

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
Y MANEJO EFICIENTE DEL AGUA EN UN SISTEMA
DE IRRIGACIÓN

POR

I.C. NÉSTOR MIGUEL CID GARCÍA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

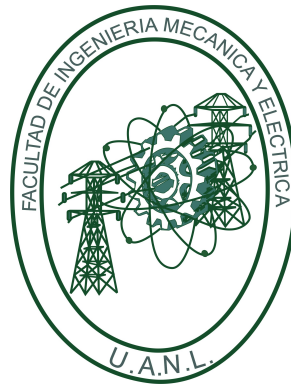
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MAYO 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
Y MANEJO EFICIENTE DEL AGUA EN UN SISTEMA
DE IRRIGACIÓN

POR

I.C. NÉSTOR MIGUEL CID GARCÍA

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MAYO 2012

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Planificación de la producción agrícola y manejo eficiente del agua en un sistema de irrigación», realizada por el alumno I.C. Néstor Miguel Cid García, con número de matrícula 1541924, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

Dra. Yasmín A. Ríos Solís

Director

Dr. Ángel Gabriel Bravo Lozano

Revisor

Dr. Igor Litvinchev

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, mayo 2012

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas valerosas que han puesto su granito de arena en mi formación profesional y en el desarrollo de este proyecto, para ellas toda mi admiración y respeto.

*A mi querida esposa, Yolanda Enríquez,
por ser la estrella más brillante que ilumina mi horizonte.*

*A mis padres, Jaime Cid y Ana María García, a mis hermanos,
a mis abuelitos y a toda mi familia, por haberme formado
como una persona de bien y porque gracias a ellos soy lo que soy.*

*A mis amigos y profesores,
por que este trabajo también es fruto de todo el esfuerzo que ellos han realizado.*

N. Cid

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a Dios por el don de la vida y por haberme puesto en este camino, sin Él nada de esto hubiera sido posible.

Mi más profundo agradecimiento a mi querida esposa, Yolanda Enríquez Ramírez “Yoli”, por toda su paciencia, su amor, su cariño y comprensión. Por ser la luz que brilla en mis días de oscuridad y por ser la musa que me inspira para dar siempre lo mejor.

A mis padres, Jaime Cid y Ana María García, a mis hermanos, a mis abuelitos, a mi familia en general y a mis suegros. Gracias porque, aunque lejos, siempre me han dado ese amor de familia, ese apoyo incondicional y esos sabios consejos que se necesitan para seguir luchando. Muchas gracias por todo.

Quiero agradecer de manera especial a mi asesora de tesis, la Dra. Yasmín A. Ríos Solís, que además de ser una gran profesora es una excelente persona, gracias por haberme aceptado como su alumno y por todo el apoyo brindado, tanto intelectual como económico, durante la realización de este proyecto de investigación.

Al Dr. Igor Litvinchev, del Posgrado de Ingeniería de Sistemas de la UANL, y al Dr. Ángel Gabriel Bravo Lozano, del Posgrado en Ciencias Agrícolas de la UAZ, por haber aceptado ser parte de mi comité de tesis y por todas sus ideas y contribuciones realizadas.

Agradezco al Dr. Víctor Albornoz Sanhueza y al Dr. Rodrigo Ortega Blu, por haberme aceptado en una estancia académica realizada en la Universidad Técnica

Federico Santa María, Santiago de Chile. A ellos, a todos los amigos encontrados y a todo el personal de la Universidad, gracias por su tiempo y por el conocimiento brindado, pero sobretodo, muchas gracias por su hospitalidad y su amabilidad, es algo que nunca dejaré de agradecer.

Agradezco a todos mis profesores, amigos y compañeros del Posgrado de Ingeniería de Sistemas, por todo el tiempo y conocimiento que me han compartido. Muchas gracias por guiarme en el desarrollo de este trabajo y en mi formación académica, por las palabras de aliento que me han brindado y por todos los momentos compartidos.

Finalmente, pero no menos importante, quiero agradecer al CONACyT y a la FIME por otorgarme una beca de manutención para realizar mis estudios de maestría, por la asignación de una beca mixta para realizar parte de mi formación académica en el extranjero y, por la beca otorgada para el pago de colegiaturas.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	IV
Agradecimientos	v
Resumen	XIV
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Generales	5
1.2.2. Específicos	5
1.3. Hipótesis	6
1.4. Justificación del problema	6
1.4.1. Conveniencia	6
1.4.2. Relevancia Social	7
1.4.3. Implicaciones prácticas	7
1.5. Metodología científica	8
1.6. Estructura de la tesis	9

2. Marco Teórico	11
2.1. Uso del agua	11
2.1.1. Escasez	11
2.1.2. Importancia del agua en la agricultura	14
2.1.3. Determinación de los requerimientos hídricos de los cultivos	18
2.2. Agricultura de Precisión	25
2.2.1. Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)	28
2.2.2. Sistemas de Información Geográfica (GIS)	29
2.2.3. Sensores de humedad	30
2.3. Optimización	32
2.3.1. Programa Lineal	36
2.3.2. Programa Entero Lineal	37
2.3.3. Programa Entero Binario	38
2.3.4. Programa Entero Mixto	38
3. Antecedentes del problema	40
3.1. Investigación de operaciones en la planificación agrícola	41
3.2. Agricultura de Precisión en la planificación agrícola	44
4. Descripción y modelación del problema	47
4.1. Descripción del Problema	48
4.2. Planificación de la producción	50
4.2.1. Supuestos.	51

4.2.2. Modelo matemático.	52
4.3. Planificación eficiente del riego	55
4.3.1. Supuestos.	55
4.3.2. Modelo matemático.	59
5. Obtención de Parámetros	62
5.1. Planificación de la producción	63
5.1.1. Clasificación de parámetros.	63
5.1.2. Obtención de parámetros.	64
5.2. Planificación eficiente del riego	67
5.3. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta	69
5.3.1. Objetivo del sistema	69
5.3.2. Ingresar al sistema	69
5.3.3. Obtener parámetros	71
5.4. Anuario Estadístico de la SAGARPA	73
5.4.1. Objetivo del sistema	73
5.4.2. Ingresar al sistema	73
5.4.3. Obtener parámetros	75
5.5. Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados	77
5.5.1. Objetivo del sistema	77
5.5.2. Ingresar al Sistema	78
5.5.3. Obtener parámetros	78

5.6. INIFAP	82
5.6.1. Objetivo de la Institución	82
5.6.2. Ingresar al sistema	83
5.6.3. Obtener parámetros	84
5.7. Coeficiente de cultivo (K_c) para cultivos anuales	88
6. Metodología y Experimentación	91
6.1. Metodología de solución	91
6.2. Experimentación	96
6.2.1. Planificación de la producción	96
6.2.2. Planificación eficiente del riego	102
7. Conclusiones y consideraciones finales	107
7.1. Conclusiones	108
7.2. Discusiones	109
7.3. Trabajo futuro	110

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Heterogeneidad existente dentro del lote de producción.	2
1.2. Agricultura de Precisión [20].	3
2.1. Utilización del agua a nivel mundial [23].	13
2.2. Evapotranspiración de referencia del cultivo [6].	21
2.3. Coeficiente del cultivo [6].	23
2.4. Agricultura de Precisión [64].	25
2.5. Sistema de Posicionamiento Global [61].	28
2.6. Sistema de Información Geográfica [5].	29
2.7. Sensores de Humedad [10].	31
2.8. Estructura general de un modelo matemático [68].	34
2.9. Clasificación de un modelo matemático [68].	36
4.1. Planificación de la producción.	50
4.2. Planificación eficiente del riego.	56
4.3. Comportamiento del rendimiento del cultivo.	57
5.1. Interfaz principal del SIACON.	70

5.2. Interfaz del subsistema de información agrícola.	71
5.3. Obtención de parámetros utilizando el SIACON.	72
5.4. Interfaz principal del sistema.	74
5.5. Menú del sistema.	75
5.6. Obtención de parámetros utilizando el Anuario Estadístico.	76
5.7. Interfaz principal del SNIIM	77
5.8. Precios agrícolas en mercados nacionales	79
5.9. Precios diarios para frutas y hortalizas	80
5.10. Precios diarios del Chile tipo Guajillo en el Estado de Zacatecas . . .	81
5.11. Anuario estadístico para el Chile tipo Guajillo en el Estado de Zacatecas	82
5.12. Sitio web del INIFAP del estado de Zacatecas.	83
5.13. Obtención de parámetros de potencial productivo a través del INIFAP.	84
5.14. Listado de cultivos del INIFAP.	85
5.15. Información referente al Ajo.	85
5.16. Estaciones agroclimáticas del Estado de Zacatecas.	86
5.17. Reporte agroclimático estación Calera, Zacatecas.	87
5.18. Reporte de evapotranspiración estación Calera,Zacatecas.	88
6.1. Algoritmo de Ramificación y Acotamiento.	95
6.2. Resultados parte I del modelo “Planificación eficiente del riego”. . . .	105
6.3. Resultados parte II del modelo “Planificación eficiente del riego”. . .	105

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Extracción anual de agua dulce por continente (año 2000) [23].	12
2.2. Coeficiente de cultivo para las regiones de Baja California (México) y de España [1, 2].	24
5.1. Coeficiente de cultivo (k_c) para cultivos anuales parte I.	89
5.2. Coeficiente de cultivo (k_c) para cultivos anuales parte II.	90
6.1. Datos generales de los cultivos.	97
6.2. Datos generales de las parcelas.	98
6.3. Agua requerida por cultivo en cada sección de cada parcela.	99
6.4. Resultados de instancias de la planificación de la producción.	100
6.5. Soluciones del modelo “Planificación de la producción”.	101
6.6. Soluciones del modelo “Planificación eficiente del riego”.	104
6.7. Datos generales de los niveles de humedad.	106

RESUMEN

I.C. Néstor Miguel Cid García.

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias
con especialidad en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y MANEJO EFICIENTE DEL AGUA EN UN SISTEMA DE IRRIGACIÓN

Número de páginas: 121.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El principal objetivo de esta tesis consiste en desarrollar una herramienta de modelación matemática que ayude en el proceso de toma de decisiones para el problema de la planificación de la producción agrícola y del manejo eficiente del agua.

El problema ha sido dividido en dos etapas, la primera dedicada a la planificación de la producción y la otra al manejo eficiente del agua. En la primera etapa, el propósito consiste en determinar la superficie y el patrón de cultivos óptimo a ser sembrado, respetando la cantidad limitada de insumos y de recursos disponibles, de tal manera que se genere el mayor beneficio al final del ciclo de producción.

Para la segunda etapa del problema, el objetivo es optimizar la cantidad total de agua disponible en cada turno de irrigación, empleada para el riego de los cultivos, de manera que se minimice la cantidad de agua pero procurando al mismo tiempo que todos los cultivos mantengan su nivel hídrico óptimo. Esta actividad se realiza apoyándose en el uso de nuevas herramientas tecnológicas como Sistemas de Posicionamiento Global, Sistemas de Información Geográfica y Sensores de Humedad, conocidas como Agricultura de Precisión, que permiten determinar los requerimientos hídricos de los cultivos en tiempo real.

Los modelos propuestos en este proyecto han sido elaborados como problemas de Programación Entera Mixtos. Por lo tanto, para resolver los modelos por medio del método exacto se ha utilizado un algoritmo de Ramificación y Acotamiento.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Los modelos presentados en esta tesis pueden ser utilizados en el apoyo para la toma de decisiones en la planificación y en el ahorro de recursos agrícolas, principalmente en el ahorro de agua, ya que las soluciones son exactas y rápidas de obtener. Se considera que estas herramientas sustituirán las técnicas de improvisación permitiendo a los productores tomar decisiones más acertadas en la optimización de los recursos.

En cuanto a la literatura se refiere, se ha contribuido con la elaboración de dos nuevos modelos matemáticos capaces de ayudar en la planificación de la producción y en el manejo eficiente del agua tomando en cuenta las necesidades reales de los cultivos, pues, hasta este momento, no se ha encontrado documento alguno que permita determinar la cantidad de agua a regar en cada cultivo atendiendo a sus requerimientos hídricos en tiempo real.

Firma del asesor: _____

Dra. Yasmín A. Ríos Solís

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La planeación de la producción agrícola en los sistemas de irrigación es una actividad que día a día va adquiriendo un amplio nivel de importancia debido a la gran cantidad de recursos, elementos y factores que se tienen que considerar. Esta planeación se debe hacer respetando aquellos recursos que se encuentran críticamente disponibles, en especial el agua, de tal manera que se maximicen los beneficios para el productor al final del ciclo de producción.

Es muy importante considerar las diferentes propiedades del suelo existentes dentro del lote de producción, ya que estas propiedades ayudan a determinar la heterogeneidad u homogeneidad del lote y pueden ejercer un fuerte impacto sobre el balance hídrico de los cultivos, la dinámica de los nutrientes y la respuesta a la aplicación de insumos como semillas y fertilizantes (ver Figura 1.1).

En la Figura 1.1 se presenta el mapa hídrico de un lote de producción que ha sido regado de manera uniforme sin tomar en cuenta las propiedades del suelo. Como consecuencia se tiene que en algunas zonas de la parcela el riego ha sido suministrado de manera supra-óptima (zonas en azul fuerte), mientras que en otras regiones se ha colocado una cantidad de agua sub-óptima (zonas en rojo) y, sólo en algunos sectores, se ha suministrado la cantidad óptima de agua requerida por el cultivo (zonas en verde).

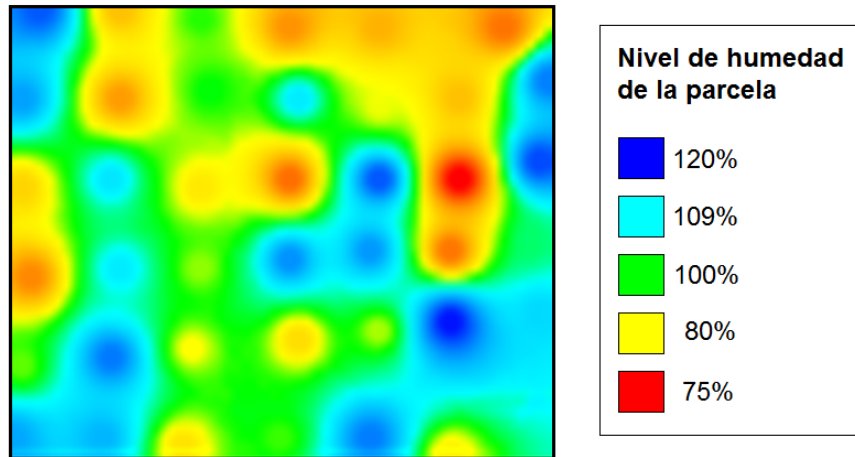


Figura 1.1: Heterogeneidad existente dentro del lote de producción.

Otra consecuencia que se tiene por desconocer las propiedades del suelo es el derroche innecesario de recursos e insumos y un elevado costo de producción ya que, al suministrar una cantidad de recursos mayor de la necesaria, los costos de producción se incrementan.

Lamentablemente, la gran mayoría de los productores no consideran los factores mencionados anteriormente y por lo tanto aplican la misma cantidad de recursos y de insumos sobre todo el lote de producción provocando que en algunos sectores de la parcela el rendimiento producido sea sub-óptimo mientras que en otros sectores sea supra-óptimo.

Un punto muy importante a considerar es que el agua es un recurso natural que se está agotando en gran parte del territorio mexicano y que la agricultura, sobretodo la que se desarrolla en la región centro-norte del país, es una actividad que se caracteriza por depender fuertemente de este valioso recurso y de su disponibilidad limitada. Por lo tanto, la cantidad de agua que se espera tener durante el ciclo de producción es un factor muy importante a considerar para llevar a cabo una buena planeación.

De lo anterior, la importancia de utilizar nuevas herramientas tecnológicas, utilizadas en la Agricultura de Precisión, como los Sistemas de Posicionamiento Global

(GPS), los Sistemas de Información Geográfica (GIS) y los Sensores de Humedad, para obtener información clara y precisa sobre las propiedades del suelo (ver Figura 1.2).

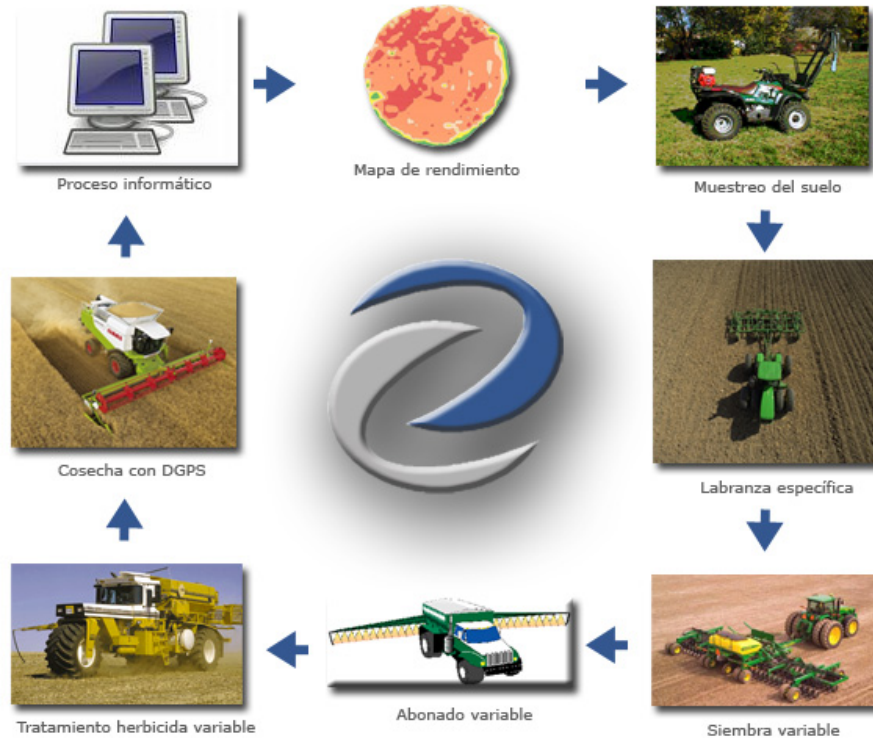


Figura 1.2: Agricultura de Precisión [20].

En la Figura 1.2 se puede observar el proceso agrícola utilizando técnicas de Agricultura de Precisión. Primero se realiza el muestreo de suelo para determinar el tipo de suelo existente en el lote de acuerdo a sus propiedades físicas (en muchas ocasiones se realizan mapas para visualizar la variabilidad del lote). Después se procede a realizar el trabajo específico en cada sección de la parcela durante cada etapa del ciclo de producción, como por ejemplo, labranza, siembra, abonado y tratamiento herbicida variable. Posteriormente se utilizan Sistemas de Posicionamiento Global especializados para determinar con exactitud el rendimiento generado en cada sección del lote. Por último, a través de software especializado se realizan mapas de rendimiento para observar la producción de cada sección del lote y, el ciclo vuelve a empezar.

Los Sistemas de Información Geográfica ayudan a caracterizar la diversidad del tipo de suelo existente permitiendo determinar las áreas de alto y bajo rendimiento productivo. Los Sensores de Humedad proporcionan información en tiempo real sobre el nivel hídrico que mantiene el cultivo en cada periodo de irrigación.

En este proyecto se presentan nuevos modelos matemáticos que ayudan en la planificación de la producción agrícola y en el manejo eficiente del agua en los sistemas de irrigación. En el primer modelo se determina la superficie y el patrón de cultivos óptimo a ser plantado atendiendo a la disponibilidad esperada de recursos durante todo el ciclo de producción. El segundo modelo se apoya en las nuevas herramientas tecnológicas, utilizadas en la “Agricultura de Precisión”, para poder determinar los requerimientos hídricos de los cultivos en tiempo real y así suministrar únicamente la cantidad exacta de agua y de recursos al cultivo.

Los modelos presentados en este proyecto son una combinación de técnicas de modelado con el uso de nuevas herramientas tecnológicas para realizar con mayor precisión la planificación de la producción y para aplicar a cada cultivo la cantidad de insumos y recursos que en realidad necesita atendiendo a sus requerimientos en tiempo real. La combinación de estas dos herramientas, modelado matemático y uso de nueva tecnología, hace que los modelos presentados en este proyecto sean innovadores y por tal motivo sean un gran aporte a la literatura.

1.2 OBJETIVOS

La improvisación y el inapropiado estudio de las propiedades del suelo, recursos e insumos por parte de los agricultores son dos factores fundamentales que están afectando directamente sobre la planificación de la producción agrícola. Mientras no se genere un correcto estudio sobre el costo-beneficio para cada cultivo y sobre la cantidad de recursos que se espera que el cultivo consuma durante todo el periodo de producción, no se podrá llevar a cabo una correcta planificación.

Si a la problemática mencionada anteriormente se le agrega además un tercer elemento, la escasez de agua, el problema se torna todavía mucho más difícil de planificar. Se considera que la disponibilidad de agua es el principal factor que se tiene que tomar en cuenta ya que éste influye directamente sobre el rendimiento del cultivo. Si no se tiene la suficiente cantidad de agua entonces no se puede regar el cultivo a su nivel óptimo, y si el cultivo no se riega a su nivel óptimo entonces no se puede obtener el 100% de su rendimiento y, por lo tanto, las ganancias se ven mermadas al final del ciclo de producción.

En base a lo anterior, se han establecido una serie de objetivos (generales y específicos) para poder realizar una buena planificación. Estos objetivos se presentan a continuación.

1.2.1 GENERALES

Elaborar una herramienta de modelación matemática que ayude a determinar la superficie y el patrón de cultivos óptimo a ser sembrado en un sistema de irrigación, apoyándose en el uso de nuevas herramientas tecnológicas como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), los Sistemas de Información Geográfica (GIS) y los Sensores de Humedad, para maximizar el beneficio del productor y a su vez optimizar la cantidad de agua y de recursos que se tienen disponibles durante todo el ciclo de producción.

