de pesos el cual es superior al obtenido en el modelo base en 56,202 miles de pesos (2.4%). También se observa una pequeña disminución de 0.7% en el valor de la cantidad de mano de obra requerida.

Cuadro 5.14 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_i del escenario A.

	Patrón actual	Métrica L_i	Diferencia	(%)
Superficie (ha)	144,107	135,449	-8,658	-6.0
Consumo de agua (miles de m ³)	2,117,649	1,696,312	-421,337	-19.9
Mano de obra (jornales)	4,517,491	4,488,134	-29,357	-0.7
Utilidad neta (miles de \$)	2,374,193	2,430,395	56,202	2.4

Fuente: elaboración propia con datos del modelo base y escenario A.

La distribución de la superficie sembrada para ciertos cultivos sufre cambios, en la modalidad de riego por gravedad la superficie sembrada de alfalfa se incrementa en 21,992 ha y la referente al cultivo de tomate en 1,025 ha. Desaparecen del área de cultivo las actividades de la producción como maíz forrajero, sorgo forrajero, melón, sandía, chile

verde y sorgo escobero. En cuanto al área correspondiente al riego por bombeo los cambios corresponden a una reducción del 65.7% (22,017 ha) en la superficie correspondiente al cultivo de alfalfa y un incremento del 276.5% (42,828 ha) en el área sembrada de maíz forrajero. En cuanto a los cambios en la estructura destinada a la producción de hortalizas se presenta la desaparición de la superficie ocupada por el tomate; sin embargo, cultivo de melón crece 41% (1,638 ha), en sandía 110% (814 ha), en tomate 53% (440 ha) y en chile verde 267% (920 ha). En ambas soluciones los cultivos que no son considerados dentro del patrón de cultivo son la avena forrajera, zacate ballico, sorgo forrajero y sorgo escobero.

5.2.3.3 Escenario B

En este escenario se presenta el supuesto de incrementar la superficie destinada a la producción de hortalizas en 30%, cantidad que será reducida de la superficie ocupada por el grupo de los forrajes. Los resultados producto del presente escenario son analizados en comparación con los datos observados del patrón actual de cultivos para cada una de las métricas que componen el conjunto compromiso (Cuadro 5.15). Como se puede apreciar en el cuadro inferior, las diferencias entre las soluciones que acotan el conjunto compromiso son mínimas en comparación con la solución anterior con respecto a la distribución de la superficie entre las actividades seleccionadas.

Cuadro 5.15 Resultados obtenidos en el escenario B y diferencias con respecto al modelo base.

Cultivo/Tecnología	Sup. Patrón actual (ha)	Sup. Escenario B (ha)		Variación absoluta		Variación porcentual	
		L_1	L	Dif. 1	Dif. 2	Dif. 1	Dif. 2
Gravedad							
Maíz grano	2,562	2,562	2,562	0	0	0.0	0.0
Sorgo grano	816	816	816	0	0	0.0	0.0
Alfalfa	5,736	34,659	33,267	28,923	27,531	504.2	480.0
Maíz forrajero	14,659	0	0	-14,659	-14,659	-100.0	-100.0
Sorgo forrajero	12,064	0	0	-12,064	-12,064	-100.0	-100.0
Melón	900	0	0	-900	-900	-100.0	-100.0
Sandía	611	0	0	-611	-611	-100.0	-100.0
Tomate	240	0	1,392	-240	1,152	-100.0	480.0
Chile	792	0	0	-792	-792	-100.0	-100.0
Algodón	16,752	16,752	16,752	0	0	0.0	0.0
Nogal	2,826	2,826	2,826	0	0	0.0	0.0
Sorgo escobero	2,649	0	0	-2,649	-2,649	-100.0	-100.0
Bombeo							
Trigo	318	318	318	0	0	0.0	0.0
Maíz	408	408	408	0	0	0.0	0.0
Frijol	39	39	39	0	0	0.0	0.0
Sorgo	170	170	170	0	0	0.0	0.0
Alfalfa	33,505	4,074	5,466	-29,431	-28,039	-87.8	-83.7
Avena forrajera	14,882	0	0	-14,882	-14,882	-100.0	-100.0
Zacate	865	0	0	-865	-865	-100.0	-100.0
Maíz forrajero	15,489	63,196	63,196	47,707	47,707	308.0	308.0
Sorgo forrajero	7,268	0	0	-7,268	-7,268	-100.0	-100.0
Melón	4,007	6,381	6,381	2,374	2,374	59.2	59.2
Sandía	743	1,761	1,761	1,018	1,018	137.0	137.0
Tomate	825	1,430	38	605	-787	73.3	-95.4
Chile	345	1,430	1,430	1,085	1,085	314.5	314.5
Algodón	822	822	822	0	0	0.0	0.0
Nogal	3,471	3,471	3,471	0	0	0.0	0.0
Sorgo escobero	343	0	0	-343	-343	-100.0	-100.0
Total	144,107	141,115	141,115	-2,992	-2,992	-2.1	-2.1

Fuente: elaboración propia con datos del modelo utilizado para el escenario B.