1.2.2 ESPECÍFICOS

- Elaborar una herramienta de modelación matemática para determinar la superficie y el patrón de cultivos óptimo a ser sembrado en un sistema de riego respetando la cantidad de recursos e insumos disponibles al inicio y durante el ciclo de producción.
- Elaborar una herramienta de modelación matemática para determinar la cantidad de agua a regar en cada cultivo sembrado, respetando las necesidades

hídricas del cultivo en tiempo real y su etapa fenológica de crecimiento, procurando que el cultivo sea regado siempre a su nivel óptimo.

- Obtener resultados para ambos modelos matemáticos por medio del método exacto utilizando la técnica de ramificación y acotamiento.
- Elaborar una documentación clara sobre cada lote de producción que demuestre la diversidad en su tipo de suelo, la cantidad de recursos que se requieren para sembrar un determinado cultivo, entre otros factores.

1.3 HIPÓTESIS

La planificación de la producción agrícola en un sistema de irrigación por medio de técnicas de programación lineal y tomando en cuenta las propiedades del suelo existentes dentro el lote de producción y las necesidades hídricas de los cultivos en tiempo real, maximizará el beneficio esperado para el productor, minimizará los costos de producción y utilizará de manera eficiente la cantidad de recursos e insumos que se tienen disponibles durante todo el ciclo de producción, en especial el agua.

1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

1.4.1 CONVENIENCIA

Este proyecto tiene la finalidad de proporcionar una herramienta para la toma de decisiones en la planificación de la producción agrícola en los sistemas de irrigación de tal manera que se sustituya la improvisación y el inapropiado estudio de las propiedades del suelo, recursos e insumos disponibles, por técnicas avanzadas de planificación y de administración de la producción.

1.4.2 RELEVANCIA SOCIAL

Si bien es cierto que en la literatura los problemas de la planificación de la producción agrícola han sido de los principales referentes en los que se ha llevado a cabo la modelación matemática, hasta este momento se han encontrado únicamente documentos en donde la planificación se hace, en la mayoría de los casos, en base a estimaciones y, más recientemente, utilizando las nuevas herramientas tecnológicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los Sensores Remotos, los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), entre otros. Sin embargo, no se han encontrado documentos en donde se combinen las técnicas de modelado en conjunto con la innovación tecnológica para llevar a cabo esta planificación de la producción.

Las nuevas herramientas tecnológicas proporcionan información exacta y precisa sobre las propiedades reales del suelo y sobre las necesidades hídricas de los cultivos en tiempo real. Con los “SIG” se puede determinar la diversidad de suelo existente dentro del lote de producción y con los “Sensores Remotos” se puede monitorear día a día el balance hídrico que mantiene el cultivo.

El conocimiento sobre el tipo de suelo existente dentro del lote de producción y el nivel hídrico que mantiene el cultivo en un periodo de irrigación dado es de fundamental importancia, ya que, al conocer estos factores, se puede determinar con mayor precisión y exactitud la cantidad de recursos a utilizar durante el ciclo de producción evitando derrochar innecesariamente recursos e insumos, como agua y fertilizantes, y por consiguiente ahorrar capital de inversión por parte del productor.

1.4.3 IMPLICACIONES PRÁCTICAS

El proyecto proporcionará información muy valiosa a los tomadores de decisiones. En una primera fase, al inicio del ciclo de producción, permitirá determinar la superficie y el patrón de cultivos óptimo a ser sembrado generando el mayor beneficio para el agricultor. Una vez que se conoce el patrón de cultivos óptimo sembrado,

la siguiente fase, durante todo el ciclo de producción, consiste en suministrar a los cultivos únicamente la cantidad de recursos e insumos necesarios atendiendo a sus requerimientos hídricos en tiempo real, esto ayudará a ahorrar capital de inversión por parte de los productores y a evitar el derroche innecesario de recursos.

1.5 METODOLOGÍA CIENTÍFICA

La metodología utilizada para realizar el proyecto de investigación presentado en esta tesis es la siguiente:

- Revisión bibliográfica y estudio referente sobre la modelación matemática de problemas referentes a la planificación de la producción agrícola, el uso de nuevas herramientas tecnológicas en el proceso de la planificación, la disponibilidad y consumo de agua dependiendo de cada región y de cada cultivo y, finalmente, resultados existentes relacionados con métodos exactos, heurísticos y/o estimaciones para realizar comparaciones.
- Formulación matemática. Para cada fase del problema se elabora un modelo matemático. En la primera fase se determina la superficie y el patrón de cultivos a ser plantado y en la segunda fase se determina la cantidad de agua a suministrar sobre cada cultivo sembrado durante cada turno de irrigación procurando llegar siempre a su nivel hídrico óptimo.
- Obtención de parámetros. Esta parte es de fundamental importancia para la investigación, ya que se debe tener especial cuidado al momento de calibrar los parámetros en cada uno de los modelos. El no hacer de manera correcta esta calibración implica el riesgo de que los resultados obtenidos no proporcionen la mejor opción para el productor.
- Implementación computacional y realización de experimentos iniciales. Se presentan instancias iniciales generadas con datos aleatorios para corroborar el buen funcionamiento de ambos modelos matemáticos. Cada fase del problema

se resuelve por medio del método exacto utilizando la técnica de ramificación y acotamiento.

- Análisis de los resultados obtenidos de la experimentación computacional para comprobar que los resultados son lógicos y coherentes.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis consta de siete capítulos.

- En el Capítulo 2 se definen conceptos clave que se mencionan a lo largo de la tesis y que son importantes para introducir brevemente al lector con los temas de la investigación. Dentro de estos temas se explica la importancia del uso eficiente del agua en la agricultura, se mencionan algunas de las herramientas utilizadas en la Agricultura de Precisión enfocándonos principalmente en los Sensores de Humedad y los Sistemas de Información Geográfica, también se presenta una breve historia de la optimización y se describen algunos de los problemas que comúnmente se utilizan dentro de ésta.
- En el Capítulo 3 se dan a conocer algunos trabajos de la literatura que han sido relacionados con este proyecto de investigación. Primero se muestran trabajos en donde la planificación ha sido abordada utilizando herramientas de modelación matemática y, posteriormente, se presentan trabajos en donde se utiliza la Agricultura de Precisión para llevar a cabo la planificación de la producción.
- En el Capítulo 4 se detalla el problema abordado en esta tesis y se explica el porqué de la subdivisión de éste en dos etapas. Se da una descripción sobre las especificaciones a considerar en cada fase del problema y se presenta el modelo matemático para cada etapa.
- El Capítulo 5 está enfocado a la obtención de parámetros para cada modelo matemático. Primeramente se detalla el ajuste de parámetros para el problema

de la planificación de la producción y posteriormente para el problema de la planificación eficiente del riego. Se puede observar cómo los parámetros del segundo modelo dependen directamente del resultado del primer modelo.

- En el Capítulo 6 se presenta la metodología de solución y experimentación computacional del problema. Se da a conocer el método que ha sido utilizado para resolver los modelos propuestos y, para cada modelo matemático, se presentan las condiciones experimentales iniciales, el ajuste de parámetros y los resultados obtenidos.
- En el Capítulo 7 son presentadas las conclusiones de este proyecto de investigación, los aportes y los beneficios generados y, el posible trabajo futuro que puede ser implementado a partir de este proyecto de investigación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 USO DEL AGUA

2.1.1 ESCASEZ

“Si deseamos la continuidad de la vida como la conocemos, es necesaria la creación de una nueva cultura que reconozca y respete el valor del agua. De esta nueva cultura dependerá la supervivencia de las futuras generaciones y especies del planeta” LYNN MARGULIS [35].

Más del 40% de la población total del planeta está siendo azotada por el problema de la escasez de agua. Según estudios de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*), se estima que para el año 2025 cerca de 1,800 millones de personas vivirán en países o regiones con una drástica falta de agua, y dos tercios de la población mundial podría encontrarse en condiciones de escasez debido a que el consumo mundial de agua ha crecido durante el último siglo a un ritmo dos veces superior al de la población [25, 26].

El problema es aún más intenso en las zonas más secas del mundo, donde viven más de 2,000 millones de personas, de las cuáles la mitad son pobres. En países como México, Pakistán, Sudáfrica, grandes partes de China y la India y una gran cantidad de países del Cercano Oriente y África del Norte sufren de escasez aguda de agua. En donde la mayoría del agua dulce que se utiliza en esas zonas se destina a la

agricultura de regadío [23, 26, 27].

Cerca de 3,830 km³ de agua dulce son extraídos cada año por el hombre para su uso cotidiano, lo que equivale a unos 600 m³ por persona al año. Esta cifra representa aproximadamente el 9% de los recursos de agua dulce renovables. El principal usuario

Región	Agua km ³	Extracción km ³	Consumo de agua por sector					
			Agricultura		Industria		Municipios	
			km ³	%	km ³	%	km ³	%
Mundial	43 659	3 830	2 664	70	785	20	381	10
África	3 936	217	186	86	9	4	22	10
Asia	11 594	2 378	1 936	81	270	11	172	7
América Latina	13 477	252	178	71	26	10	47	19
Caribe	93	13	9	68	1	9	3	23
América del Norte	6 253	525	203	39	252	48	70	13
Oceanía	1 703	26	19	72	3	10	5	18
Europa	6 603	418	132	32	223	53	63	15

Tabla 2.1: Extracción anual de agua dulce por continente (año 2000) [23].

consumidor de agua en la actualidad continúa siendo el sector agrícola, incluyendo a la ganadería, representando el 70% de todas las extracciones a nivel mundial, seguido del sector industrial que utiliza el 20%, y del uso doméstico que consume el 10% (ver Tabla 2.1 y Figura 2.1)[23].

Mientras el ser humano no se dé cuenta de la enorme importancia que tiene el agua en su vida diaria, no podrá entender realmente la gravedad del problema y por lo tanto no podrá hacer una mejor planificación de este valioso recurso. El agua es muy importante en todos los aspectos de la vida cotidiana del ser humano, desde la alimentación hasta la producción de recursos.

Por ejemplo, para producir un kilogramo de trigo se requieren entre 1,000 y 2,000 litros de agua, para producir un kilogramo de arroz se necesitan alrededor de 3,000 litros y para producir un kilo de carne de origen vacuno se consumen entre

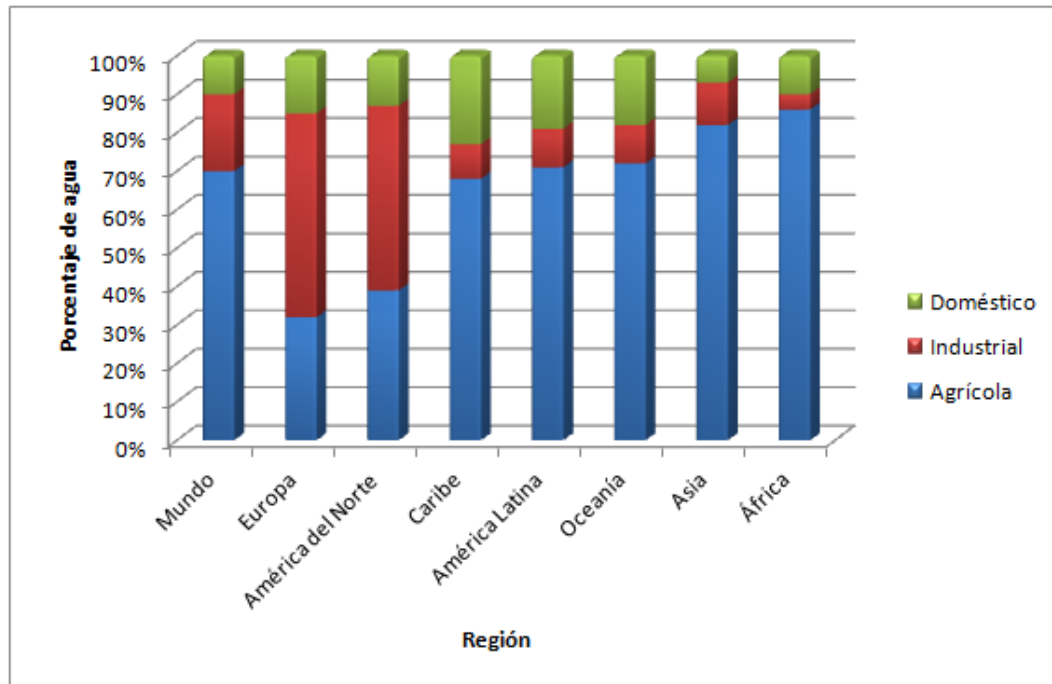


Figura 2.1: Utilización del agua a nivel mundial [23].

13,000 y 15,000 litros. Para el consumo humano, la cantidad de agua potable que necesita diariamente una persona es de 2 a 5 litros, así que para cada día se estima un promedio de 2,000 litros de agua. Por lo tanto, el consumo de agua diario efectivo por persona es 1,000 veces superior a la cantidad estimada de agua que ingerimos. Lo que nos lleva a la conclusión de que se está consumiendo mucho más agua de la que hay disponible, por lo tanto, si en un futuro el agua se agota completamente esto implica que no va a haber producción, y sin producción simplemente no hay qué comer [26, 27].

El impacto de la escasez de agua es un problema que afecta a todos los sectores de la sociedad, desde el sector agrícola hasta el sector industrial. Al no existir suficiente cantidad de agua no se puede producir la suficiente cantidad de materia prima para la industria (sobre todo para las industrias alimenticias), sin materia prima no se pueden elaborar los productos, y sin productos no se puede dar alimento a toda la población, lo que a su vez ocasiona el incremento en los precios del mercado por la poca cantidad de productos elaborados.

Otras consecuencias de la sequía son las pérdidas irrecuperables en la producción agrícola, la disminución de pastizales utilizados para el ganado y el incremento en el índice de mortalidad del ganado y de la población. Desafortunadamente la región del Cuerno de África (región de África oriental comprendida por los países de Somalia, Yibuti, Eritrea y Etiopía) y la región centro-norte de la República Mexicana son claros ejemplos de las poblaciones que han sido afectados por este grave problema [28, 29, 30, 31].

En el problema de la escasez de agua existen factores que probablemente se multiplicarán y se volverán más complejos en los próximos años. Se considera que el factor principal es el crecimiento demográfico a nivel mundial, pero existen algunos otros factores que tienen que ver con la falta de compromiso en la conservación de este valioso recurso, con la falta de inversiones adecuadas, con la insuficiente capacidad humana, con la ineficacia de las instituciones y con la mala administración gubernamental.

2.1.2 IMPORTANCIA DEL AGUA EN LA AGRICULTURA

Aunque la agricultura es la actividad que consume cerca del 70 % de todas las extracciones de agua dulce a nivel mundial e incluso puede llegar hasta en un 95 % en varios países en desarrollo, con el fin de satisfacer la actual demanda de alimentos, es la menos rentable a nivel general [32, 40].

El constante crecimiento de la población mundial está contribuyendo al aumento de la demanda de agua. Según datos de la FAO, se espera que la población mundial crezca de los actuales 6,500 millones de personas a 8,100 millones en el año 2030. Para mantener el ritmo de la creciente demanda de alimentos, y calculando un aumento en la productividad del agua, se estima que para el año 2030 un 14 % más de agua dulce deberá ser destinada a uso agrícola, a fin de obtener ese 55 % de aumento en la producción de alimentos que se necesita. Es necesario mencionar que la agricultura de regadío suministra alrededor del 40 % de la oferta mundial de

alimentos en el 20 % de las tierras cultivadas [40, 45].

La agricultura de riego ha contribuido de forma importante a garantizar la oferta de alimentos en poblaciones de rápido crecimiento así como a la reducción de la pobreza proporcionando seguridad alimentaria, protección contra las inundaciones y las sequías y mayores oportunidades de empleo.

En las regiones áridas y semiáridas, en donde la escasez de agua es casi una constante, las aguas subterráneas han desempeñado un papel importante para satisfacer la demanda doméstica y de riego. En numerosas regiones, desde hace tiempo, las aguas subterráneas se vienen usando masivamente para el riego. Ante este problema, es necesario practicar una agricultura sustentable que permita el uso intensivo de estos recursos subterráneos por medio de una correcta planificación en conjunto con marcos jurídicos y posturas de gobierno adecuadas [37, 42, 50].

Como ya se mencionó anteriormente, la mayor parte de los países del Cercano Oriente y África del Norte tienen una grave escasez de agua, al igual que países como México, Pakistán y Sudáfrica y amplias partes de China y la India. La agricultura de regadío, que representa la mayor parte de la demanda de agua en estos países, también es habitualmente el primer sector afectado por el déficit de agua y el aumento de la escasez, que se traducen en una disminución de la capacidad para mantener la producción de alimentos per cápita y satisfacer paralelamente las necesidades de agua en el plano doméstico, industrial y ambiental.

Por ello, la creciente escasez de agua y la competencia por ésta constituyen importantes amenazas para los futuros avances en materia de seguridad alimentaria y reducción de la pobreza. En las regiones semiáridas, un número cada vez mayor de pobres de las zonas rurales está empezando a considerar los derechos y el acceso al agua para la producción de alimentos, la ganadería y los usos domésticos como igual de fundamentales que el acceso a la asistencia sanitaria y la educación primaria. Por consiguiente, es necesario centrarse también en la problemática de la equidad y los derechos de acceso al agua.

Normalmente sólo entre el 30 % y el 50 % del agua derivada con fines de riego se aprovecha realmente por los cultivos. Se cree que mejores prácticas y tecnologías de gestión para los sistemas de cultivo de regadío y de secano proporcionarán un impacto significativo en la productividad del agua [23, 27].

Según la FAO, aún no se ha estudiado plenamente el potencial del comercio para optimizar el aprovechamiento del agua, por tal motivo, en este sector existe una amplia gama de opciones para hacer frente a la escasez del agua. Ésta es una causa más que motiva el desarrollo de nuestro proyecto de investigación.

Nadie cuestiona el grado de responsabilidad de la agricultura como causante de la escasez de agua y en el uso y la degradación de algunas de las aguas superficiales y subterráneas de mayor calidad del mundo para la producción marginal. Lo que se pasa a menudo por alto es el potencial que una correcta gestión del aprovechamiento del agua para la agricultura tiene que tener que dar lugar a más opciones de reasignación.

Los servicios de agua para la agricultura constituyen simplemente uno de los numerosos insumos de la producción de cultivos, pero son fundamentales pues sin ellos no se puede intensificar y diversificar la producción agrícola. La gestión de la aplicación del agua a la zona radicular y la obtención de una mayor productividad global dependen de la fertilidad de los suelos, la selección de cultivares, la densidad de cultivo, el manejo de plagas y enfermedades y, posteriormente, de los controles post-cosecha hasta la salida de la explotación agrícola. Lo que establece la cadena de valor añadido sistémico en la que se puede evaluar la eficacia en el uso del agua y se pueden analizar las perspectivas de mejora sistémica de la explotación.

En condiciones de disponibilidad de agua limitada en la explotación agrícola, la mejora de la gestión del agua a este nivel constituye una obligación. Los beneficios viables en términos financieros y de seguridad sanitaria de los métodos de riego por aspersión y goteo, riego deficitario y otras tecnologías de riego que permiten ahorrar agua han quedado demostrados. Los beneficios de estas tecnologías se incrementan

aún más cuando se conjugan con una determinación exacta de las necesidades de agua en los cultivos y de los sistemas de riego y, con una programación de riego bien establecida.

En circunstancias de oferta limitada de agua, en vez de maximizar el rendimiento de los cultivos por unidad de superficie se debería maximizar el rendimiento por unidad de volumen de agua consumida. Suministrando como mínimo un 20 % - 30 % de agua inferior a la cantidad necesaria para el rendimiento máximo [23].

Por lo tanto, para poder realizar ésta tarea, el suministro de agua en los grandes sistemas de riego tiene que ser fiable. El agricultor tiene que poder prever el calendario y el volumen de agua suministrada. En el mejor de los casos, el suministro tiene que estar disponible previa petición y puntualmente para dar al agricultor la máxima flexibilidad en la elección de cultivos y en la temporada de cultivo.

La gestión del agua en la agricultura de regadío tiene múltiples objetivos y proporciona una amplia gama de beneficios a los agricultores y a las comunidades locales, desde la recarga de acuíferos locales para el suministro de agua potable hasta el mantenimiento de cinturones de protección y de huertos.

La mejora del funcionamiento de los sistemas de riego implica un auténtico reconocimiento de que los sistemas de riego pueden complementar los sistemas naturales a lo largo del ciclo anual del agua.

La mejora de la mejora del funcionamiento implica que la gestión del riego tiene que volver a centrarse en el suministro de agua a los agricultores persiguiendo paralelamente cambios paradigmáticos tales como:

- Ampliar el concepto de eficacia a múltiples usos.
- Abarcar el uso conjunto del agua.
- Ampliar la gestión participativa a distintos actores locales.
- Establecer una gestión rentable del agua.

- Reducir las externalidades ambientales asociadas con el anegamiento y la salinidad así como la evacuación de las aguas de drenaje.

2.1.3 DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE LOS CULTIVOS

Para poder determinar con mayor precisión la cantidad de agua que requiere el cultivo en un tiempo de irrigación específico (días, semanas, meses o un periodo en específico), es necesario considerar una serie de elementos y factores ambientales que influyen directamente sobre el requerimiento hídrico del cultivo. Entre estos elementos se encuentran la evaporación, la transpiración, la evapotranspiración y el coeficiente de cultivo, que se describen a continuación.

EVAPORACIÓN. Es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua. Este proceso es afectado por factores climatológicos como la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento, y puede generarse en superficies como lagos, ríos, caminos y suelos [6].

Cuando el proceso de evaporación es generado en un suelo que se encuentra cultivado, el nivel de cobertura del suelo por parte del cultivo y la cantidad de agua disponible en la superficie son otros factores que se tienen que considerar en el proceso de evaporación.

Si no existe alguna fuente de reabastecimiento de agua en la superficie, la evaporación disminuye rápidamente y el periodo de evaporación total puede producirse en un lapso de tiempo muy corto.

TRANSPIRACIÓN. La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior extracción hacia la atmósfera. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y transportada a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja y el intercambio del

vapor con la atmósfera es controlado por la abertura estomática [6].

Para poder calcular el nivel de transpiración del cultivo es necesario considerar factores como la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica, el viento, el contenido de agua del suelo, la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces y, la salinidad del suelo y del agua de riego.

También es necesario considerar ciertas características del cultivo como el tipo de cultivo que se está manejando, su estado de desarrollo conocido comúnmente como etapa fenológica de crecimiento y, el medio y la ubicación geográfica donde se encuentra cultivado ya que, el mismo cultivo, puede generar diferentes niveles de transpiración dependiendo de la ubicación geográfica en donde se esté produciendo.

Es importante señalar que la mayor parte de agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.

EVAPOTRANSPIRACIÓN (ET). Es la combinación del proceso de evaporación del agua y de la transpiración del cultivo. La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos, de ahí el nombre de evapotranspiración [6].

Las unidades de medición de la evapotranspiración son milímetros (mm) por unidad de tiempo (días, meses, años y/o un periodo en específico). Estas unidades expresan la cantidad de agua que ha perdido la superficie cultivada en unidades de altura.

Por ejemplo, si se tiene una superficie de una hectárea, es decir, $10,000 \text{ m}^2$ y una pérdida de agua de 1 mm de profundidad, que es igual a 0.001 m, al realizar la conversión $10,000 \text{ m}^2 * 0.001 \text{ m} = 10 \text{ m}^3$, entonces se puede determinar que una pérdida de 1 mm de profundidad es equivalente a 10 m^3 de agua por hectárea.

Cuando el cultivo se encuentra dentro de las primeras etapas de crecimiento, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero conforme el

cultivo se va desarrollando, la transpiración va aumentando hasta que se convierte en el proceso principal de consumo de agua. En el momento de la siembra, casi el 100 % de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90 % de la ET ocurre como transpiración.

Al igual que en la evaporación y en la transpiración, en la evapotranspiración también existen factores que se tienen que considerar para calcular el nivel de pérdida de agua del cultivo. Dentro de estos factores se encuentran los siguientes:

- **Variables climáticas.** Incluyen factores como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento.
- **Factores de cultivo.** Dentro de estos factores se tiene que considerar el tipo y la variedad del cultivo y la etapa de crecimiento en la que se encuentre.
- **Manejo y condiciones ambientales.** Los elementos como la salinidad y fertilidad del suelo, uso de fertilizantes, control de enfermedades, buen manejo del suelo, densidad del cultivo y contenido de agua en el suelo, también tienen que ser considerados.

Dentro del concepto de evapotranspiración se debe diferenciar la evapotranspiración de referencia (ET_o), la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) y la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$).

La ET_o es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logran la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. $ET_{c_{aj}}$ es similar al proceso anterior sólo que en este caso generalmente se requiere una corrección de parámetros debido a que no existe un manejo óptimo del cultivo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo.

El proyecto que se está presentando se enfoca en la evapotranspiración bajo condiciones estándar, ya que se supone se tienen todas las condiciones necesarias para maximizar la producción bajo las condiciones climáticas que se presenten.

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) puede ser calculada a partir de datos climáticos mediante el enfoque de Penman-Monteith [6]. Este método arroja la estimación de la tasa de evapotranspiración del cultivo estándar de referencia (ET_o) a partir de los datos climáticos de velocidad del viento, radiación solar, nivel de humedad y temperatura (ver Figura 2.2).

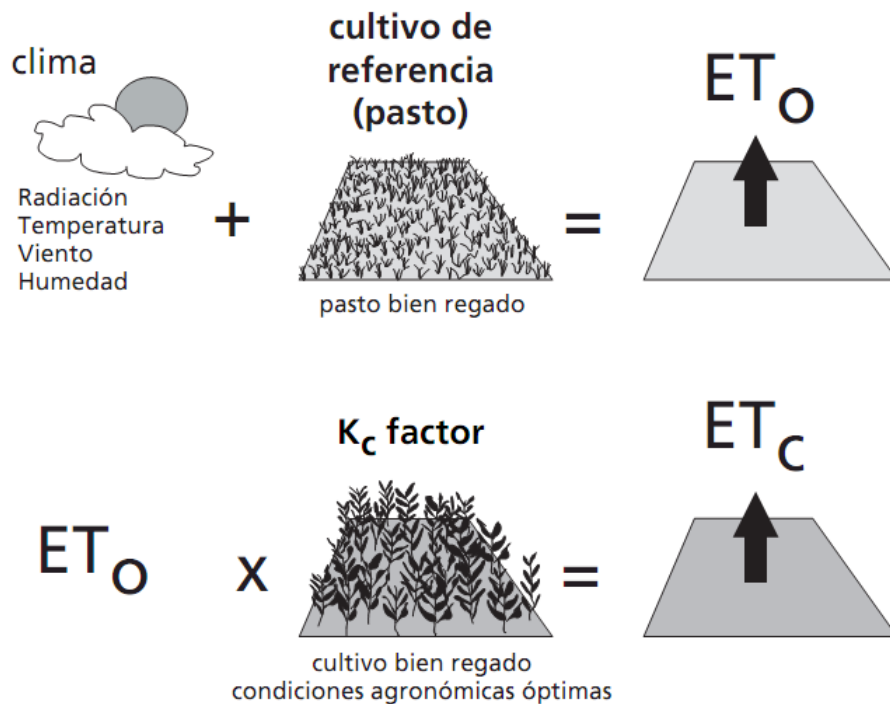


Figura 2.2: Evapotranspiración de referencia del cultivo [6].

La relación ET_c/ET_o puede ser determinada experimentalmente para diferentes cultivos y es conocida como “*Coeficiente del Cultivo (K_c)*” y se utiliza para relacionar ET_c a ET_o . De manera que la ecuación resultante para obtener la ET_c del cultivo es

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (2.1)$$

donde ET_c es la evapotranspiración del cultivo que se pretende calcular para determinar la cantidad de agua que necesita el cultivo en un tiempo dado (días, semanas,

meses o periodo de irrigación específico), K_c es el coeficiente de cultivo del cultivo que se tiene sembrado y que depende de sus diferentes etapas de crecimiento, y la ET_o es la evapotranspiración de referencia calculada por medio del método de Penman-Monteith.

Debido a que el método de Penman-Monteith considera como parámetros los datos climáticos involucrados en el proceso de evapotranspiración como la velocidad del viento, humedad del aire, radiación solar y temperatura, el resultado que se obtiene se aproxima de una manera muy cercana a la ET_o del cultivo. Por lo tanto, este método ha sido recomendado por la FAO (*Food and Agriculture Organization*) como un método sólido estándar para calcular la ET_o en cualquier localidad [6].

A continuación se presenta un ejemplo de como aplicar la ecuación (2.1) para calcular la cantidad de agua que consume el cultivo en un tiempo dado. Supongamos que el valor de ET_o es de 4.3 mm por hectárea y que el K_c es igual a 0.2, el resultado de la ET_c es igual a 0.86 mm por hectárea.

$$ET_c = K_c * ET_o$$

$$ET_c = 0.2 * 4.3$$

$$ET_c = 0.86$$

Si el resultado anterior se desea expresar en cantidad de agua por hectárea que debe aplicarse al cultivo entonces es necesario aplicar la conversión de que 1 mm es equivalente a 10 m^3 , como se ha explicado anteriormente. Tenemos que,

$$0.86 * 10 = 8.6 \tag{2.2}$$

por lo tanto, la cantidad de agua por hectárea que se debe aplicar al cultivo para cumplir con sus requerimientos hídricos en tiempo real bajo las condiciones climáticas mencionadas anteriormente es de 8.6 m^3 .

Si la superficie cultivada almacena milímetros de precipitación, por lluvia o por riego en tiempos anteriores, al resultado anterior se le restan los milímetros almacenados y eso da el resultado final sobre la cantidad de agua que se tiene que suministrar al cultivo.

De lo anterior podemos decir que la cantidad de agua que requiere un cultivo para cubrir sus requerimientos hídricos se puede definir como la cantidad de agua que tiene que ser proporcionada al cultivo, como riego o precipitación, para compensar la pérdida de agua por evapotranspiración del cultivo. En términos más simples, es la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva.

Es muy importante aclarar que el resultado anterior sólo puede ser aplicado en el tiempo (día, semana, mes o periodo de irrigación específico) para el que ha sido calculado, es decir, si este mismo resultado se pretende aplicar un tiempo después, la aplicación será errónea y probablemente se estará colocando una cantidad de agua muy diferente a la que en realidad necesita el cultivo, de ahí la importancia de tener los valores sobre el nivel de precipitación de la superficie, del coeficiente de cultivo y de la evapotranspiración de referencia en tiempo real.

Otro factor que también es muy importante considerar es el coeficiente de cultivo, el cuál representa las variaciones sobre la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando desde la siembra hasta la recolección (ver Figura 2.3).

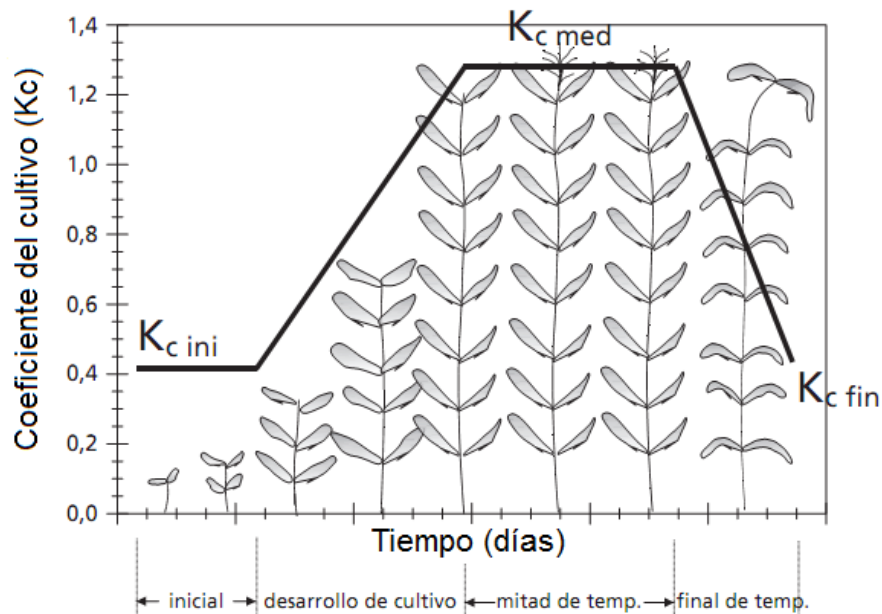


Figura 2.3: Coeficiente del cultivo [6].

Normalmente son 4 las etapas o fases de cultivo en donde el coeficiente de cultivo presenta variaciones [2, 6]. Las fases y su tiempo de duración se presenta a continuación:

- **Inicial:** Que va desde la siembra hasta un 10 % de la cobertura del suelo aproximadamente.
- **Desarrollo:** Del 10 % de cobertura y durante el crecimiento activo de la planta.
- **Media:** Del 70 %-80 % de cobertura máxima de cada cultivo, básicamente entre la floración y fructificación.
- **Maduración:** Comprende de la madurez hasta la recolección.

Es importante destacar que el coeficiente de cultivo es diferente dependiendo del cultivo y de la zona geográfica en la que se pretenda aplicar.

Por ejemplo, en la Tabla 2.2 se presentan algunos ejemplos de cultivos en donde se puede observar que no es el mismo coeficiente de cultivo para la región de España que para la región de Baja California, México, donde B indica el coeficiente de cultivo

Coeficiente del cultivo según la región.								
	BAJA CALIFORNIA				ESPAÑA			
Cultivo	B	C	D	E	B	C	D	E
Algodón	0.35	0.95	0.95	0.50	0.45	0.75	1.15	0.75
Maíz	0.20	1.05	1.05	0.60	0.40	0.80	1.15	0.70
Trigo	0.33	1.10	1.10	0.15	0.35	0.75	1.15	0.45
Cebada	0.33	1.10	1.10	0.15	0.35	0.75	1.15	0.45
Sorgo	0.20	1.05	1.05	0.50	0.35	0.75	1.10	0.65
Tomate	0.30	1.10	1.10	0.65	0.45	0.75	1.15	0.80

Tabla 2.2: Coeficiente de cultivo para las regiones de Baja California (México) y de España [1, 2].

para el periodo inicial, C es el coeficiente para la etapa de desarrollo, D representa el coeficiente de la etapa media y E muestra el coeficiente alcanzado para la etapa de maduración.

2.2 AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La Agricultura de Precisión (AP) es definida como el uso de nuevas tecnologías de información que permiten la aplicación de insumos agrícolas, tales como fertilizantes, semillas, plaguicidas, etc., en forma variable dentro de un lote de producción de manera que se suministre exactamente la cantidad necesaria de recursos en el lugar preciso (ver Figura 2.4) [16, 54, 69].

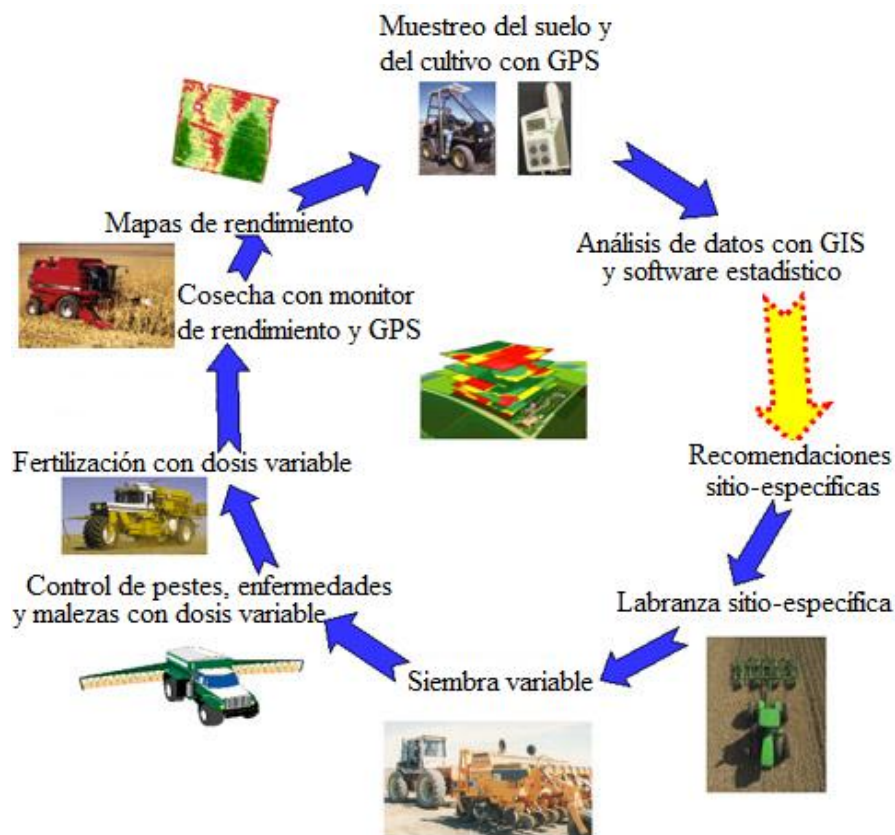


Figura 2.4: Agricultura de Precisión [64].

Dentro de los objetivos que se pretenden alcanzar al aplicar este tipo de tec-

nologías se encuentran los siguientes [41, 34]:

- Optimizar la productividad del cultivo en cada zona del lote de producción a partir del correcto manejo de la variabilidad del terreno.
- Reducir costos de producción suministrando únicamente la cantidad de recursos necesarios a cada cultivo.
- Reducir el nivel de contaminación ambiental. Al suministrar únicamente la cantidad de recursos necesarios para la producción de cultivos no sólo se están reduciendo los costos de inversión, sino que, se está ayudando también a reducir el deterioro del ecosistema y a conservar la cantidad de recursos naturales que se tienen disponibles.
- Mejorar el aprovechamiento de la maquinaria ya que ésta sólo es utilizada el tiempo necesario para realizar alguna actividad, el desgaste es menor y por lo tanto el tiempo de vida se prolonga un poco más.
- Incrementar la producción al final del ciclo de producción. Si se suministra a los cultivos la cantidad óptima de recursos e insumos, como agua y fertilizantes, dependiendo de sus necesidades en tiempo real y según su etapa fenológica de crecimiento, la producción obtenida al final de la temporada se va a incrementar considerablemente.

Para aplicar las técnicas de “Agricultura de Precisión” de manera adecuada hay una serie de etapas o pasos que se tienen que seguir.

1. **Recolección de información.** Consiste en agrupar información cuantitativa y cualitativamente sobre la variabilidad del lote de producción. Las zonas son agrupadas en base a su homogeneidad para realizar una determinada actividad operacional. Para realizar esta parte del proceso se utilizan los Sistemas de Posicionamiento Global (*GPS*, por sus siglas en inglés Global Positioning System), los Sistemas de Información Geográfica (*GIS*, por sus siglas en inglés

Geographic Information System), instrumentos topográficos, sensores remotos y sensores directos. Entre las actividades que se van a realizar con estas herramientas se encuentra el monitoreo de rendimientos, el sensoriamiento remoto de suelos y cultivos y la digitalización de mapas.

2. **Análisis, procesamiento e interpretación de la información.** Esta etapa se enfoca principalmente en darle sentido y orientación a la información que ha sido obtenida para mejorar el proceso de toma de decisiones en la planeación. Dentro de la tecnología que se utiliza en esta fase encontramos a los programas de Sistemas de Información Geográfica, sistemas expertos, programas estadísticos y la experiencia del operador para realizar tareas como análisis de dependencia espacial, confección de mapas de evaluación y confección de mapas de prescripción.
3. **Implementación.** Consiste en tomar la decisión adecuada sobre aplicar la cantidad de insumos necesarios, dependiendo del análisis efectuado en la etapa anterior, con el objetivo de maximizar la producción minimizando el capital de inversión. En este punto se va a considerar tecnología capaz de proporcionar cantidades variables de dosis de insumos y de recursos como pulverizadoras asistidas por GPS y programas computacionales para realizar adecuadamente actividades como la aplicación variable de semillas, nutrientes y plaguicidas.

La variabilidad en la aplicación de insumos y recursos depende directamente de la homogeneidad o heterogeneidad que existe dentro del lote de producción. Esta característica se encuentra determinada por las propiedades del suelo, como tipo de suelo, contenido de materia orgánica, fertilidad física y química, las cuáles van a ejercer un fuerte impacto sobre el balance hídrico de los cultivos y sobre la aplicación de nutrientes.

Dentro de las tecnologías de información que son utilizadas por la Agricultura de Precisión para determinar la variabilidad del lote de producción se encuentran los Sistemas de Información Geográfica, los Sistemas de Posicionamiento Global, los

Sensores de Humedad y los Monitores Electrónicos de Rendimiento. En las siguientes secciones se da una breve descripción del funcionamiento de algunos de estos equipos [34, 54, 70].

2.2.1 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

Un sistema de posicionamiento global es una herramienta que utiliza satélites para proporcionar información de ubicación sobre algún objeto o persona (ver Figura 2.5) [54, 58].



Figura 2.5: Sistema de Posicionamiento Global [61].

Parte de las ventajas de utilizar este tipo de tecnología es que el servicio está disponible en cualquier parte del mundo de manera gratuita las 24 horas del día y bajo cualquier condición meteorológica.

En cuanto al uso en la agricultura se refiere, se pueden obtener datos exactos sobre un punto específico del lote de producción, como por ejemplo rendimiento del cultivo, nivel de humedad y cantidad de materia orgánica, y así suministrar la dosis variable de insumos dependiendo de cada punto localizado.

Sin embargo, existe una serie de factores que pueden reducir el nivel de precisión del GPS, algunos son generados por el sistema y otros por el usuario. Dentro de estos

factores tenemos los siguientes:

- Relojes de los satélites.
- Errores de órbita.
- Atmósfera terrestre.
- Multitrayectoria.
- Geometría satelital.
- Receptores de GPS.
- Disponibilidad selectiva.

2.2.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (GIS)

Los Sistemas de Información Geográfica pueden ser definidos como un conjunto de herramientas, conformadas principalmente de hardware y software, que permiten gestionar y analizar información automatizada sobre datos georeferenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión territorial (ver Figura 2.6) [17, 43].



Figura 2.6: Sistema de Información Geográfica [5].

Según Dominguez [46] existen al menos 5 razones básicas para utilizar un SIG:

1. Permite realizar comparaciones entre escalas y perspectivas emulando una cierta capacidad de representación de diferentes lugares al mismo tiempo.
2. Aporta una gran capacidad de cálculo permitiendo diferenciar entre cambios cualitativos y cuantitativos.
3. Un SIG permite gestionar un gran volumen de información a diferentes escalas y proyecciones.
4. Integra espacialmente datos tabulares y geográficos junto a cálculos sobre variables (topología).
5. Admite multiplicidad de aplicaciones y desarrollos poniendo a nuestra disposición herramientas informáticas estandarizadas que pueden ir desde simples cajas de herramientas hasta paquetes de software sofisticados.

Se dice que el uso de los SIG funcionan mejor en casos relacionados con el estudio del medio ambiente, esto se debe a que los primeros sistemas ambientales se desarrollaron bajo el formato de los sistemas ráster y, los estudios medioambientales suelen utilizar variables continuas que se representan mejor en estos tipos de sistemas.

Una de las causas principales para utilizar un SIG es la forma de almacenamiento y procesamiento de la información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla facilitando la posibilidad de relacionar la información existente con el propósito de generar una nueva capa que no podría ser obtenida de otra manera [11, 12, 15, 24, 49, 53].