La métrica L_1 en comparación con la actual estructura de producción, en cuanto a lo relativo a la superficie total varía en 2.1%. La utilidad neta total alcanzable bajo esta solución asciende a \$ 2,519,041 miles de pesos, cantidad superior en 6.1% a la obtenida en el modelo base y para ello se utilizó 19.5% menos agua de riego. En lo relativo a la demanda de mano de obra se presenta un favorable incremento de 4.7% en los jornales requeridos para efectuar las actividades seleccionadas (Cuadro 5.16).

Cuadro 5.16 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_1 del escenario B.

	Patrón actual	Métrica L_1	Diferencia	(%)
Superficie (ha)	144,107	141,115	-2,992	-2.1
Consumo de agua (m ³)	2,117,649	1,705,670	-411,979	-19.5
Mano de obra (jornales)	4,517,491	4,730,949	213,458	4.7
Utilidad neta (\$)	2,374,193	2,519,041	144,848	6.1

Fuente: elaboración propia con datos del modelo base y Escenario B.

Las modificaciones en la distribución de la superficie entre las actividades seleccionadas se analizan de acuerdo al tipo de tecnología de riego utilizada. En el caso de riego por gravedad el cambio más notable es en el área destinada a la producción de alfalfa la cual aumenta en 28,923 ha; se eliminan de la estructura productiva las superficies destinadas a otros cultivos forrajeros, hortalizas y sorgo escobero. En las áreas de riego por bombeo los cambios relevantes corresponden un reducción del 88% en la superficie dedicada a la producción de alfalfa (29,431 ha), y el incremento de 47,707 ha destinadas a la producción de maíz forrajero, también, se presentan variaciones positivas en los cultivos relacionados con la producción de hortalizas, éstas actividades presentan un mayor beneficio neto por m³ de agua si se efectúan bajo riego por bombeo por ello la solución óptima las reasigna en su totalidad hacia esta modalidad de riego. Dentro de esta solución no son consideradas las actividades de producción como el cultivo de avena forrajera, zacate ballico, sorgo forrajero y sorgo escobero.

En lo respectivo a la métrica L_1 , el patrón de cultivos generado muestra una reducción en la superficie total de las actividades seleccionadas en igual magnitud que la solución anterior. Se utilizó 18.2% menos agua y el beneficio neto en este escenario fue mayor al obtenido en el modelo base en \$152,285 miles de pesos. El uso de la mano de obra presenta un incremento positivo de 4.8% (Cuadro 5.17).

Los cambios en la distribución de la superficie de riego por gravedad son el incremento de 27,531 ha destinadas a la producción de alfalfa y 1,152 a la producción de tomate, salen de la estructura de producción los cultivos de maíz forrajero, sorgo forrajero, melón, sandía, chile verde y sorgo escobero. En lo referente a la superficie destinada a riego por bombeo se presentan cambios en la disminución del área sembrada de alfalfa en 28,039 ha y la destinada al cultivo de tomate en 95%. Sufren variaciones positivas la producción de maíz forrajero cuya superficie incrementa 47,707 ha, en melón crece 59% (2,374 ha), en sandía 137% (1,018 ha) y chile verde en 314% (1,085 ha). Salen de la solución las mismas actividades mencionadas en la métrica L_1 .

Cuadro 5.17 Utilidad neta y nivel de recursos utilizados en la solución L_{∞} .

	Patrón actual	Métrica L_{∞}	Diferencia	(%)
Superficie (ha)	144,107	141,115	-2,992	-2.1
Consumo de agua (miles de m ³)	2,117,649	1,731,647	-386,002	-18.2
Mano de obra (jornales)	4,517,491	4,733,733	216,242	4.8
Utilidad neta (miles de \$)	2,374,193	2,526,478	152,285	6.4

Fuente: elaboración propia con datos del modelo base y Escenario B.

5.3 Precios Sombra y eficiencia de riego

El precio sombra se define como la mejora en el valor de la función objetivo por aumento de una unidad adicional de agua. En otros términos, este valor representa la cantidad máxima a la cual se tendría disposición a pagar por obtener una unidad adicional del recurso para efectuar las actividades consideradas dentro del patrón de cultivo. En todos los modelos analizados el precio sombra del agua de bombeo es superior al precio del agua superficial debido a que el agua de bombeo tiene una mayor productividad, es decir, se requiere menos agua para producir una unidad de producto (Cuadro 5.18).