2.2.3 SENSORES DE HUMEDAD

Los sensores de humedad son dispositivos electrónicos capaces de proporcionar continuamente el nivel de humedad que existe en el lote de producción (ver Figura 2.7) [54, 70].

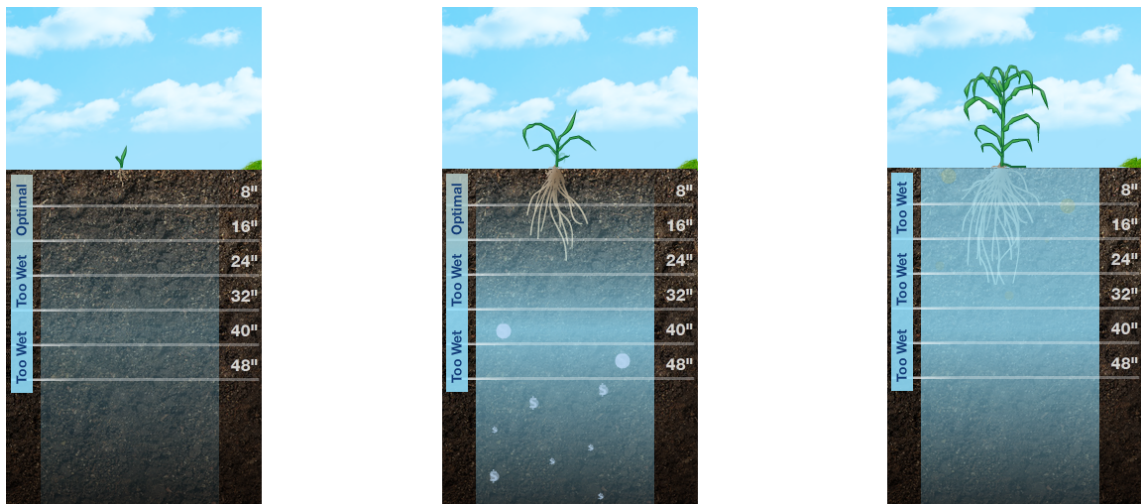


Figura 2.7: Sensores de Humedad [10].

Existen diferentes tipos de instrumentos capaces de realizar esta medición, entre ellos se encuentran los tensiómetros, las sondas de neutrones, los bloques porosos, los sensores resistivos y los sensores capacitivos.

La idea básica del funcionamiento de estos dispositivos consiste en instalar una serie de instrumentos a diferentes profundidades del suelo, por lo general a 15, 30 y 45 centímetros, para conocer el nivel de humedad que mantiene la parcela en el turno de irrigación actual.

De esta manera se puede determinar con mayor precisión y exactitud el nivel óptimo al que debe ser regado el cultivo dependiendo de su etapa fenológica de crecimiento.

A continuación se mencionan algunos beneficios de utilizar estos dispositivos.

- El rendimiento del cultivo se mantiene más uniforme dentro de todo el lote de producción.
- Se genera un mayor beneficio para el productor al final del ciclo de producción.
- La planeación de los ciclos de riego es más eficiente.
- Existe un mejor aprovechamiento de recursos e insumos, sobretodo de agua y

fertilizantes.

- Ahorro de capital de inversión.
- Menor impacto ambiental al suministrar únicamente la cantidad necesaria de componentes químicos para cada cultivo como pesticidas y herbicidas.

2.3 OPTIMIZACIÓN

Las técnicas de optimización son herramientas que han sido utilizadas durante las últimas décadas para mejorar el proceso de toma de decisiones en diversas áreas, como manufactura, transporte, construcción, telecomunicaciones, planeación financiera, cuidado de la salud y servicios públicos, entre otros [71, 72].

En el comienzo sólo se utilizaba la aplicación del cálculo diferencial y la intuición para buscar la mejor solución en el proceso de toma de decisiones, soluciones que eran muy difíciles de encontrar debido a que no existían herramientas tan poderosas como la computadora.

En 1942, durante la Segunda Guerra Mundial, el gobierno Británico organizó grupos de personas científicas para apoyar a los militares a resolver complejos problemas lógicos, estratégicos y tácticos. El principal propósito de estos grupos era maximizar el esfuerzo de guerra respetando la cantidad limitada de recursos que se tenían.

La comunidad científica Británica describió la actividad como “Investigación Operacional” mientras que en Estados Unidos realizaban algo muy similar para las operaciones militares, tales como problemas logísticos, planeación de maniobras navales y establecimiento de patrones de vuelo para aviones; ellos lo refirieron como “Investigación de Operaciones”.

Después de la Segunda Guerra Mundial, las técnicas de investigación de operaciones se expandieron y comenzaron a aplicarse tanto a nivel industrial, en empresas

públicas y privadas, como a nivel gubernamental, pues los administradores industriales observaron los resultados obtenidos de las operaciones militares y pensaron que estas técnicas podrían aplicarse como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la planeación industrial.

En 1947, George B. Dantzig desarrolló un algoritmo para resolver problemas de programación lineal al que denominó “Simplex”. Este método es ampliamente aceptado debido a su capacidad para modelar problemas importantes y complejos de decisiones administrativas y su capacidad para arrojar soluciones en lapsos de tiempo considerables [21, 38].

El concepto básico de optimización es encontrar la mejor solución posible (punto o alternativa) para un problema dado. Para encontrar esta solución se deben examinar todas las alternativas posibles y probar que la solución que ha sido seleccionada es la mejor.

Mediante un modelo científico (por lo general matemático) se hace una representación abstracta del problema que se desea solucionar. Dentro de esta formulación matemática se pretende maximizar o minimizar una función objetivo la cuál describe el comportamiento del sistema que se está estudiando y que se encuentra sujeta a una serie de limitantes o restricciones.

Entre más apegado a la realidad se desee elaborar el modelo, será mucho más difícil de modelar y el nivel de dificultad para obtener una solución para el problema puede incrementar considerablemente [21, 38, 51, 68, 74].

Existen una serie de características y suposiciones que se tienen que considerar sobre el problema que se desear resolver, estas características son:

- Una cantidad limitada de recursos disponibles.
- Los recursos son utilizados para realizar alguna actividad, para producir algún producto o para proporcionar algún servicio.
- Hay una gran variedad de formas y alternativas en la que los recursos pueden

ser utilizados.

- Cada actividad en la cuál los recursos son utilizados proporcionan un beneficio.
- La asignación de recursos es usualmente restringida por varias limitaciones.

Tomando en cuenta lo anterior, son cuatro los elementos fundamentales que componen la estructura de un modelo matemático: parámetros, variables de decisión, restricciones y función objetivo, (ver Figura 2.8).

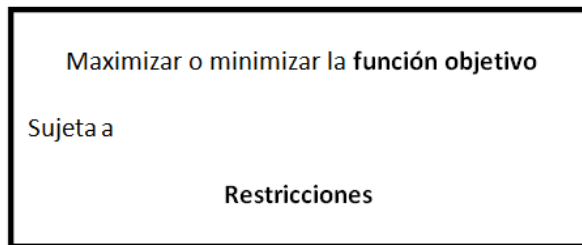


Figura 2.8: Estructura general de un modelo matemático [68].

- **Parámetros.** Son todos los datos que se conocen del problema y que permanecen constantes durante la ejecución del modelo
- **Variables de decisión.** Representan la cantidad de decisiones que se desean tomar en el modelo. Éstas pueden ser de tipo real, entero, binario o una combinación de las anteriores. Dependiendo del tipo de variables utilizadas, el modelo se puede clasificar en continuo, discreto o mixto.
- **Restricciones.** También conocidas como las limitantes del problema. Las restricciones se caracterizan por tener tres componentes principales; una función que determina la cantidad de recursos necesarios para realizar la actividad, proceso o servicio; una constante que especifica la cantidad total de recursos disponibles y; un signo de igualdad o desigualdad, dependiendo de lo que se pretenda limitar, que va a unificar a la función con la constante.

- **Función objetivo.** Como su nombre lo indica, representa el objetivo o la meta del modelo en términos de variables de decisión. Dependiendo del problema, se puede maximizar o minimizar dicha función. La función objetivo se encuentra sujeta a una serie de restricciones, las cuáles influyen directamente sobre la solución final del modelo.

En términos matemáticos, el diagrama de la Figura 2.8 se representa de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar} \quad f(x) \quad (2.3)$$

$$\text{Sujeto a} \quad g_i(x) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.4)$$

$$x \geq 0 \quad (2.5)$$

donde la ecuación (2.3) es la función objetivo del problema, que en este caso se pretende maximizar. La ecuación (2.4) representa a las restricciones del modelo que van a delimitar la solución del problema. La restricción (2.5), mejor conocida como restricción de no-negatividad, es necesaria para una gran cantidad de problemas del mundo real, ya que, al no colocarla las variables pueden tomar valores negativos y esto puede generar una solución incorrecta.

Cuando se obtiene una solución que satisface todas las restricciones del problema, se dice que ésta es una solución factible, pero, si además de satisfacer con las restricciones, es la solución que da el mejor valor para la función objetivo, ya sea para maximizar o minimizar el problema, entonces se dice que la solución es óptima [13, 63].

Los problemas de optimización pueden ser clasificados de diferentes maneras, por ejemplo, por objetivo, por tipo de problema, por tipo de variables utilizadas y, por función objetivo (ver Figura 2.9).

Los modelos clasificados dependiendo del tipo de variable son: Programa Lineal (LP), Programa Entero Lineal (IP), Programa Entero Binario (BIP) y Programa Entero Mixto (MIP), que se definen en las siguientes secciones [19].

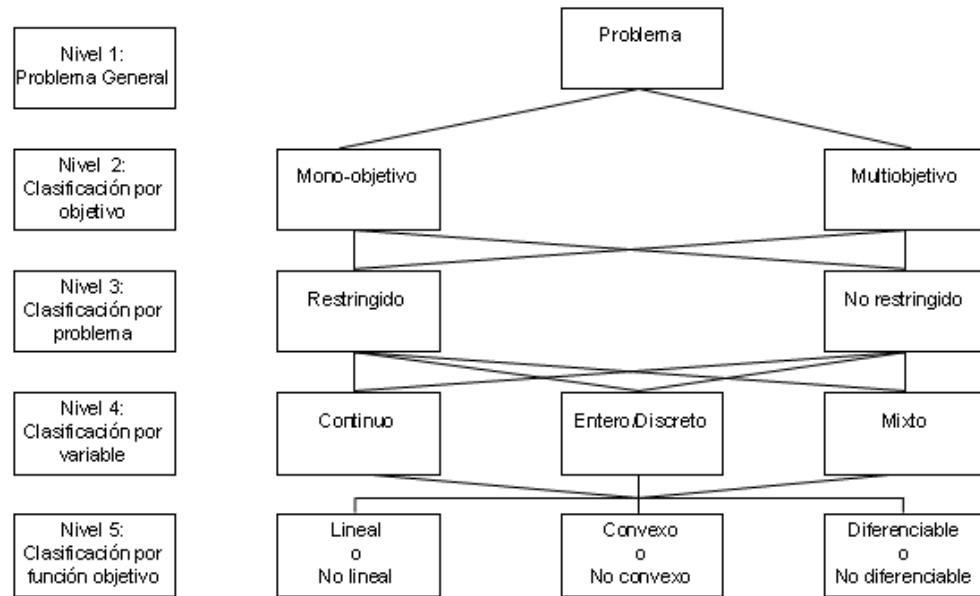


Figura 2.9: Clasificación de un modelo matemático [68].

Los modelos que se presentan en este proyecto son elaborados como Programas Enteros Mixtos (MIP), ya que se involucran variables continuas para la asignación de insumos, variables enteras para la compra de recursos y variables binarias (0 ó 1) para la toma de decisiones.

2.3.1 PROGRAMA LINEAL

Un modelo de programación lineal o programa lineal (LP) tiene la particularidad de que la función objetivo y las restricciones del modelo son desarrolladas como funciones lineales. Agregando además de que las variables toman valores reales, es decir, cualquier número que sea mayor o igual que cero [73, 75].

El programa lineal puede representarse como

$$\max cx$$

$$Ax \leq b$$

$$x \geq 0$$

donde A es una matriz de m por n , c es un vector fila de n dimensiones, b es un

vector columna de m dimensiones y x es el vector de variables de n dimensiones.

En un programa lineal hay varios factores que tienen que considerarse, entre ellos se encuentran:

- Los valores de los parámetros son conocidos y constantes.
- Tanto la función objetivo como las restricciones son proporcionales al nivel de la actividad.
- La actividad total es la suma de cada una de las actividades individuales.
- Las variables de decisión pueden tomar únicamente valores reales.
- Sólomente son permitidos valores positivos para las variables.

El algoritmo “Simplex” propuesto por Dantzig es utilizado para resolver este tipo de problemas en lapsos de tiempo considerables.

2.3.2 PROGRAMA ENTERO LINEAL

Un problema de programación entera (IP) es una extensión del problema de programación lineal. Sólo que en este caso las variables de decisión pueden tomar valores enteros [73, 75].

$$\begin{aligned} \max \quad & cx \\ \text{s.t.} \quad & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \text{ y entero} \end{aligned}$$

Este tipo de problemas son muy utilizados debido a que los valores fraccionales que pueden tomar las variables de decisión pueden no ser prácticos en varios problemas de la vida real. Es decir, no se puede comprar la mitad de un automóvil ni mucho menos se puede vender únicamente la mitad de una vaca, ésto sería ilógico, de ahí la importancia de estos problemas que son considerados dentro de la clase NP-difícil.

2.3.3 PROGRAMA ENTERO BINARIO

Al igual que en el caso anterior, un programa entero binario (BIP) es una variante del LP, sólo que en este caso las variables de decisión toman únicamente valores binarios (0 ó 1) [73, 75].

$$\begin{aligned} \max \quad & cx \\ & Ax \leq b \\ & x \in \{0, 1\}^n \end{aligned}$$

Este tipo de programas son utilizados en problemas donde se desea tomar alguna decisión y el valor de la variable puede tomar sólo un valor de dos posibles, Sí o No, y éstos pueden ser designados como cero y uno. Algunos ejemplos donde se han aplicado esta clase de programas es en problemas de decisión, donde se pretende decidir si se hace un servicio o no, si se elabora un producto o no, o si se decide realizar una actividad o no; tal es el caso de los problemas de localización o de asignación de recursos. Estos programas también son considerados dentro de la clase NP-difícil.

2.3.4 PROGRAMA ENTERO MIXTO

Un Programa Entero Mixto (MIP) debe su nombre al hecho de que dentro de su estructura existe una combinación entre variables reales y variables enteras.

Los MIP son muy utilizados en problemas del mundo real debido a que, además de tomar alguna decisión dentro del problema, se pretende asignar cierta cantidad de recursos para la elaboración de productos o ejecución de actividades [73, 75].

$$\begin{aligned} \max \quad & cx + hy \\ & Ax + Gy \leq b \\ & x \geq 0, y \geq 0 \text{ y entero} \end{aligned}$$

Aunque estos problemas están catalogados dentro de la clase NP-difícil, existen algoritmos exhaustivos inteligentes, como el de ramificación y acotamiento (Branch & Bound), capaces de proporcionar una solución en periodos de tiempo considerables.

CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

La investigación de operaciones es una técnica que ha sido ampliamente utilizada en el proceso de toma de decisiones en una gran cantidad de problemas de la vida real. Dentro de estos problemas podemos encontrar aquellos referentes a la planificación de la producción, a la secuenciación de tareas y al control de inventarios, sólo por mencionar algunos.

En la planificación de la producción agrícola la modelación matemática ha sido aplicada principalmente para maximizar beneficios y reducir costos de producción. Sin embargo, en la mayoría de los problemas en los que se ha aplicado esta herramienta, aún no se ha encontrado en la literatura algún documento que presente esta planificación atendiendo a los requerimientos hídricos de los cultivos en tiempo real. La planificación que se muestra dentro de estos documentos se basa principalmente en estimaciones sobre la cantidad de recursos que se espera sean consumidos por el cultivo durante el transcurso de todo el ciclo de producción pero nunca atendiendo a sus necesidades reales.

Recientemente han surgido nuevos documentos en donde se presenta la planificación de la producción empleando nuevas herramientas tecnológicas utilizadas en la Agricultura de Precisión como los Sensores de Humedad, los Sistemas de Información Geográfica (GIS) y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Dentro de estos documentos se puede observar cómo, además de considerarse las necesidades de los cultivos en tiempo real, también se incluyen otros factores como las propiedades y el tipo de suelo presentes dentro del lote de producción.

El problema en esta sección es que se tiene una gran cantidad de parcelas por cultivarse, una gran diversidad de cultivos por sembrarse y una cantidad limitada de recursos e insumos disponibles. Aunque se tienen todas las herramientas necesarias para determinar los requerimientos de cada cultivo en tiempo real, el problema se vuelve complejo al momento de determinar con exactitud qué cultivo plantar, cuáles cultivos regar, y cuánta cantidad de agua regar. Se recuerda que las nuevas herramientas tecnológicas ayudan sólo a determinar cuánto recurso requiere cada cultivo pero no a decidir cuánta cantidad de recursos hay que suministrar a cada cultivo de manera que se obtenga el mayor beneficio y que a su vez se minimicen los costos de producción.

A continuación se mencionan sólo algunos de los trabajos que se relacionan con nuestro problema, presentándose además el procedimiento en cómo éstos abordaron el problema de la planificación de la producción y el ahorro de recursos. En una primera parte se presentan los trabajos que implementaron técnicas de investigación de operaciones y, posteriormente, se muestran los trabajos que utilizaron las técnicas de Agricultura de Precisión para resolver el problema de la planificación.

3.1 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN LA PLANIFICACIÓN AGRÍCOLA

Dentro de los trabajos que han implementado las técnicas de investigación de operaciones para realizar la planificación de la producción y optimizar eficientemente el uso del agua se encuentran los siguientes:

En [63] y [73], Williams, Sarker y Newton presentan una serie de modelos desarrollados por medio de técnicas de programación lineal (LP) y por medio de programación entera mixta (MIP). En estos trabajos la planificación se hace tomando en cuenta únicamente cantidad de recursos disponibles, capital de inversión y demanda máxima y mínima a satisfacer para cada cultivo, pero no considera facto-

res como disponibilidad de agua durante todo el ciclo de producción, cantidad de agua que consumen los cultivos dependiendo de su etapa fenológica de crecimiento y ubicación geográfica de las parcelas. Estos elementos se consideran muy importantes en el proceso de planificación ya que influyen directamente sobre la cantidad de recursos que va a consumir el cultivo durante el ciclo de producción [6].

De Santiago, Herrera, Flores, Martínez, Soto y Berumen [22], doctores investigadores de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas, observan la importancia de realizar una buena planificación y se interesan en técnicas de programación lineal para poder llevar a cabo esta difícil tarea. El trabajo lo desarrollan para optimizar la producción en la facultad y únicamente consideran factores como el rendimiento del cultivo, costo-beneficio y superficie a planificar. No se incluyen los elementos como cantidad de agua a utilizar, tipo de suelo existente y etapa fenológica de crecimiento del cultivo.

En el 2010, Almiñana et al., formularon un sistema utilizado como herramienta de apoyo en la planificación del riego [8, 9]. En este trabajo se consideran factores como periodos de irrigación, la velocidad del flujo del agua, la presión mínima del agua, la presión de los hidrantes, asignación de prioridades, preferencias de los usuarios y la red de irrigación. La planificación del agua se hace para turnos futuros de irrigación, lo que trae como consecuencia que no se atiendan los requerimientos hídricos de los cultivos en tiempo real sino que únicamente se distribuya la cantidad de agua disponible dependiendo de las preferencias de los usuarios, de la asignación de prioridades en los hidrantes y de la red de irrigación.

En [7] y [52] se muestran modelos utilizados para la planeación de aguas residuales en varias regiones del mundo, entre ellas Palestina y China. La planeación de aguas residuales es una actividad que cada día es más común de observar debido al fenómeno de la escasez de agua que está azotando a todo el planeta. En estos trabajos la planeación del agua se realiza, en algunos casos, utilizando métodos de análisis multicriterio para obtener la mejor utilidad en base a una serie de prioridades y, en algunos otros casos, se emplean sistemas de simulación para resolver el problema.

En el 2010, Panigrahi, Mohanty, Acharya y Senapati [59] realizaron un modelo matemático tri-objetivo, en dónde además de considerar el costo y beneficio de los cultivos, también incluyen elementos como factores climáticos (lluvia, velocidad del viento, temperatura, humedad y radiación solar) y un estudio adecuado sobre las propiedades del suelo del área que se pretende planificar. Sin embargo, pese a que se toma en cuenta los niveles de evapotranspiración y los coeficientes de los cultivos, no se hace una planeación eficiente del riego considerando los requerimientos hídricos de los cultivos en tiempo real.

En [4, 60, 62] se presentan algoritmos evolutivos para resolver problemas multiobjetivo referentes a la planeación de la producción. Dentro de los objetivos que manejan estos trabajos se encuentra la minimización de agua de riego, la maximización del ingreso total neto y la maximización del rendimiento agrícola total. Pese a que estos trabajos consideran las condiciones climáticas, el tipo de suelo existente, el tipo de cultivo que se pretende sembrar y el costo-beneficio, no toman en cuenta la necesidades sobre la cantidad de agua que en realidad requiere el cultivo en un turno de irrigación específico, es decir, se realiza la planeación al inicio del ciclo pero no se le da seguimiento para que al final del ciclo de producción el rendimiento y la ganancia obtenida sea la mejor dependiendo de las cantidad de recursos disponibles.