Cuadro 5.18 Precio sombra y eficiencia de riego por tipo de tecnología en cada modelo evaluado.

	Patrón actual		Escenario A		Escenario B	
	Gravedad	Bombeo	Gravedad	Bombeo	Gravedad	Bombeo
Precio sombra (\$/m ³)	0.17	0.22	0.20	0.35	0.20	0.35
Eficiencia de riego (\$/m ³)	0.68	1.65	1.21	1.69	1.24	1.76

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de los modelos.

En lo que respecta a la eficiencia de riego, la cual se define como la razón entre la utilidad neta obtenida y el volumen consumido de agua, se observa que en el escenario base la eficiencia en riego de gravedad es muy baja ya que, en México los usuarios del agua en el sector agrícola están exentos del cobro del derecho por uso de aguas nacionales, pero solo pagan una cuota por la operación y mantenimiento de la infraestructura federal; y esto provoca que las láminas de riego aplicadas sean excesivas y no haya conciencia del verdadero valor económico y ambiental del agua. Para el caso de riego por bombeo, la eficiencia es mucho mayor, ya que se incurre en costos mayores por la operación y mantenimiento de la infraestructura para la extracción del recurso y, esto motiva a hacer un uso más eficiente del recurso a través del uso de tecnologías de riego para realizar las actividades agrícolas consideradas dentro del modelo. Si se compara la eficiencia de riego en el modelo base contra la obtenida en los escenarios planteados se obtiene un 78% de incremento en la eficiencia de riego por gravedad entre el patrón actual y el propuesto en el escenario A, y de 82% si pasamos al escenario B. En cambio, los incrementos en la eficiencia de riego en bombeo son menores ya que solo se logra un incremento de 2.4% cuando se pasa del patrón actual al escenario A y, 6.7% si pasamos al escenario B.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Conforme a los resultados obtenidos y al análisis de los mismos en el presente estudio, se presentan las siguientes conclusiones:

- a) El patrón actual de cultivos en la Comarca Lagunera se encuentra estrechamente interrelacionado con las actividades pecuarias desarrolladas en la región, esto es claramente observable en la creciente participación de la superficie ocupada por las actividades relacionadas con la producción de forraje dentro de la estructura productiva. Sin embargo, dada las condiciones naturales de la región y su limitado acceso a los recursos hidrológicos es importante analizar las posibilidades, dentro de lo permisible, de reestructurar el patrón de cultivos para garantizar la sustentabilidad de la actividad agrícola.
- b) La existencia de la actual distribución de la superficie destinada a la agricultura de riego entre los diversos cultivos que se desarrollan en ella no es eficiente ya que, se incentiva a actividades que utilizan mayor cantidad de agua para su desarrollo pero su beneficio neto por m³ de agua utilizado es muy bajo. Uno de estos incentivos es el subsidio que existe para el consumo de agua de riego, debido a que la cuota que pagan los productores no refleja el verdadero valor económico y ambiental del recurso.
- c) Los resultados producto de los escenarios planteados muestran que pequeños incrementos, en términos absolutos (1,269 ha), de la superficie destinada a la producción de hortalizas contribuyen a una mejor asignación del agua, incrementan el ingreso total de los productores e incluso promueve el desarrollo rural al incrementarse la demanda de jornales dentro de la región.
- d) Las soluciones óptimas de los escenarios analizados bajo el método de programación compromiso demuestran que es posible obtener mayor ganancia económica utilizando para ello menor cantidad de agua en la agricultura de riego de la región, aún sin afectar considerablemente la superficie y la producción de forrajes la cual solo se disminuye en 1.2% y 2.4%, respectivamente, en los escenarios planteados en el presente trabajo.
- e) Los resultados obtenidos con el uso del método de las restricciones muestran el comportamiento de los cultivos bajo diferentes niveles de disponibilidad de agua, con ello se puede determinar cuáles cultivos deben ser considerados como factible fomentar y cuáles deben ser sustituidos debido a que bajo ciertos niveles de disponibilidad de agua no es conveniente introducirlos dentro del patrón de cultivo.

- f) Una mejor planeación de la estructura productiva en la región conduce a un incremento en la eficiencia del agua de riego de hasta 82%, sobre todo en las actividades que se realizan bajo riego por gravedad donde este valor dado el patrón actual de cultivo es muy pobre y es prueba evidente de que se hace un uso muy ineficiente del recurso para efectuar las actividades consideradas dentro del modelo.
- g) Los precios sombra del agua para ambas modalidades de riego, representan el valor de uso del recurso en la región y pueden ser utilizados como referentes para establecer cuotas, precios y/o tarifas del agua.

6.2 Recomendaciones

- a) Dado las condiciones naturales de la región y su vulnerabilidad con respecto a la disponibilidad de agua, se considera pertinente inducir cambios en el sector agrícola debido que siendo el mayor consumidor de agua limita la cantidad disponible del recurso para el resto de los usuarios.
- b) Una de las áreas de oportunidad donde es conveniente inducir un cambio, es en la planeación de la distribución de la superficie agrícola de riego, ya que en la actualidad se da prioridad a cultivos cuyo consumo de agua es muy alto y generan menor aportación al valor de la producción. Sin embargo, es conveniente considerar la sustentabilidad del actual patrón de cultivos; en la presente investigación los resultados obtenidos en los escenarios planteados se demuestra que existen otras actividades agrícolas, como la producción de hortalizas, a las que si se le asigna mayor prioridad pueden generar mayor valor agregado, disminuir el consumo de agua e incentivar la economía rural al demandar mayor cantidad de mano de obra.
- c) También es importante la adopción de tecnologías que minimicen el desperdicio de agua en el distrito de riego. Una forma de inducir este cambio es a través de la reducción de los subsidios al agua de riego el cual distorsiona la apreciación de los productores sobre el verdadero valor del recurso. De esta manera, inducir un cambio tecnológico es factible para la sustentabilidad de la actividad agrícola en la región y dado que esto requiere un monto considerable de inversión de manera indirecta serán los propios productores quienes adopten cultivos cuyo beneficio neto por m³ de agua sea mayor.

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

Arenas Parra, Mar, et al., 1999. Aplicación del Entorno MATLAB a la Programación Multiobjetivo en Ambiente Difuso. Revista Rect@. Vol. Actas_7. España.

Ballestero E., Romero C., 1991. A theorem connecting utility function optimization and compromise programming. Oper Res Lett 10, 412-427.

Ballestero y Romero (1993). “Weighting in Compromise Programming: A Theorem on Shadow Prices”. *Operations Research Letters*, Vol. 13, n° 1, pp. 325-329.

Ballestero y Romero (1998). *Multiple Criteria Decision Making and its Applications to Economic Problems*. Ed. Kluwer Academic Publishers. Boston.

Bazaraa, Mokhtar S., et al. 2009. Linear programming and network flows. Fourth edition. John Wiley & Sons, Inc.

Bueno, Graciela. 1987. Introducción a la programación lineal y análisis de sensibilidad. Editorial Trillas. México, D.F.

CETENAL-UNAM, 1970. Carta de climas, escala 1:500,000, Instituto de Geografía, México.

Cohon, J. L. 1978. Multiobjective programming and planning. Ed. Academic Press. New York.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 1998. Lineamientos Estratégicos para el Desarrollo Hidráulico de la Región Administrativa “Cuencas Centrales del Norte”. Subdirección General de Programación.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 2001. Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2005. Gerencia Regional de las Cuencas Centrales del Norte.

Comisión Nacional del Agua (CNA). Gerencia Regional de las Cuencas Centrales del Norte Programa Hidráulico de Gran Visión 2001-2020, de la Región VII Cuencas Centrales del Norte. Síntesis Básica.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 2002. Estudio de Actualización Continua de Conocimiento del Acuífero Principal Región Lagunera Coahuila-Durango.

Comisión Nacional del Agua (CNA). Informe de Distribución de Aguas de Riego de los ciclos agrícolas 1999-2000, 2000-2001, 2001-2002. Región Lagunera Coahuila-Durango.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 2003. Estadísticas del agua en México. Un producto del Sistema Unificado (SUIBA). Pág. 17.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2004. Estadísticas del agua en México, edición 2004. Documento de divulgación

Comisión Nacional del Agua (CNA), 2006. Reglamento de la Comisión Nacional del Agua. Segob-Diario Oficial de la Federación. México.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2007. Estadísticas del agua en México, edición 2007. Documento de divulgación.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2008. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Documento de divulgación.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2011. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Documento de divulgación.

Consejo Nacional de Población (CONAPO). Proyecciones de la Población en México 2000-2050. Coahuila-Durango. Página Web.

Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2000. Estructura de la Población por Edades. Coahuila-Durango. Página Web.

El Siglo de Torreón, 2011. Suplemento especial: Resumen Económico Comarca Lagunera 2010. Cía. Editora de la Laguna. Torreón; Coahuila, México.