En el 2006, Weintraub y Romero [71] elaboraron un survey en donde presentan los orígenes de la investigación de operaciones en el manejo de la producción agrícola. Aquí se pueden observar algunos trabajos en donde la planeación se realiza por medio de programación lineal, programación entera mixta, programación dinámica, análisis multicriterio, teoría de juegos y métodos de simulación. Si bien es cierto que la planeación se realiza tomando en cuenta varios factores como tipo de cultivo a ser plantado, cantidad de inversión, costo-beneficio, entre otros, nunca toman en consideración las propiedades existentes dentro del lote de producción ni mucho menos se monitorean las necesidades hídricas de los cultivos en tiempo real, sino que, algunos se basan en métodos estadísticos para estimar la cantidad de recursos que se tienen que aplicar a los cultivos durante el periodo de irrigación [36, 56, 57].

3.2 AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN LA PLANIFICACIÓN AGRÍCOLA

El nacimiento de las nuevas herramientas tecnológicas, como los Sistemas de Información Geográfica, los Sistemas de Posicionamiento Global y los Sensores de Humedad, está ayudando a planificar la producción agrícola permitiendo clasificar la diversidad del tipo de suelo existente dentro del lote de producción, estimar el nivel de la producción en un periodo determinado y obtener los requerimientos hídricos de los cultivos en tiempo real, entre otros beneficios.

En el 2009 se presentó un modelo en el que se involucra el uso de Sistemas de Información Geográfica [33]. En éste se considera la evapotranspiración del cultivo y la profundidad de humedad del suelo a través de capas de textura realizadas por el SIG. Se realizó además la subdivisión de la región a planificar en secciones homogéneas y se calculó la media de las propiedades hídricas para cada región.

Sznaider, Ferlijiwskyj, Obregon y Sobral [67] utilizan monitores de rendimiento e imágenes satelitales para planificar la producción. Dentro de este trabajo se aclara la importancia de considerar las propiedades del suelo existentes en el lote de producción y la división acertada del lote en base a dichas propiedades. Una clasificación errónea sobre el tipo de suelo puede llevar al éxito o al fracaso de una buena planeación, pues, al no tener noción sobre las propiedades del suelo en el lote, se llega a suministrar la misma cantidad de recursos y de insumos (agua y fertilizantes) en todo el predio de producción, actividad que es equívoca debido a que el suelo requiere de diferentes cantidad de recursos dependiendo de sus propiedades. A pesar de que se utilizan todos los factores mencionados anteriormente, es de resaltar que la aplicación de insumos al cultivo depende de estadística descriptiva, de visitas a campo y de análisis de suelos, lo que puede provocar que la dosis aplicada al cultivo no sea la adecuada según los requerimientos del cultivo.

En [14, 18, 54, 55] se puede encontrar una explicación sobre la importancia de

la Agricultura de Precisión en la agricultura, se da una breve reseña de las herramientas tecnológicas que comúnmente son utilizadas y se proporciona información sobre qué datos se obtienen de cada una de ellas. Se explica cómo la AP es muy importante para reducir costos de producción, aumentar la producción del cultivo, hacer uso más eficiente de los recursos e insumos y disminuir el impacto ambiental. También se puede observar la importancia de segmentar el lote de producción en secciones los más homogéneamente posibles y la relevancia de la aplicación variable de insumos dependiendo de estas particiones.

McKinion, Willeres y Jenkins [48] presentan un trabajo de análisis espacial para mejorar la producción del cultivo. Los autores toman en cuenta las propiedades del suelo, como elevación y desnivel, además de mapas de rendimiento generados mediante análisis espacial, sensores remotos y sistemas de posicionamiento global para evaluar la estabilidad de producción del cultivo en base a las propiedades del suelo.

En [44] se realiza un trabajo que emplea simulación en conjunto con Sistemas de Información Geográfica con el propósito de analizar políticas para la regularización de agua a nivel macro y regional. Es de resaltar que dentro del simulador se utiliza programación entera mixta (MIP) para maximizar el beneficio del productor y en el proceso de simulación se hace uso de escenarios para analizar cada política establecida. Se presentan además algunas ventajas de la precisión espacial.

Existen además algunos otros documentos en donde se planifica el uso del agua en la agricultura por medio de técnicas de simulación. En [66] la planificación del agua se realiza de tal manera que se pretende balancear la carga de agua para los ductos de distintos lugares de interés. Para realizar esta labor se realiza una combinación de trabajo de campo, meteorología, datos aéreos proporcionados por los SIG y software de simulación. Es de mencionar que también se toman en cuenta factores como tipo de suelo y evapotranspiración, sólo por mencionar algunos.

Aunque ya se está utilizando la Agricultura de Precisión para llevar a cabo

la planeación de la producción agrícola, aún no se han encontrado documentos en los que se combinen estas herramientas con técnicas de modelado para planificar la producción y al mismo tiempo manejar eficientemente el agua destinada para el riego de los cultivos.

Por lo tanto, en este trabajo se presenta una combinación de las metodologías mencionadas anteriormente, modelación matemática (Investigación de Operaciones) y nuevas herramientas tecnológicas (Agricultura de Precisión), para llevar a cabo la planificación de la producción agrícola tomando en cuenta los requerimientos de los cultivos en tiempo real.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN Y MODELACIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se da una descripción detallada sobre el problema que se está abordando en este proyecto de investigación. Se observa cómo el problema es dividido en dos sub-problemas, que a nuestra consideración son importantes y necesarios de realizar, para llevar a cabo de una mejor manera el proceso de planificación de la producción.

La primera fase del problema se enfoca a la planificación de la producción, proceso que se realiza al inicio del ciclo producción agrícola y cuyo objetivo principal es el de determinar la superficie y el patrón de cultivos óptimo a ser sembrado. En la Sección 4.2 se da una descripción más detallada del problema.

En la segunda fase del problema se hace referencia al manejo eficiente del agua, actividad que se realiza en cada turno de irrigación del cultivo. La finalidad de esta parte del problema es determinar exactamente la cantidad de agua a regar en cada parcela tomando en cuenta las necesidades hídricas del cultivo en tiempo real. Una descripción más detallada sobre este problema se da en la Sección 4.3.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La planificación de la producción agrícola en los sistemas de irrigación es una actividad que día a día va adquiriendo un amplio nivel de importancia debido a la gran cantidad de recursos, elementos y factores que se tienen que considerar. Entre estos factores se encuentran el tipo de suelo de la parcela, el nivel de humedad que mantiene la parcela en cada turno de irrigación, el nivel de radiación solar y la velocidad del viento, sólo por mencionar algunos.

Esta planificación debe de hacerse respetando aquellos recursos que se encuentran críticamente disponibles, poniendo mayor énfasis en la cantidad de agua que se espera tener disponible durante todo el ciclo de producción, de tal manera que se maximice el beneficio esperado para el productor al final del ciclo de producción.

Las propiedades del suelo que se encuentran en el lote de producción son otro factor que tiene que ser considerado, ya que estas propiedades ayudan a determinar la homogeneidad y/o heterogeneidad existente en el lote. Entre mayor sea la homogeneidad en el lote de producción mayor será el balance en la aplicación de insumos y recursos al cultivo y, por lo tanto, la uniformidad en el rendimiento del cultivo será mayor al final del ciclo de producción.

Lamentablemente, la gran mayoría de los productores no toman en cuenta los factores mencionados anteriormente y por ende aplican la misma cantidad de recursos y de insumos sobre todo el lote de producción ocasionando que en algunos sectores del predio el rendimiento obtenido sea sub-óptimo, mientras que, sólo en algunos pocos sectores, el rendimiento alcanzado sea el óptimo.

Lo anterior genera además otro tipo de consecuencias, por ejemplo, un incremento innecesario en los costos de producción. Al no conocer las propiedades del suelo dentro del lote de producción y el desconocer los requerimientos de los cultivos en tiempo real ocasiona que los agricultores suministren, por lo general, una cantidad mayor de insumos y recursos al cultivo, provocando que se incrementen los gastos

en el coste total de la producción al final del ciclo.

Si a todo lo que se ha mencionado anteriormente también se toma en cuenta que el agua es un recurso natural que se está agotando en gran parte del territorio mexicano y que la agricultura en México, sobretodo la que se desarrolla en el centro-norte del país, se caracteriza por su disponibilidad limitada de agua, el problema de la planificación de la producción agrícola se vuelve aún más complejo y difícil de realizar. Es por eso que se tienen que tener en cuenta todos los factores antes mencionados para llevar a cabo de una mejor manera la planificación de la producción.

Se considera necesario el apoyo en las nuevas herramientas tecnológicas utilizadas en la Agricultura de Precisión, como los Sistemas de Posicionamiento Global, los Sistemas de Información Geográfica y los Sensores de Humedad, para obtener información exacta, clara y precisa sobre las propiedades del suelo y sobre los requerimientos del cultivo en tiempo real.

Con los Sistemas de Información Geográfica se puede caracterizar la diversidad de tipos de suelo existentes dentro de un mismo lote de producción de acuerdo a una propiedad específica del suelo como su nivel de PH, cantidad de materia orgánica y profundidad, entre otros. Además, también se pueden determinar las áreas de alto, intermedio y bajo potencial.

Los Sensores de Humedad proporcionan información en tiempo real sobre el nivel hídrico que mantiene el cultivo en cada turno de irrigación. De esta manera, se puede suministrar al cultivo únicamente la cantidad óptima de agua y de recursos dependiendo de sus necesidades hídricas en tiempo real y de su etapa fenológica de crecimiento.

Este proyecto se enfoca a realizar la planificación de la producción agrícola y al manejo eficiente del agua en un sistema de irrigación. Para llevar a cabo lo anterior, primero se va a determinar el patrón de cultivos óptimo a ser sembrado, respetando el tipo de suelo y la cantidad limitada de insumos y de recursos naturales disponibles,

de tal manera que se maximice el beneficio esperado para el agricultor al final del ciclo de producción.

Una vez que se ha determinado el patrón de cultivos que debe de ser sembrado y tomando en cuenta que el agua es un recurso natural que se está agotando, el siguiente paso consiste en optimizar la cantidad de agua total disponible, empleada para el riego de los cultivos, de tal manera que se minimice la cantidad de agua en cada turno de irrigación pero procurando al mismo tiempo que todos los cultivos mantengan su nivel hídrico óptimo.

A continuación se presentan las consideraciones y supuestos para cada fase del problema así como su respectivo modelo matemático.

4.2 PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Esta primera parte del problema se realiza al inicio del ciclo de producción. El objetivo principal es determinar la superficie y el patrón de cultivos óptimo que debe de ser sembrado respetando la cantidad de recursos e insumos que se espera tener disponibles durante todo el ciclo de producción (ver Figura 4.1).

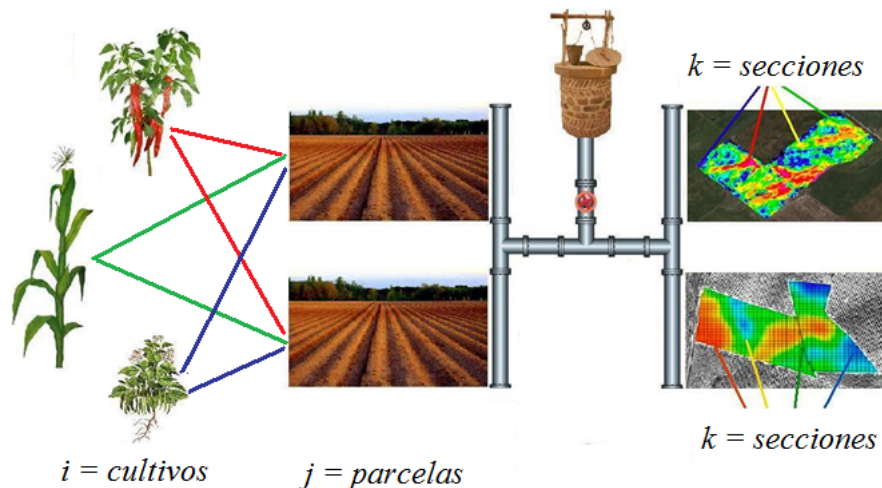


Figura 4.1: Planificación de la producción.

4.2.1 SUPUESTOS.

Para cumplir con el objetivo de esta fase es necesario considerar una serie de supuestos que son importantes en la formulación del modelo matemático. Los supuestos se presentan a continuación.

1. Existen diferentes tipos de cultivos que pueden ser sembrados.
2. Existen varias parcelas que pueden ser cultivadas.
3. La parcela se encuentra seccionada de acuerdo a una propiedad específica del suelo. Cada sección es generada lo más uniformemente posible según una propiedad específica del suelo por ejemplo, Materia Orgánica, Nitrógeno, Fósforo, Potasio o una combinación de varias propiedades.
4. La cantidad de hectáreas totales de cada parcela es conocida.
5. Se conoce la cantidad de hectáreas totales para cada sección de la parcela.
6. Las parcelas pueden ser sembradas únicamente por un cultivo.
7. El costo, en pesos, por sembrar una hectárea es conocido para cada cultivo.
8. La esperanza de la cantidad de agua requerida, en m^3 por hectárea, para cada cultivo y para cada parcela es conocida.
 - En caso de tener registros de consumo de agua de ciclos anteriores, para cada sección de cada parcela, la cantidad de agua requerida será por sección.
 - En caso contrario, la cantidad de agua requerida para cada sección será igual para todas.
9. Se conoce la esperanza de la cantidad total de agua disponible durante todo el ciclo de producción.
10. El costo, en pesos, por obtener un m^3 de agua es conocido para cada parcela.

11. La cantidad, en kilogramos, de semilla existente para cada cultivo es conocida.
12. Para cada cultivo, se conoce la cantidad, en kilogramos, de semilla requerida para sembrar una hectárea.
13. Se puede comprar más cantidad de semilla por cultivo en caso de ser necesario.
14. El costo, en pesos, por comprar un kg de semilla de cada cultivo es conocido.
15. La esperanza del rendimiento, en toneladas por hectárea, para cada cultivo también es conocida.
16. Se conoce la esperanza de la ganancia total recibida, en pesos, por vender una tonelada del cultivo, esto es para cada cultivo.
17. Para algunos cultivos existe cierta demanda por satisfacer.

4.2.2 MODELO MATEMÁTICO.

A continuación se describe la notación que ha sido utilizada en la formulación del modelo matemático. Primeramente se definen los conjuntos e índices del modelo, posteriormente se especifican los parámetros y por último se declaran las variables que son utilizadas para satisfacer los supuestos mencionados anteriormente.

NOTACIÓN

Conjuntos e índices.

- I Conjunto de cultivos i que pueden ser sembrados.
- J Conjunto de parcelas j disponibles para ser cultivadas.
- K Conjunto de secciones k que contiene cada parcela.

Parámetros.

- G_i Esperanza del beneficio total, en pesos, de vender una tonelada del cultivo i .
- R_{ij} Esperanza del rendimiento, en toneladas por hectárea, que se producen del cultivo i en la parcela j .
- H_j Cantidad de hectáreas totales en la parcela j .
- Hs_{jk} Cantidad de hectáreas totales en la sección k de la parcela j .
- D_i Cantidad de demanda, en toneladas, a satisfacer para el cultivo i . Esto sólo aplica para ciertos cultivos.
- S_i Cantidad de semilla, en kilogramos, existente del cultivo i .
- N_i Cantidad de semilla, en kilogramos, que se necesitan para sembrar una hectárea de tierra con el cultivo i .
- A Esperanza de la cantidad total de agua, en m^3 , para todo el ciclo de producción.
- W_{ijk} Esperanza de la cantidad de agua requerida, en m^3 , para regar una hectárea del cultivo i en la parcela j en la sección k .
- I_0 Subconjunto de cultivos i que tienen demanda por satisfacer.
- Ca_j Costo, en pesos, por obtener un m^3 de agua para la parcela j .
- Cs_i Costo, en pesos, por comprar un kilogramo de semilla del cultivo i .
- Cp_i Costo, en pesos, por sembrar una hectárea del cultivo i .

Variables.

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si el cultivo } i \text{ se planta en la parcela } j. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

- y_i Cantidad de semilla, en kilogramos, a comprar del cultivo i .

MODELO MATEMÁTICO: “PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN”.

El modelo matemático resultante para determinar la superficie y el patrón de cultivos óptimo a ser sembrado es el siguiente:

$$\begin{aligned}
\text{maximizar} \quad z = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} [G_i \cdot R_{ij} \cdot H_j \cdot x_{ij} - Cp_i \cdot H_j \cdot x_{ij} - \\
& -Ca_j \cdot x_{ij} \cdot \sum_{k \in K} (W_{ijk} \cdot Hs_{jk})] - \sum_{i \in I} Cs_i \cdot y_i
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \tag{4.2}$$

$$\sum_{j \in J} R_{ij} \cdot H_j \cdot x_{ij} \geq D_i \quad \forall i \in \{I_0\} \tag{4.3}$$

$$\sum_{j \in J} N_i \cdot H_j \cdot x_{ij} \leq S_i + y_i \quad \forall i \in I \tag{4.4}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[\sum_{k \in K} W_{ijk} \cdot Hs_{jk} \right] \cdot x_{ij} \leq A \tag{4.5}$$

$$y_i \in \mathbb{Z}^+ \quad i \in I \tag{4.6}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i \in I, j \in J \tag{4.7}$$

donde la ecuación (4.1) representa a la función objetivo que en este caso maximiza la esperanza de la ganancia total al final del ciclo de producción. Esto se realiza restándole a la esperanza del beneficio total (ganancias por vender la producción) la esperanza del costo de producción (costos por sembrar, por regar y por comprar semilla).

En la restricción (4.2) se hace hincapié a que sólo un cultivo debe de ser plantado en cada parcela y en la restricción (4.3) se especifica que la demanda mínima para el cultivo i tiene que ser satisfecha en caso de ser necesario. En (4.4) y en (4.5) se establece que debe de existir el grano suficiente para sembrar las parcelas y que la esperanza de la cantidad de agua requerida para sembrar los cultivos no debe sobrepasar la cantidad de agua total que se espera tener durante todo el ciclo de producción.

En (4.6) se determina que únicamente se pueden comprar cantidades enteras de grano de semilla para cualquier cultivo y, en (4.7) se declara la variable binaria para

representar las decisiones de si se planta un cultivo en una parcela o no, tomando el valor de 1 si el cultivo i es sembrado en la parcela j ó, valor de 0 en caso contrario.

Hasta este punto de la investigación se ha presentado el modelo dedicado a la planificación de la producción destinado para determinar la superficie y el patrón de cultivos óptimo que tiene que ser sembrado para obtener el mayor beneficio al final del ciclo de producción. En el Capítulo 6 se presenta la metodología de solución y parte de los resultados de este modelo matemático.

Es importante destacar que los resultados provenientes de este primer modelo son obtenidos por optimalidad y en lapsos de tiempo muy cortos y, sirven de parámetros para la resolución del modelo dedicado al manejo eficiente del riego que se presenta a continuación.

4.3 PLANIFICACIÓN EFICIENTE DEL RIEGO

El objetivo de esta fase de la investigación es determinar la cantidad óptima de agua que se va a suministrar a los cultivos, atendiendo a sus requerimientos hídricos en tiempo real, tratando de mantener al 100 % el rendimiento del cultivo en cada sección de la parcela durante cada turno de irrigación. Los principales elementos a considerar en esta fase del problema son tipo de cultivo sembrado en cada parcela, cantidad de agua disponible en el turno de irrigación y nivel de humedad almacenado en la parcela (ver Figura 4.2).

Para cumplir de manera eficiente con el objetivo anterior se han establecido una serie de supuestos para delimitar el alcance del problema y poder realizar el modelo matemático correspondiente. Los supuestos se presentan a continuación.

4.3.1 SUPUESTOS.

1. Se conoce el tipo de cultivo sembrado en cada parcela. Dato que es conocido del resultado del modelo anterior.

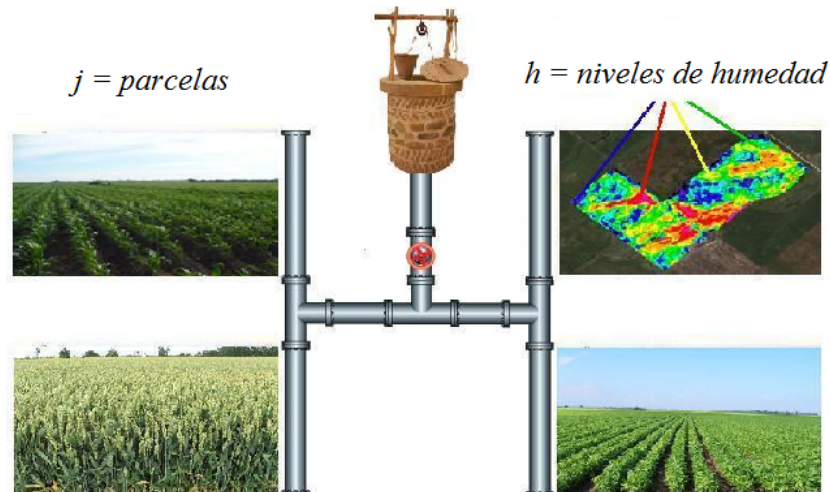


Figura 4.2: Planificación eficiente del riego.

2. La cantidad de hectáreas sembradas en cada parcela es conocida.
3. Cada sección de cada parcela es considerada como una parcela independiente.
4. Se conoce la cantidad de hectáreas totales para cada sección de la parcela.
5. Se desea que en cada sección de la parcela el cultivo alcance el 100% de su rendimiento al final del ciclo de producción.
6. El nivel de humedad que almacena la parcela en cada turno de irrigación es conocido. Este dato es proporcionado por los sensores de humedad.
7. Se conoce el rendimiento actual del cultivo. Esto depende directamente del rendimiento alcanzado por el cultivo en el turno de irrigación anterior, del nivel de humedad de la parcela en el turno actual y de la etapa fenológica de crecimiento del cultivo.
8. Un aspecto que es muy importante de considerar es que si el cultivo no se riega a su nivel óptimo en cada turno de irrigación, su rendimiento va a disminuir y éste jamás será recuperado pese a que en los próximos turnos se vuelva a regar al nivel óptimo. La Figura 4.3 presenta un ejemplo sobre el comportamiento del rendimiento del cultivo. En los primeros dos turnos de irrigación el cultivo

se riega a su nivel óptimo, por lo tanto, el rendimiento alcanzado es el 100%. Sin embargo, en el tercer periodo no se riega a nivel óptimo lo que ocasiona una disminución en el rendimiento y éste ya no es recuperado aunque en otros turnos de irrigación el cultivo sea regado a nivel óptimo.