FAO, 2001. Programación lineal para la elaboración de escenarios óptimos de uso de la tierra: un método para el ordenamiento territorial basado en la evaluación de tierra con estudios de caso de Brasil y Chile. Informe técnico N° 3. Santiago de Chile.

Fernandez-Zamudio, María de los Ángeles y Miguel Gómez María de Dolores. 2006. Sustainable management for woody crops in Mediterranean dry-lands. Spanish Journal of Agricultural Research.

Ganoulis, Jacques; et. Al. 2003. Multicriterion decision analysis for evaluating water use in agriculture: a case study from Greece. *UNESCO Chair and Network INWEB: International Network of Water/Environment Centres for the Balkans, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece.* <http://www.inweb.gr>

García Aguado, Ana María, 1998. Programación Estocástica por Metas, Teoría y Aplicaciones Económicas. Tesis Doctoral. Madrid, España.

García E., 2004. El Manejo del Agua en Laguna, México. Pp. 1-6.

García Salazar, José A. 2006. Notas sobre modelos de equilibrio espacial e intertemporal. Primera edición. Colegio de Postgraduados

Gobierno del Estado de Coahuila, 2005. Plan Estatal de Desarrollo 2000-2005.

Godoy A.C. y Pérez-G, 2003. Uso de Agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía en Informática (INEGI), 2000. XII Censo Nacional de Población y Vivienda.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía en Informática (INEGI), 2002a. Anuario Estadístico del Estado de Coahuila.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía en Informática (INEGI), 2002b. Anuario Estadístico del Estado de Durango.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía en Informática (INEGI), 2010. XIII Censo Nacional de Población y Vivienda.

Lakshminarayan, P.G. et. al. 1991. Compromise solution for economic-environmental decisions in agriculture. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University, EE.UU.

Levine G., Cruz A. (1998). Aguas subterráneas en el Distrito de Riego 017, Región Lagunera, México. IWMI, Serie Latinoamericana No.3. Instituto Nacional de Manejo del Agua.

Marglin, J.A., 1967. Public investment criteria. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, EE.UU.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 2006. Water a shared responsibility: The United Nations World Water Development Report 2.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 2009. Water in a changing world: The United Nations World Water Development Report 3.

Ortega-Gaucin, David et. al. 2009. Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego. TERRA Latinoamericana, Vol. 27, Núm. 3, julio-septiembre, 2009, pp. 219-226. Universidad Autónoma Chapingo. México

Ortigoza Rufino J. 2005. Fuentes de Crecimiento de la Demanda de Agua en La Comarca Lagunera. Tesis Maestría, Centro de Economía, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. México.

Pérez Gadish, Blanca, et al., 2002. Aplicación de la programación compromiso la gestión de listas de espera quirúrgicas de un hospital público. Estudios de Economía Aplicada. Vol. 20. Madrid, España.

Romero Carlos, Rehman, Tahir. 1986. La programación multiobjetivo y la planificación agraria: algunas consideraciones teóricas. Agricultura y Sociedad. Num. 40. Pp 9-35

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria 2002, 2007, 2008, 2009. Región Lagunera Coahuila-Durango.

Shiklomanov, I. A. y Rodda, J. C. 2003. *World Water Resources at the Beginning of the 21st Century*. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.

Soto Balderas José y Gómez Guijarro María Magdalena. Enero de 2009. Problemática ambiental en la Región Lagunera. Disponibilidad, extracción y calidad del agua. CIENCIACIERTA No.17. Torreón, Coahuila

Trujillo, Juan José. 1984. Elementos de ingeniería industrial. Sexta edición. Ed. Limusa. México, D.F.

Varian, H.R. 2011. Microeconomía Intermedia. Un enfoque moderno. 8ª ed. Editorial Antoni Bosch Editor, S.A. Barcelona. España

Willis, C. y R. Perlack, 1980. "Multiple objective decision-making: Generating techniques of goal programming". Southern Journal of Agricultural Economics 1:199-204.

Yu P. L., (1973). "A class of solutions for group decision problems". *Management Science*, Vol.19, nº 1, pp. 936-946.

Zeleny, M. (1973). "Compromise Programming". *Multiple Criteria Decision Making* (Cochrane J. L; Zeleny M; editors). University of South Carolina Press, Columbia, pp. 262-301.

Zeleny, M. (1974a). "A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideal". *Computers and Operations Research*, Vol. 1,n° 1, pp. 479-496.

Zeleny, M. (1974b). *Linear Multiobjective Programming*. Ed. Springer-Verlag. Berlín.