9. Se sabe con anticipación la cantidad total de agua disponible para cada turno de irrigación. En caso de que no exista la suficiente cantidad de agua para regar todos los cultivos se puede dejar de regar aquél cultivo que genere el menor beneficio para el productor.
10. El beneficio obtenido por tonelada producida dependiendo del cultivo sembrado en cada parcela es conocido.
11. Para cada turno de irrigación, la ganancia final depende del rendimiento de producción del cultivo, el rendimiento del nivel de humedad de la parcela, el nivel de humedad de la cantidad de agua que ha sido proporcionada para el riego y esta última de la cantidad total de agua que se tiene disponible. Como se puede observar, los factores mencionados dependen básicamente de la cantidad de agua que se tiene disponible.

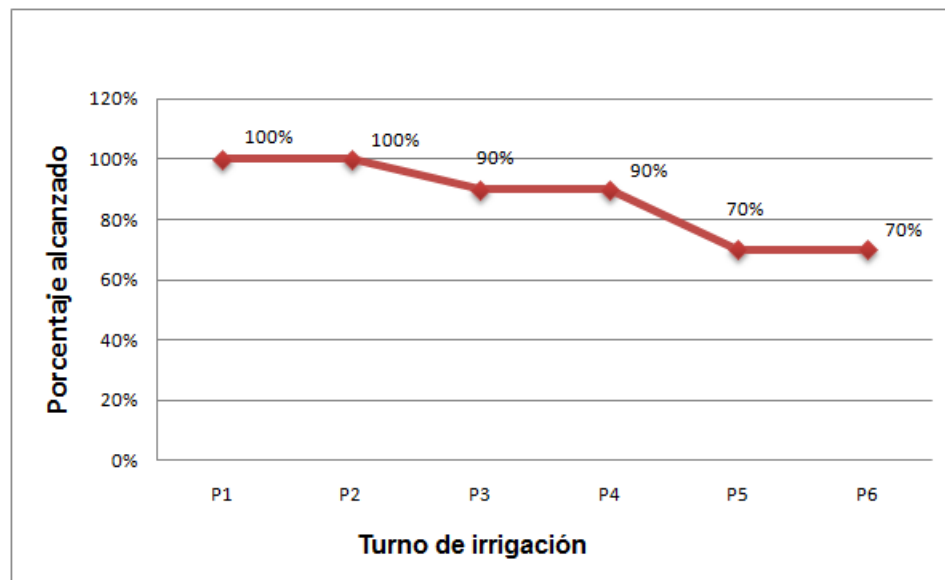


Figura 4.3: Comportamiento del rendimiento del cultivo.

En la ecuación (4.8) se muestra un ejemplo sobre el comportamiento del rendimiento del cultivo para cada turno de irrigación. $\bar{R}_{j(p-1)}$ determina el rendimiento que alcanzó el cultivo en el turno anterior. Los valores decimales (0.3, 0.8, ..., 1.0) representan el porcentaje al que será multiplicado el rendimiento anterior dependiendo del nivel de humedad alcanzado en la parcela, este último representado por los valores de la decisión (Si $0 \leq x \leq 10, \dots, 60 \leq x \leq 80$). P indica los turnos de irrigación para los que son válidos esos valores.

$$R_j^p = \begin{cases} \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.3 & \text{Si } 0 \leq x \leq 10 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 1.0 & \text{Si } 10 \leq x \leq 20 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.9 & \text{Si } 20 \leq x \leq 40 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.8 & \text{Si } 40 \leq x \leq 60 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.7 & \text{Si } 60 \leq x \leq 80 \\ \hline \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.3 & \text{Si } 0 \leq x \leq 10 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.8 & \text{Si } 10 \leq x \leq 20 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 1.0 & \text{Si } 20 \leq x \leq 40 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.9 & \text{Si } 40 \leq x \leq 60 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.8 & \text{Si } 60 \leq x \leq 80 \\ \hline \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.3 & \text{Si } 0 \leq x \leq 10 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.5 & \text{Si } 10 \leq x \leq 20 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.8 & \text{Si } 20 \leq x \leq 40 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 1.0 & \text{Si } 40 \leq x \leq 60 \\ \bar{R}_{j(p-1)} \cdot 0.8 & \text{Si } 60 \leq x \leq 80 \end{cases} \quad \forall p \in P_0 = \{1, 2, 3\} \quad (4.8)$$

Por ejemplo, para el turno 1, 2 y 3 se puede observar que si la parcela se riega entre 10 y 20 cm de profundidad, el rendimiento del cultivo para el periodo actual será el 100 por ciento de su rendimiento anterior, pero si el cultivo es regado a menos de 10

cm, el rendimiento del cultivo únicamente alcanzará el 30 por ciento del rendimiento anterior.

Note que los porcentajes del rendimiento cambian dependiendo del turno de irrigación y de la profundidad a la que es regada la parcela, ésto se debe a la necesidad de agua que tiene el cultivo dependiendo de su etapa fenológica de crecimiento.

4.3.2 MODELO MATEMÁTICO.

La notación que ha sido utilizada para la elaboración de este segundo modelo es la siguiente.

NOTACIÓN

Conjuntos e índices.

J Conjunto de parcelas j cultivadas.

H Conjunto de niveles de humedad h disponibles.

P Conjunto de turnos de irrigación p que tiene que ser regados una parcela.

Parámetros.

G_j Esperanza de la ganancia total de vender una tonelada del cultivo de la parcela j .

Fa_j Factor de absorción de la parcela j .

H_j Cantidad de hectáreas sembradas en la parcela j .

D_h Nivel de profundidad del sensor de humedad h .

PC_{jh}^p Porcentaje de rendimiento de la parcela j si se riega hasta el nivel de humedad h en el turno de irrigación p .

A_j^p Nivel de humedad almacenado en la parcela j en el turno de irrigación p .

W^p Cantidad de agua total disponible para el turno de irrigación p .

$\bar{R}_j^{(p-1)}$ Rendimiento alcanzado de la parcela j en el turno de irrigación anterior.

Variables.

$$N_{jh}^p = \begin{cases} 1 & \text{Si la parcela } j \text{ alcanza el nivel de humedad } h \text{ en el turno } p. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

x_j^p Cantidad de agua regada en la parcela j en el turno p .

$Nivel_j^p$ Nivel de humedad alcanzado en la parcela j en el turno p .

R_j^p Rendimiento alcanzado en toneladas por hectárea en la parcela j en el turno p .

MODELO MATEMÁTICO: “PLANIFICACIÓN EFICIENTE DEL RIEGO”.

El modelo matemático resultante para determinar la cantidad de agua a regar sobre cada cultivo dependiendo de sus necesidades hídricas en tiempo real y de la disponibilidad de agua por turno de irrigación es el siguiente:

Para cada periodo $p \in P$

$$\text{maximizar} \quad z = \sum_{j \in J} G_j \cdot H_j \cdot R_j^p \quad (4.9)$$

Sujeto a:

$$Nivel_j^p = x_j^p / (Fa_j^p \cdot H_j) + A_j^p \quad \forall j \in J \quad (4.10)$$

$$D_h \cdot N_{jh}^p \leq Nivel_j^p \quad \forall j \in J, \forall h \in H \quad (4.11)$$

$$\sum_{j \in J} x_j^p \leq W^p \quad (4.12)$$

$$R_j^p = \bar{R}_j^{(p-1)} \cdot \sum_{h \in H} Pc_{jh}^p \cdot N_{jh}^p \quad \forall j \in J \quad (4.13)$$

$$x_j^p \geq 0 \quad j \in J \quad (4.14)$$

$$Nivel_j^p \geq 0 \quad j \in J \quad (4.15)$$

$$R_j^p \geq 0 \quad j \in J \quad (4.16)$$

$$N_{jh}^p \in \{0, 1\} \quad j \in J, h \in H \quad (4.17)$$

Donde la ecuación (4.9) hace referencia a la función objetivo del modelo que maximiza la esperanza de la ganancia total durante cada turno de irrigación.

La restricción (4.10) indica el nivel de humedad que alcanzó la parcela después de haber sido regada. Es decir, la cantidad de agua suministrada a la parcela (dividida entre un factor de absorción que hace referencia a la etapa fenológica de crecimiento del cultivo) más la cantidad de agua que tiene almacenada el lote debido a posibles precipitaciones o riegos anteriores.

La ecuación (4.11) determina hasta qué nivel ha sido regada la parcela y la restricción (4.12) especifica que no se debe de exceder la cantidad total de agua disponible en cada turno de irrigación.

En (4.13) se determina el rendimiento que ha alcanzado la parcela después de haber sido regada. Esto se obtiene multiplicando el rendimiento del periodo anterior por el porcentaje acumulado dependiendo del nivel de humedad que ha sido alcanzado. En caso de que al cultivo se le suministre una cantidad mayor de agua, el rendimiento será penalizado multiplicándolo por un porcentaje menor que el porcentaje del nivel de riego óptimo. Esto se puede ver en la ecuación (4.8).

En las restricciones (4.14), (4.15), (4.16) y (4.17) se declara la naturaleza de las variables utilizadas en el modelo. Las primeras tres pueden tomar valores continuos y la última es una variable binaria que determina si se ha llegado hasta cierto nivel de humedad o no.

CAPÍTULO 5

OBTENCIÓN DE PARÁMETROS

La obtención de parámetros es una parte muy importante a considerar en este proyecto de investigación. El no ajustar correctamente cada uno de los valores de entrada para cada uno de los modelos presentados en el capítulo anterior puede traer como consecuencias que las soluciones arrojadas, pese a que éstas son las soluciones óptimas, sean incorrectas y quizás no sean la mejor opción por el productor. Por tal motivo, hay que tener especial cuidado al momento de hacer el ajuste de parámetros en cada uno de los modelos.

Existen varios factores que pueden afectar directamente sobre el ajuste de parámetros, por ejemplo, la ubicación geográfica del productor, el tipo de cultivo a producir y, la región, generalmente utilizada por el productor, para comercializar los productos, sólo por mencionar algunos.

En este capítulo se describe el procedimiento utilizado para realizar el ajuste de parámetros para cada uno de los modelos de este proyecto de investigación. Primeramente, se presenta el ajuste para el modelo dedicado a la planificación de la producción y, posteriormente, se presenta el ajuste para el modelo de la planificación eficiente del riego.

5.1 PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Para realizar el ajuste de parámetros correspondientes a esta fase del proyecto se ha recurrido primeramente a realizar una clasificación para determinar el tipo de parámetros que son necesarios para el funcionamiento del modelo y, posteriormente, se ha procedido a describir cómo se obtiene cada uno de estos valores.

La clasificación consiste básicamente en construir dos grupos de parámetros. El primer grupo hace referencia a aquellos parámetros que, debido a su naturaleza y a que no se conoce un dato exacto, se fijan en base a un valor esperado, es decir, se les asigna un dato fijo tomado directamente de la temporada anterior con la esperanza de que el comportamiento del parámetro para la temporada actual sea semejante al de la temporada pasada.

El segundo grupo está enfocado hacia aquellos parámetros de los que se tiene información exacta y el valor es conocido tanto por el tomador de decisiones como por el productor.

5.1.1 CLASIFICACIÓN DE PARÁMETROS.

PARÁMETROS AJUSTADOS CON VALORES ESPERADOS. Dentro de este grupo de parámetros encontramos los siguientes:

- Esperanza del beneficio total, en pesos, de vender una tonelada del cultivo.
- Esperanza del rendimiento, en toneladas por hectárea, que se producen por cultivo.
- Esperanza de la cantidad total de agua disponible, en m^3 , para regar durante todo el ciclo de producción.
- Esperanza de la cantidad de agua que se requiere, en m^3 , para regar una hectárea de cada cultivo en cada parcela dependiendo del tipo de suelo existente

en cada sección de la parcela.

- Costo, en pesos, por obtener un m³ de agua para regar cada parcela.
- Costo, en pesos, por sembrar una hectárea de cada cultivo.

PARÁMETROS AJUSTADOS CON VALORES REALES. Dentro de los parámetros de los que se tiene información exacta se encuentran los siguientes:

- Cantidad de hectáreas totales en cada parcela.
- Cantidad de hectáreas totales en cada sección de cada parcela.
- Cantidad de demanda, en toneladas, a satisfacer para cada cultivo.
- Cantidad de semilla existente, en kilogramos, para sembrar cada cultivo.
- Cantidad de semilla que se necesitan, en kilogramos, para sembrar una hectárea de cada cultivo.
- Costo, en pesos, por comprar un kilogramo de semilla para cada cultivo en caso de ser necesaria.

5.1.2 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS.

PARÁMETROS AJUSTADOS CON VALORES ESPERADOS.

En esta sección se presentan diversas formas para fijar los valores de los parámetros debido a que éstos pueden variar dependiendo a una gran cantidad de factores como por ejemplo el de la ubicación geográfica, sólo por mencionar alguno.

Una manera de obtener valores para los modelos es utilizando el “Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta” (SIACON), proporcionado por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). El SIACON es

un programa informático que permite explotar con facilidad una base de datos con información agrícola, pecuaria y pesquera almacenada con valores que van desde el año 1980 hasta el año 2010 y que año con año es actualizada. Entre los valores que se pueden obtener de este sistema se encuentran el rendimiento del cultivo, precio medio rural, valor de la producción, rendimiento en toneladas por hectárea, entre otros. La sección 5.3 muestra el procedimiento a realizar para obtener los parámetros mencionados anteriormente por medio de este sistema.

Una alternativa para reemplazar el SIACON es por medio del “Anuario Estadístico”. Un sistema que también es proporcionado por la SAGARPA y del cuál se pueden obtener los mismos parámetros que el sistema anterior. El procedimiento para la obtención de datos por medio de este sistema es presentado en la sección 5.4.

Otra manera para fijar los parámetros de costo-beneficio de los cultivos es por medio del “Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados” (SNIIM). Un servicio de la Secretaría de Economía que tiene el propósito de ofrecer información sobre el comportamiento de los precios al por mayor de los productos agrícolas, pecuarios y pesqueros que se comercializan en los mercados nacionales e internacionales de todo el país. En la sección 5.5 se presentan los pasos a realizar para la obtención de parámetros utilizando este sistema.

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) es otra opción más para ajustar los valores a los parámetros de los modelos. Debido a que existe un centro de investigación del INIFAP en cada estado de la República, los productores pueden obtener información específica dependiendo de sus necesidades y de la ubicación geográfica donde se encuentren localizados. La sección 5.6 muestra el procedimiento a realizar para obtener datos por este medio.

Existe además software comercial, como el AgroWin, capaz de proporcionar información muy completa sobre las características de los cultivos. Se destacan los informes de costos de producción, los informes de control de mano de obra, control de insumos y materiales y costeo de maquinaria y equipo, entre otros. Para el uso de este

software no se presenta un manual de operaciones que explique su funcionamiento debido a que la finalidad de esta tesis es mostrar modelos matemáticos que ayuden en la planificación de la producción y en el manejo eficiente del agua y sólo algunas de las herramientas para la obtención de sus parámetros.

Pese a que en el INIFAP, en el SNIIM, en el SIACON, en el Anuario Estadístico de la SAGARPA y en el AgroWin se presenta información real sobre los cultivos, es posible que para algunos productores esta información no represente algún valor cercano a la realidad de los datos que ellos manejan y, probablemente tengan que recurrir a un estudio más personalizado para fijar los valores de los parámetros dependiendo de sus necesidades.

Por tal motivo, el ajuste de parámetros para los valores de rendimiento y de costo-beneficio, es una opción que se deja libre para que cada productor lo adapte según las necesidades, recursos, requerimientos y ubicación geográfica que mejor le acomoden. Recordemos que los parámetros sólo influyen en el valor final de la función objetivo y no en el funcionamiento del modelo matemático.

En cuanto al consumo de agua se refiere, para el parámetro referente a la esperanza de la cantidad total de agua disponible durante el ciclo agrícola, se establece la cantidad máxima de agua que se puede extraer para cada cultivo por hectárea sembrada según la Ley de Aguas Nacionales, que es de $6,000 \text{ m}^3$.

PARÁMETROS AJUSTADOS CON VALORES REALES.

Dentro de los parámetros que son ajustados de acuerdo a datos reales se encuentra la cantidad de hectáreas totales de cada parcela, cantidad de demanda a satisfacer de ciertos cultivos, cantidad de semilla requerida para sembrar una hectárea de un determinado cultivo. Para asignar un valor fijo a estos parámetros simple y sencillamente se introducen aquellos valores que son conocidos por el productor.

5.2 PLANIFICACIÓN EFICIENTE DEL RIEGO

Para el modelo presentado en esta etapa, todos los parámetros son conocidos y por lo tanto, los datos introducidos al modelo son valores en tiempo real.

Los parámetros que se necesitan fijar son los siguientes:

- Beneficio total, en pesos, de vender una tonelada del cultivo sembrado en cada parcela.
- Cantidad de hectáreas sembradas en la parcela.
- Cantidad total de agua disponible, en m^3 , para el turno de irrigación actual.
- Factor de absorción del cultivo en la parcela.
- Nivel de humedad almacenado en la parcela en el turno de irrigación actual.
- Porcentaje de rendimiento alcanzado en el cultivo si la parcela mantiene cierto nivel de humedad.
- Rendimiento, en toneladas por hectárea, alcanzado por el cultivo en el turno de irrigación anterior.

El beneficio total por tonelada de cada cultivo sembrado puede obtenerse, tal y como se hizo en el modelo anterior, por medio del SIACON, del Anuario Estadístico de la SAGARPA ó, a través del SNIIM (ver secciones 5.3, 5.4 ó 5.5, respectivamente). Se recomienda utilizar el SNIIM ya que proporciona información al día sobre el comportamiento de los precios de los cultivos en los mercados nacionales e internacionales.

La cantidad de hectáreas sembradas en la parcela es un valor que se conoce después de resolver el modelo de la planificación de la producción. Por lo tanto, para este punto, tanto el tomador de decisiones como el productor conocen la cantidad de hectáreas sembradas para cada cultivo en cada parcela.

La cantidad de agua total disponible en cada turno de irrigación es conocida por el productor y depende básicamente de la capacidad de almacenamiento del depósito de agua (volumen de la presa, profundidad del pozo o capacidad de la planta tratadora, según sea el caso). En la concesión de agua, proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CNA), se especifica la cantidad de agua que puede extraer cada productor para el riego de sus cultivos.

El factor de absorción del cultivo en la parcela se refiere a la cantidad de agua que requiere el cultivo en cada periodo de irrigación. Para determinar el volumen de agua a regar en los cultivos se utiliza la fórmula de Penman-Monteith (2.1) descrita en el Capítulo 2. Recordemos que la cantidad de agua depende del tipo de cultivo y de su etapa fenológica de crecimiento, por lo tanto, se necesitan los elementos de coeficiente del cultivo (K_c) y de evapotranspiración de referencia (ET_0). En la sección 5.7 se muestran los coeficientes de cultivo para algunos cultivos de la República Mexicana y, en la sección 5.6, en la subsección de “Planificación eficiente del riego”, se proporciona el procedimiento para obtener el índice de evapotranspiración de referencia del cultivo.

Por medio de los sensores de humedad se conoce el nivel de humedad almacenado en la parcela durante cada periodo de irrigación. Recordemos que este parámetro puede variar debido a posibles precipitaciones o por la aplicación de riegos anteriores y es de vital importancia conocerlo para determinar con exactitud la cantidad de agua que necesita el cultivo dependiendo de su etapa fenológica de crecimiento.

Para el parámetro del rendimiento alcanzado por el cultivo en el turno de irrigación anterior, como su nombre lo indica, sólo basta con tomar el valor de la función objetivo del turno de irrigación anterior.

5.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA DE CONSULTA

5.3.1 OBJETIVO DEL SISTEMA

El Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) es un programa informático proporcionado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), que permite explotar con facilidad una base de datos con información agrícola, pecuaria y pesquera. Proporciona información por Entidad Federativa de los años 1980 a 2010.

La superficie sembrada, superficie cosechada, producción y valor de la producción son algunas de las variables de consulta que maneja el sistema. Se tienen además diferentes clasificaciones para el cultivo, como por ejemplo, tipo de cultivo (anual y/o perenne), ciclo agrícola y modalidad del cultivo (riego o temporal).

Para obtener los parámetros por medio del SIACON es necesario primero descargar el programa de la página del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) e instalarlo en el computador [65].

5.3.2 INGRESAR AL SISTEMA

Inicio del sistema. La Figura 5.1 presenta la Interfaz inicial del SIACON. En esta pantalla se encuentran el acceso a los subsistemas de información pecuaria, agrícola y pesquera. Por obvias razones se presentará únicamente el funcionamiento para el subsistema de información agrícola.

Interfaz del subsistema de información agrícola. Esta interfaz se compone de tres partes principales, el área de definición de parámetros, el área de despliegue de resultados y el área de comandos (ver Figura 5.2). Cada área se describe a continuación.

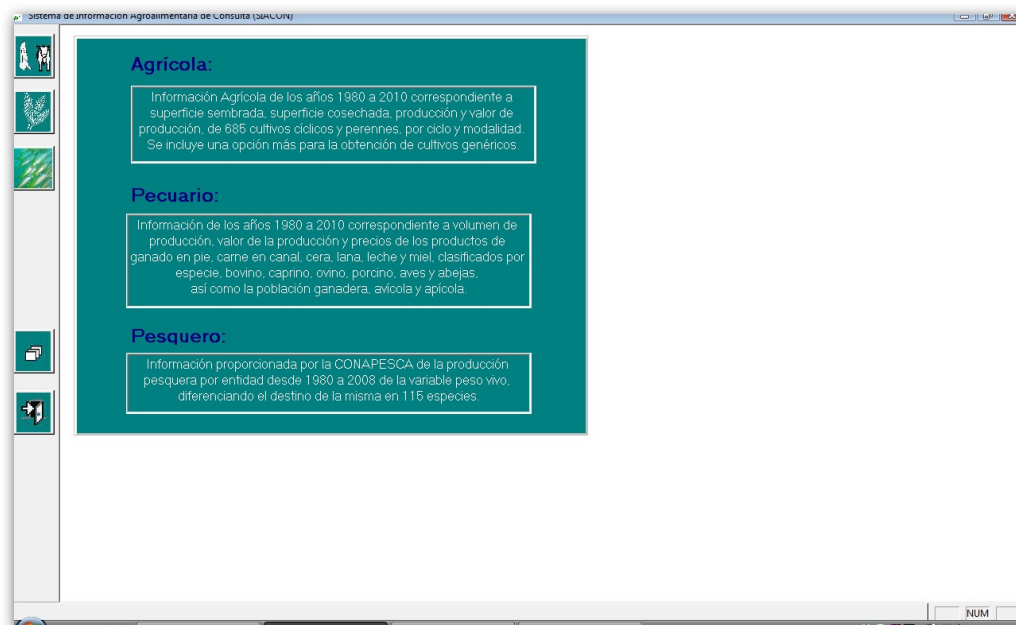


Figura 5.1: Interfaz principal del SIACON.

1. **Área de definición de parámetros.** En esta sección se especifican las características de los cultivos sobre los que se desea obtener información. Dentro de los elementos que componen a esta parte del sistema se encuentran la clase (que define cuál es la forma en la que se quiere que se presenten los datos de los cultivos), el Estado (que indica cuál es el estado de la República sobre el que se está pidiendo la información), el ciclo (que determina el ciclo de siembra del cultivo, por ejemplo, Primavera-Verano, Otoño-Invierno, Perenne o Año Agrícola), modalidad (especifica a qué modalidad pertenece el cultivo ya sea de Riego, Temporal o Riego-Temporal), año (define el año de la información que se está solicitando), cultivo (especifica cuál es el cultivo del que se desea obtener información) y, las variables de las que se desea obtener información (superficie sembrada, superficie siniestrada, superficie cosechada, volumen de la producción, valor de la producción rendimiento y precio medio rural). El tipo de parámetros a seleccionar depende de la información que se desea solicitar.
2. **Área de despliegue de resultados.** Como su nombre lo indica, es en esta sección donde el sistema arroja los resultados sobre la información que ha sido

solicitada en el área anterior.

3. **Área de comandos.** Se presentan algunos comandos para facilitar el manejo de la información. Dentro de estos comandos se encuentra el de Guardar Como, Imprimir, Reporte Preliminar y Salir del Sistema.

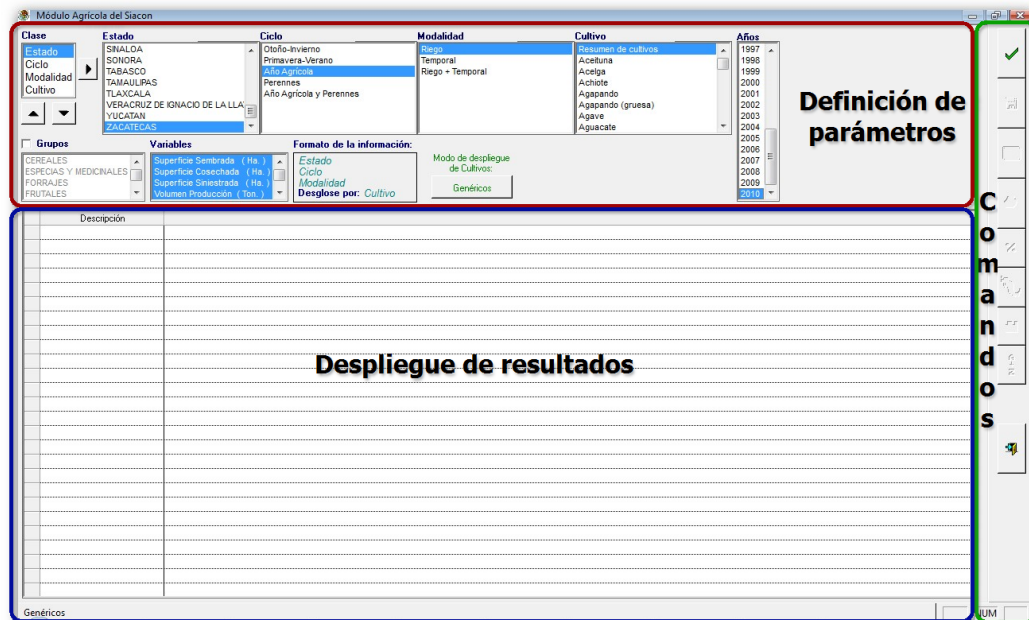


Figura 5.2: Interfaz del subsistema de información agrícola.

5.3.3 OBTENER PARÁMETROS

La Figura 5.3 presenta un ejemplo sobre la obtención de parámetros para cultivos referentes al estado de Zacatecas.

Las características sobre los parámetros que se han ingresado al sistema son los siguientes:

- Clase: Estado.
- Estado: Zacatecas.
- Ciclo: Año agrícola.

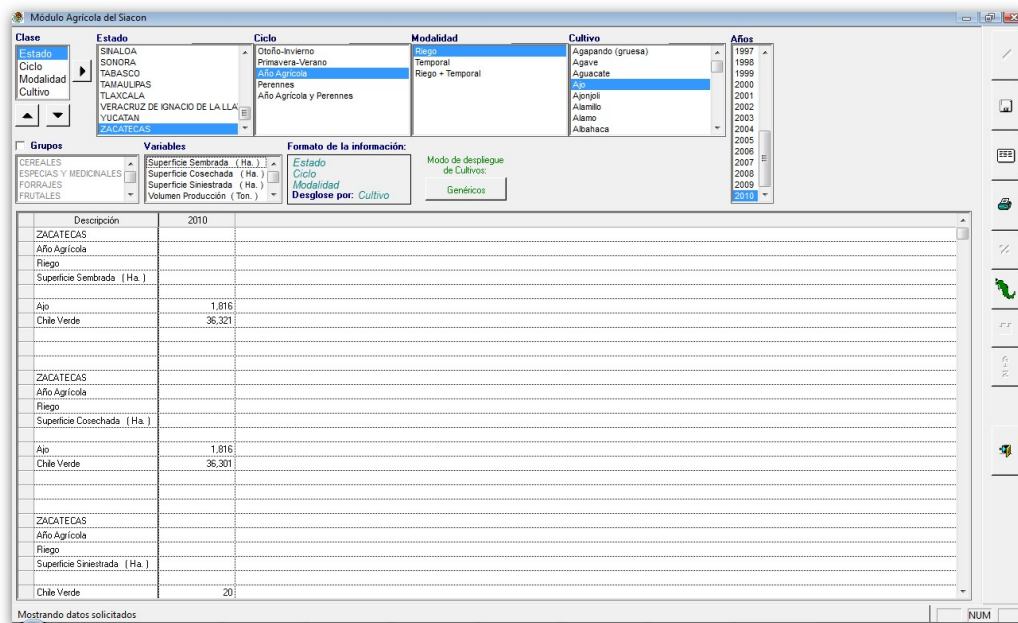


Figura 5.3: Obtención de parámetros utilizando el SIACON.

- Modalidad: Riego.
- Cultivo: Ajo y Chile verde.
- Año: 2010.
- Variables: Superficie sembrada, superficie siniestrada, superficie cosechada, volumen de la producción, valor de la producción rendimiento y precio medio rural.

Como se puede observar en el área de despliegue de resultados de la Figura 5.3, se presentan los datos de los cultivos que cumplen con las características definidas por el usuario en el área de definición de parámetros.

De los valores que arroja el sistema, únicamente se hará uso de los valores de las variables de rendimiento, producción y precio medio rural, ya que éstos son los que nos interesan para fijar los datos para los parámetros de los modelos presentados en el Capítulo 4.

5.4 ANUARIO ESTADÍSTICO DE LA SAGARPA

5.4.1 OBJETIVO DEL SISTEMA

El objetivo principal de este sistema es proporcionar información estadística agrícola con desagregación geográfica a nivel Distrito de Desarrollo Rural (DDR) (1999-2000) y nivel municipal (2001-2010), desglosada por modalidad de riego, temporal y la sumatoria de riego más temporal, para los ciclos otoño-invierno, primavera-verano, perennes y año agrícola.

Dentro de las variables que se incluyen en el sistema se encuentran producción, rendimiento, precio y valor de la producción.

Al igual que en el SIACON, el primer paso es descargar “Anuario Estadístico” de la página del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) e instalarlo en el computador [65].

5.4.2 INGRESAR AL SISTEMA

Inicio del sistema. Al iniciar el programa se presenta la pantalla de bienvenida del sistema (ver Figura 5.4).

En esta pantalla de inicio se encuentra la barra de menús que presenta las opciones de información que maneja el sistema, en este caso, se presenta el menú de Anuarios y el menú de Ayuda. En el menú de Anuarios se presentan las opciones para los sectores Agrícolas y Pecuarios y en el menú de Ayuda se presenta información de ayuda para el usuario sobre el manejo del sistema. Para fines de esta investigación se ha utilizado la opción sector Agrícola.

Interfaz principal del sistema. Una vez que se ha ingresado en la sección Agrícola se puede observar la interfaz destinada para esta sección (ver Figura 5.5). La interfaz se compone principalmente de tres áreas: menús, definición de parámetros y despliegue de resultados.



Figura 5.4: Interfaz principal del sistema.

1. **Área de menús.** En esta sección se encuentran los menús Entidad y Cultivo que van a determinar el formato sobre el tipo de información que se está solicitando. Aunque la información que se solicita básicamente es la misma, independientemente del tipo de menú que ha sido seleccionado, existen pequeñas modificaciones sobre el área de definición de parámetros que dependen del menú elegido.
2. **Área de definición de parámetros.** Aquí se definen las características sobre la información que se desea solicitar. Dentro de los elementos que componen a esta parte del sistema se encuentran el ciclo agrícola (Primavera-Verano, Otoño-Invierno, Perenne o Año Agrícola), modalidad (Riego, Temporal o Riego-Temporal), año (define el año que se está solicitando), cultivo (especifica cuál es el cultivo del que se desea obtener información), estado (indica cuál es el estado sobre el que se está pidiendo la información), entre otras. El tipo de parámetros a seleccionar depende de la información que se desea solicitar.

3. **Área de despliegue de resultados.** Como su nombre lo indica, en esta sección se muestra la información sobre los datos que han sido solicitados.

Estado	Sembrada (Ha)	Cosechada (Ha)	Valor producción (miles de \$)
Aguascalientes	153,602.00	110,854.00	1,836,722.06
Baja California	223,350.78	222,527.30	10,483,495.88
Baja California Sur	36,441.55	33,898.25	2,525,145.74
Campeche	236,895.25	220,167.46	2,322,436.57
Coahuila de Zaragoza	294,440.17	273,642.76	4,824,153.71
Colima	153,308.14	152,329.64	4,132,230.55
Chiapas	1,414,516.78	1,372,531.75	17,083,065.67
Chihuahua	1,109,899.41	1,082,427.58	19,221,718.35
Distrito Federal	22,878.27	22,477.22	1,378,284.77
Durango	732,292.90	658,994.04	5,028,207.89
Guansjuato	1,018,084.73	836,516.46	15,609,250.47
Guerrero	890,357.35	863,112.73	9,603,187.67
Hidalgo	581,956.63	518,744.21	5,949,441.46
Jalisco	1,585,458.88	1,402,557.26	25,433,509.96
MChico	890,169.69	842,636.95	14,527,338.91
Michoac n de Ocampo	1,086,149.84	1,030,082.56	30,070,178.63
Morelos	135,307.80	131,356.60	5,794,458.15
Nayarit	393,374.97	365,072.18	6,590,678.98
Nuevo Letn	380,836.08	366,542.77	3,826,590.08
Oaxaca	1,365,136.59	1,259,154.10	12,232,937.37
Puebla	996,965.71	926,459.08	11,483,114.53
QuerItaro	178,902.10	156,562.60	2,315,137.06
Quintana Roo	112,199.36	107,614.74	1,629,786.25
San Luis Potosi	803,091.86	615,065.14	8,209,317.77
Simlao	1,233,594.69	1,163,890.74	29,212,594.58
Sonora	597,912.60	594,239.00	21,229,135.21
Tabasco	238,641.98	209,001.45	4,247,187.20
Tamaulipas	1,445,149.42	1,358,702.26	14,019,315.79
Tlaxcala	239,922.00	238,103.00	2,363,189.98
Veracruz de Ignacio de la Llave	1,452,456.10	1,346,412.00	26,516,548.01
Yucat n	640,085.79	621,128.04	2,599,168.70

Figura 5.5: Menú del sistema.

5.4.3 OBTENER PARÁMETROS

En la Figura 5.6 se presenta un ejemplo sobre la obtención de parámetros para el estado de Zacatecas. Las características de los parámetros que se desean obtener son las siguientes:

- Ciclo: Año agrícola.
- Modalidad: Riego.
- Año: 2010.
- Estado: Zacatecas.
- Distrito: Todos los Distritos.

The screenshot shows the 'Anuario Estadístico' application window. The title bar reads 'Anuarios Agronegocios' and 'Anuarios Ayuda'. The main window title is 'Anuario Agrícola'. The interface includes filters for 'Por Entidad' (Zacatecas), 'Por Cultivo', 'Ciclo' (Año Agrícola), 'Estado' (Zacatecas), 'Modalidad' (Riego), 'Distrito' (Todos los Distritos), 'Año' (2010), and 'Municipio' (Todos los Municipios). The data is sorted by 'Cultivo'. The table below represents the data displayed in the screenshot.

Cultivo	Tipo/Variiedad	Sup. Sembrada (Ha)	Sup. Cosechada (Ha)	Sup. Siniestrada (Ha)	Producción (Tn)	Rendimiento (Ton/Ha)	Precio medio rural (\$/Ton)	Valor prod (miles \$)
Ajo		1,816.00	1,816.00		21,581.89	11.88	12,609.27	274.8
Avena Forrajera seca		1,136.00	1,136.00		7,286.50	6.41	1,487.48	168.2
Avena forrajera achicalada		1,186.00	1,186.00		8,084.80	6.82	1,953.71	228.1
Avena forrajera verde		7,542.00	7,542.00		117,568.76	15.59	413.54	47.8
Avena grano		1,539.00	1,539.00		4,935.00	3.21	2,627.36	299.8
Berenjena		2.00		2.00				0.0
Brócoli		223.00	223.00		2,745.00	12.31	3,517.26	395.4
Cacahuete		45.00	45.00		84.75	1.88	10,609.99	1,181.1
Calabacita		5.00	5.00		55.00	11.00	3,150.00	350.0
Calabacita Criolla		639.00	639.00		12,718.28	19.90	2,963.52	335.1
Calabacita Italiana (zucchini)		217.00	205.75	11.25	3,417.53	16.61	4,340.70	488.9
Calabaza		10.00	10.00		160.00	16.00	2,991.00	333.0
Carnote		86.00	86.00		1,566.05	18.21	5,137.73	575.6
Canola		51.00						0.0
Cebada forrajera seca		22.00	22.00		88.00	4.00	1,563.64	172.0
Cebada forrajera verde		452.00	452.00		9,997.31	22.12	564.03	63.7
Cebada grano		60.00	60.00		125.00	2.08	1,841.73	208.0
Cebolla Blanca		4,058.00	4,058.00		132,769.96	32.72	4,020.06	452.3
Cebolla Morada		52.00	52.00		2,470.00	47.50	4,894.74	544.0
Chile seco Ancho		8,534.00	8,528.00	6.00	14,306.87	1.68	50,458.82	5,615.4
Chile seco De árbol (cola de rata)		145.00	145.00		145.10	1.01	51,929.84	5,712.4
Chile seco Guajillo		8,962.00	8,955.00	7.00	11,672.81	1.30	46,817.46	5,191.4
Chile seco Mirasol		6,437.00	6,437.00		9,481.70	1.47	39,607.77	4,399.7
Chile seco Mulato		183.00	176.00	7.00	183.26	1.04	55,990.08	6,154.4
Chile seco Pasilla		2,922.00	2,922.00		4,511.97	1.54	58,611.52	6,446.2
Chile seco Puya		3,490.00	3,490.00		4,293.39	1.23	49,173.62	5,351.1
Chile verde		120.00	120.00		786.00	6.55	3,534.10	392.7
Chile verde Mirasol		859.00	859.00		11,702.74	13.62	5,242.84	582.6
Chile verde Mulato		4,600.00	4,600.00		52,220.00	11.35	2,408.84	271.9

Figura 5.6: Obtención de parámetros utilizando el Anuario Estadístico.

- Municipio: Todos los Municipios.

Como se puede observar en el área de despliegue de resultados, se presentan todos los cultivos que cumplen con las características definidas por el usuario en el área de definición de parámetros.

Los datos que se son arrojados por el sistema son: tipo de cultivo, variedad del cultivo (en caso de existir), superficie sembrada (Ha), superficie cosechada (Ha), superficie siniestrada (Ha), producción (Tn), rendimiento (Tn/Ha), precio medio rural (\$/Tn) y valor promedio de la producción (miles de \$). De los cuáles, los valores de las variables de rendimiento, producción y precio medio rural son los que nos interesan para fijar los datos para los parámetros de los modelos presentados en el Capítulo 4.

Una ventaja de utilizar este sistema es que que los datos se pueden imprimir directamente, guardar en archivo con extensión pdf o, lo que es mejor aún, se pueden descargar como un archivo de Excel, lo que facilita la manipulación de la información y su utilización en los modelos presentados en las secciones anteriores.

5.5 SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN E INTEGRACIÓN DE MERCADOS

5.5.1 OBJETIVO DEL SISTEMA

El Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM), es un servicio *on-line* de la Secretaría de Economía que tiene el propósito de ofrecer información sobre el comportamiento de los precios al por mayor de los productos agrícolas, pecuarios y pesqueros que se comercializan en los mercados nacionales e internacionales (ver Figura 5.7).

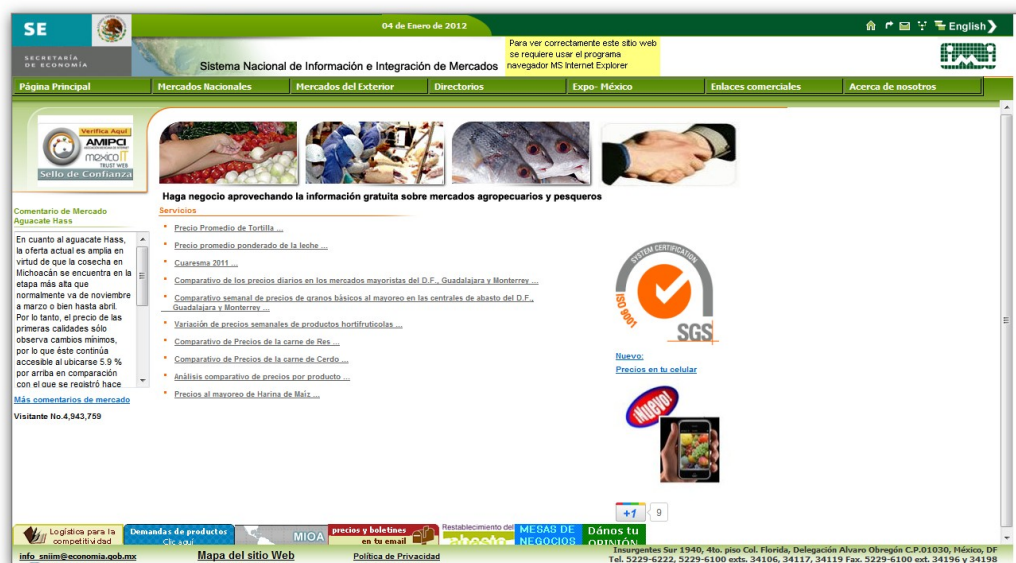


Figura 5.7: Interfaz principal del SNIIM

El propósito de utilizar este sistema es definir los parámetros referentes al beneficio esperado por cultivo, tomando como referencia los precios de temporadas pasadas en los mercados nacionales e internacionales, según sea el caso para cada productor.

A diferencia de los sistemas mencionados anteriormente, para hacer uso de este sistema es necesario disponer del servicio de Internet para acceder al sistema.

5.5.2 INGRESAR AL SISTEMA

Para ingresar al sistema es necesario efectuar el siguiente procedimiento:

- Ejecutar el navegador de Internet “Internet Explorer”. Es necesario utilizar exclusivamente este navegador para poder utilizar todas las funciones que el sistema ofrece. En caso de utilizar otro navegador de Internet, aunque se pueda tener acceso al sistema, no se podrá visualizar toda la información que el sistema ofrece.
- Teclar en la barra de direcciones la URL del sitio del SNIIM, en este caso, <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/>

5.5.3 OBTENER PARÁMETROS

Una vez que se ha ingresado al sitio web del Sistema Nacional de Integración e Información de Mercados el siguiente procedimiento es seleccionar el mercado y el cultivo del que se pretende obtener información. El procedimiento a realizar es el siguiente:

1. Seleccionar el Mercado (Nacional o Internacional).
2. Elegir la opción “Precios de Mercado”.
3. Seleccionar el mercado del que se pretende obtener información, en este caso “Mercado Agrícola”.
4. De las diversas clasificaciones que se presentan (Frutas y Hortalizas, Flores, Granos Básicos, etc.) escoger la más adecuada dependiendo del cultivo del que se quiera consultar la información.

En la figura 5.8 se observa el procedimiento mencionado anteriormente para consultar información referente a los cultivos clasificados dentro del grupo de frutas y hortalizas.



Figura 5.8: Precios agrícolas en mercados nacionales

Una vez que se ha especificado la categoría a la que pertenece el cultivo a consultar, en este caso frutas y hortalizas, el siguiente paso es indicar la modalidad de la información que se desea obtener. Existen tres formatos diferentes para obtener información:

- Reporte diario.
- Reporte semanal.
- Reporte mensual.

Para el reporte diario es necesario especificar nombre del producto, origen, mercado de destino, días que se desean consultar y presentación del producto (ver figura 5.9).

En los reportes semanales y mensuales se presenta el resumen de todos los cultivos pertenecientes a la clasificación que ha sido seleccionada, en este caso frutas y hortalizas. En esta sección es necesario especificar el mercado de destino, la semana o el mes (según sea el caso) y el año.

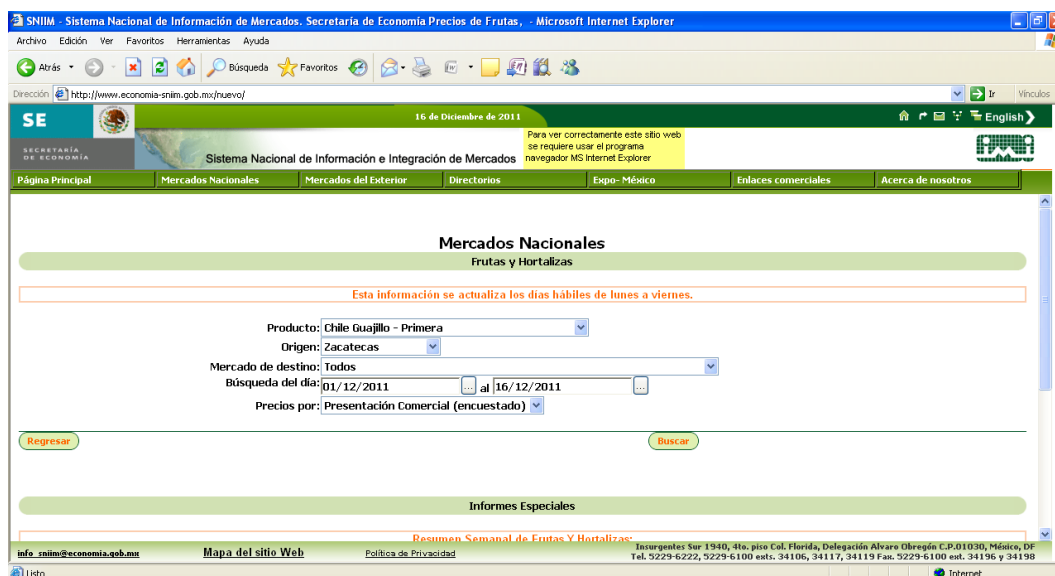


Figura 5.9: Precios diarios para frutas y hortalizas

Una vez que se ha determinado el tipo de reporte (diario, semanal o mensual) y después de especificar las características del cultivo sobre el que se desea obtener información, el siguiente paso es mandar la solicitud para obtener la información solicitada, para esto, sólo se da click en el botón buscar después de haber llenado todos los campos que nos pide la solicitud y automáticamente el sistema cargará la información correspondiente.

En la figura 5.10 se presenta el reporte del precio del Chile tipo Guajillo correspondiente a los días del 12 al 16 de diciembre del año 2011 en el estado de Zacatecas.

Otra forma de obtener información sobre los precios del cultivo es por medio de los anuarios estadísticos presentados por el SNIIM. En los anuarios estadísticos se puede observar el comportamiento del precio del cultivo en el año actual y en años anteriores.

Para poder acceder a este tipo de información es necesario realizar el siguiente procedimiento:

1. Ir al Menú Mercado Nacional.

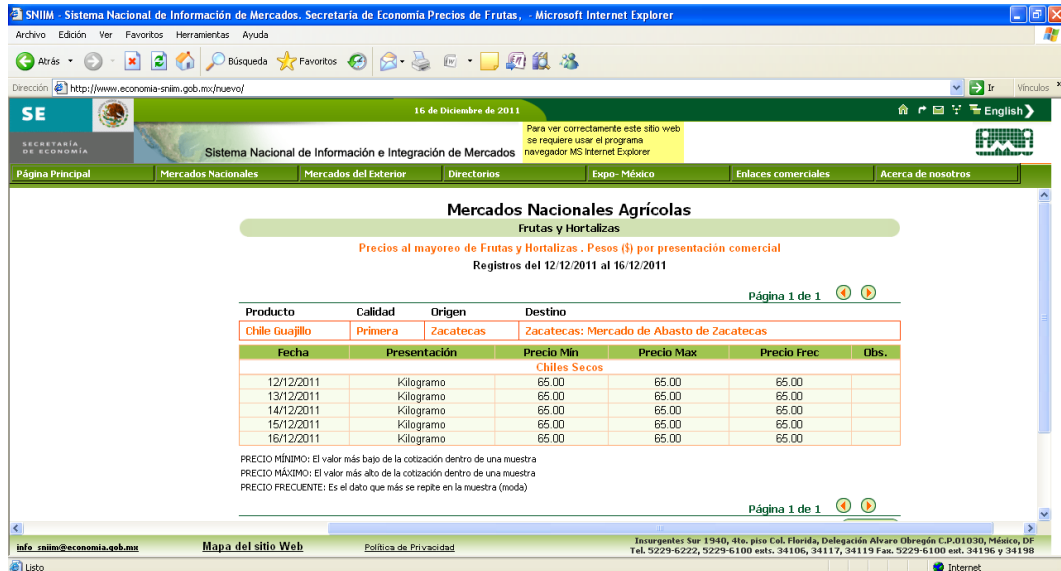


Figura 5.10: Precios diarios del Chile tipo Guajillo en el Estado de Zacatecas

2. Seleccionar Anuarios Estadísticos.
3. Elegir la opción Agrícolas.
4. Seleccionar la clasificación del cultivo.

Una vez que hemos realizado el procedimiento anterior, aparecerá una pantalla donde se pedirá seleccionar el mercado y el tipo de cultivo a consultar. Después de especificar los parámetros anteriores, se da click en el botón aceptar y el sistema arrojará la información concerniente al cultivo y al mercado establecido.

En la figura 5.11 se presenta el anuario estadístico para el Chile tipo Guajillo en el Estado de Zacatecas.

Hasta este punto ya se tienen diversos métodos para seleccionar los parámetros de beneficio de los modelos presentados en el Capítulo 4. El productor es libre de escoger el precio que mejor le acomode a sus cultivos dependiendo de su ubicación geográfica y del lugar de comercialización de sus productos.

En caso de que los métodos presentados anteriormente no se acerquen a los datos reales del productor, se permite que el productor realice un análisis estadístico

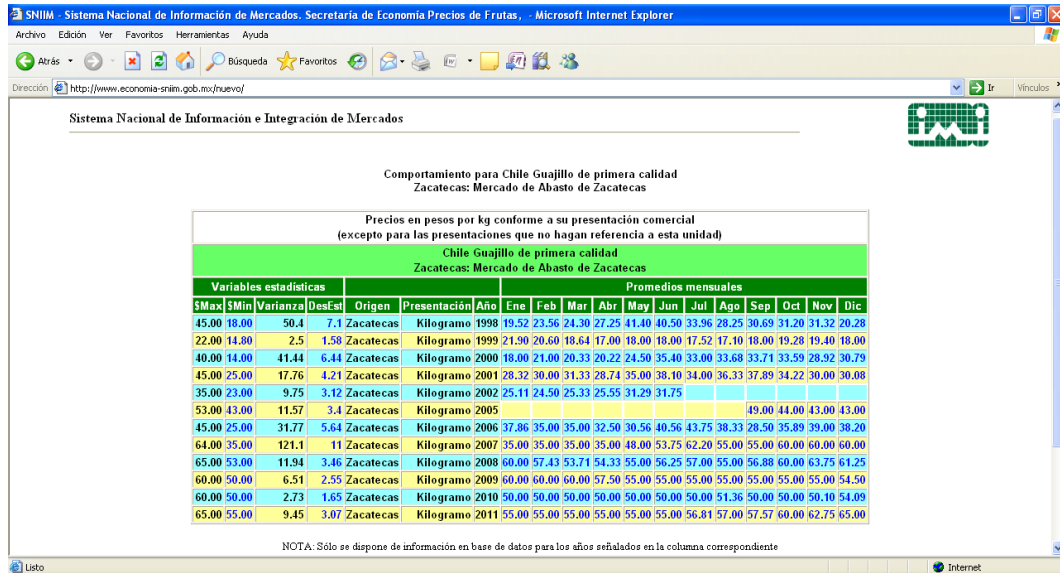


Figura 5.11: Anuario estadístico para el Chile tipo Guajillo en el Estado de Zacatecas más personalizado para determinar estos valores. Los parámetros influirán únicamente en el valor de la función objetivo y no en el desarrollo del modelo.

5.6 INIFAP

5.6.1 OBJETIVO DE LA INSTITUCIÓN

El INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) es una Institución de excelencia científica y tecnológica con liderazgo y reconocimiento nacional e internacional por su capacidad de respuesta a las demandas de conocimiento e innovaciones tecnológicas en beneficio agrícola, pecuario y de la sociedad en general.

El objetivo de utilizar la información proveniente de esta institución es para fijar los parámetros de rendimiento de los cultivos y densidad de siembra (cantidad de semilla requerida por cultivo para sembrar una hectárea de tierra) para el modelo de la planificación de la producción y, para conocer los valores de las variables climáticas de humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y

evapotranspiración de referencia, para determinar la cantidad de agua que requiere cada cultivo dependiendo de su etapa fenológica de crecimiento, para el modelo de la planificación eficiente del riego.

Por lo tanto, esta sección se sub-divide en dos partes, dedicándole una sección a cada etapa del proyecto de investigación.

5.6.2 INGRESAR AL SISTEMA

Para consultar la información que el INIFAP ofrece es necesario acceder a su página web <http://www.inifap.gob.mx/> y seleccionar el centro de investigación más cercano a la región que se desea planificar.

En la figura 5.12 se puede observar la página de inicio del centro de investigación del estado de Zacatecas.



Figura 5.12: Sitio web del INIFAP del estado de Zacatecas.

5.6.3 OBTENER PARÁMETROS

PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Para esta etapa del proyecto se requieren los parámetros de rendimiento y densidad de siembra. Para obtener estos valores por medio del INIFAP es necesario colocarse en el menú “Potencial Productivo” y seleccionar la clasificación (Agrícola o Forrajera) a la que pertenece el cultivo que se desea consultar (ver figura 5.13).



Figura 5.13: Obtención de parámetros de potencial productivo a través del INIFAP.

Posteriormente se presenta el listado de los cultivos que corresponden a la clasificación que ha sido seleccionada (ver figura 5.14). A continuación seleccionamos el archivo que corresponde al cultivo sobre el que se desea obtener información. El documento se puede descargar directamente del servidor del INIFAP para ser guardado en nuestro computador o se puede observar en línea.

En el documento se proporciona toda la información necesaria referente al cultivo, por ejemplo, se especifican las características de zonas potenciales de siembra del cultivo a nivel estatal, ciclo de producción, tipo de siembra y labranza, nivel de

CUADRO 1. NÚMERO DE HECTÁREAS CON POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE ESPECIES AGRÍCOLAS BAJO CONDICIONES DE RIEGO Y TEMPORAL EN EL ESTADO DE ZACATECAS.

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	POTENCIAL		
		Alto	Medio	Bajo
RIEGO				
Ajo	<i>Allium sativum</i> L.	351,494	347,323	
Almendro	<i>Prunus amygdalus</i> L.	42,830	276,337	
Avena	<i>Avena sativa</i> L.	243,672	517,639	
Cacahuete	<i>Arachis hypogaea</i> L.	1,544	7,449	
Cebada	<i>Hordeum L. vulgare</i>	272,275	536,775	
Cebolla	<i>Allium cepa</i> L.	351,494	347,323	
Chabacano	<i>Prunus armeniaca</i> L.	5,066	151,907	
Chile	<i>Capsicum annuum</i> L.	238,368	490,756	
Ciruelo	<i>Prunus salicina</i> Lindl	24,010	131,234	
Ciruelo mexicano	<i>Spondias mombin</i> L.	0	72,826	
Durazno	<i>Prunus persica</i> (L.) Batsch	42,830	276,337	
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i>	256,219	495,391	
Guayabo	<i>Psidium guajaba</i> L.	15,229	38,075	
Litomate	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill	3,121	609,564	
Maíz	<i>Zea mays</i> L.	257,261	498,692	
Manzano	<i>Malus pumila</i> Mill	401	82,238	
Nopal tunero	<i>Opuntia spp</i>	31,735	27,801	
Papa	<i>Solanum tuberosum</i> L.	232,029	423,185	
Peral	<i>Pyrus communis</i> L.	49,282	88,476	
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	233,656	405,059	
Trigo	<i>Triticum aestivum</i>	243,672	517,639	
Vid Región I	<i>Vitis vinifera</i> L.	34,575	95,349	
Vid Región II	<i>Vitis vinifera</i> L.	316,509	280,639	

Figura 5.14: Listado de cultivos del INIFAP.

Medina et al., 2003. Potencial productivo de especies agrícolas en el estado de Zacatecas. INIFAP-CEZAC

CULTIVO: Ajo (*Allium sativum*, L.)

CICLO: Otoño/Primavera.

RÉGIMEN DE HUMEDAD: Riego.

POTENCIAL DE PRODUCCIÓN: Alto y mediano.

TIPO DE SIEMBRA Y LABRANZA: Manual y mecánica.

VARIEDAD	DENSIDAD DE SIEMBRA	ÉPOCA DE SIEMBRA
Moradas: Chino, Español, Taiwán	De 800 a 1200 kg/ha, según el tamaño de la semilla. Sembrar en surcos de 76 cm con dos hilos de 15 cm en el centro y 8 cm entre dientes.	Lo recomendable es en septiembre, pero se puede establecer el cultivo hasta noviembre, aunque esto afecta rendimiento y calidad
Blancas: Perla, California, Early California		

FERTILIZACIÓN: Se determinó la dosis generalizada: 150-130-150, fraccionada en dos partes, 75-130-75 al rayar y 75-00-75 a los 60 días. Si puede hacer más fracciones, la distribución durante el ciclo será mejor. No aplicar después de iniciada la diferenciación de dientes.

PROGRAMA DE RIEGOS: Se recomienda, si es necesario, un riego alrededor de un mes antes de la siembra para eliminar la primera generación de malezas. Los riegos de auxilio se deben aplicar cuidando tres aspectos fundamentales: el suelo, el clima y el desarrollo de la planta. En Zacatecas, se aplican cada 15 días en invierno y se van acortando los intervalos a medida que crece el cultivo y aumentan los vientos y las temperaturas.

CONTROL DE PLAGAS: Para controlar los trips se debe aplicar 1.0 L/ha de azinfos metílico 20 E ó diazinon 25 E, ó 1.5 L/ha de malation 1000 E. Para el control del minador de la hoja aplicar cualquiera de los siguientes insecticidas: 0.5 kg/ha de metomilo, ó 1.5 L/ha de diazinon 25 E, ó 1.5 L/ha de

Figura 5.15: Información referente al Ajo.

fertilización, control de plagas, densidad de la siembra y potencial productivo, entre otros (ver figura 5.15).

PLANIFICACIÓN EFICIENTE DEL RIEGO

Para el modelo de la planificación eficiente del riego es necesario conocer los valores de las variables climáticas de humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad del viento, precipitación y evapotranspiración de referencia para determinar la cantidad de agua que requiere el cultivo.

Estos parámetros se pueden obtener por medio del INIFAP. Para esto, de la pagina de inicio (Figura 5.12) se debe seleccionar el menú “Monitoreo Agroclimático”, el cuál va a desglosar el mapa de distribuciones de estaciones agroclimáticas del estado, en este caso las correspondientes al estado de Zacatecas (ver Figura 5.16).

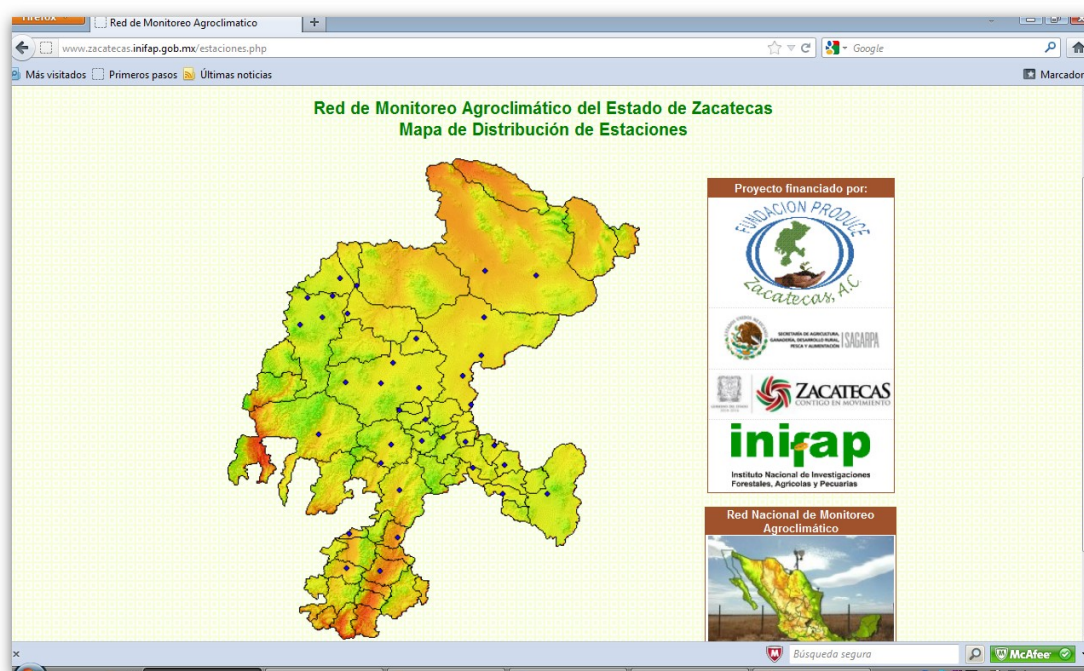


Figura 5.16: Estaciones agroclimáticas del Estado de Zacatecas.

Existen diversas formas de obtener el valor para las variables de humedad relativa, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y precipitación. Una de

ellas es seleccionar directamente del mapa la estación agroclimática más cercana al lugar donde se está llevando a cabo la planificación.

Otra manera es seleccionar el menú “Tiempo Real” y a continuación especificar la estación agroclimática. Cualquiera que sea la forma elegida dará como resultado el reporte en tiempo real para las variables antes mencionadas (ver figura 5.17).

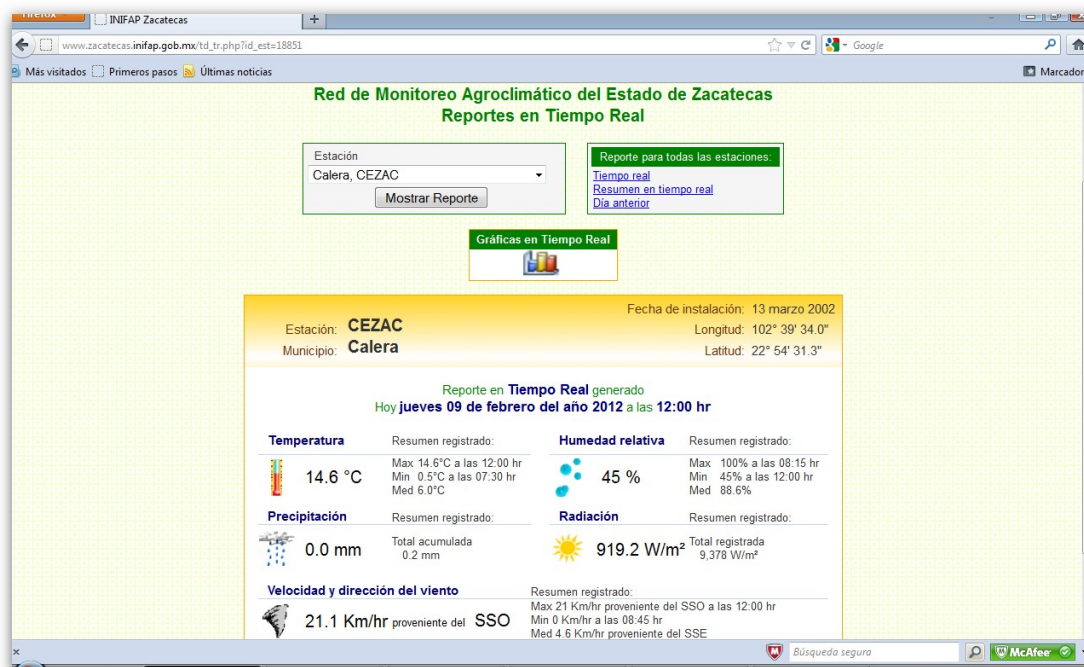


Figura 5.17: Reporte agroclimático estación Calera, Zacatecas.

Para obtener los valores de los parámetros de precipitación y de evapotranspiración de referencia el procedimiento es similar al anterior, sólo que en esta ocasión se selecciona el menú “Riego” en lugar del menú Tiempo Real.

Una vez dentro de la interfaz correspondiente al “Riego” el siguiente paso es generar el reporte de información adecuado a las necesidades del productor. Para esto, es necesario especificar la estación agroclimática, el mes y el año correspondientes a los datos que se desean obtener.

En la Figura 5.18 se muestra un ejemplo del reporte histórico de evapotranspiración correspondiente al mes de febrero del año 2012 para la estación CEZAC del

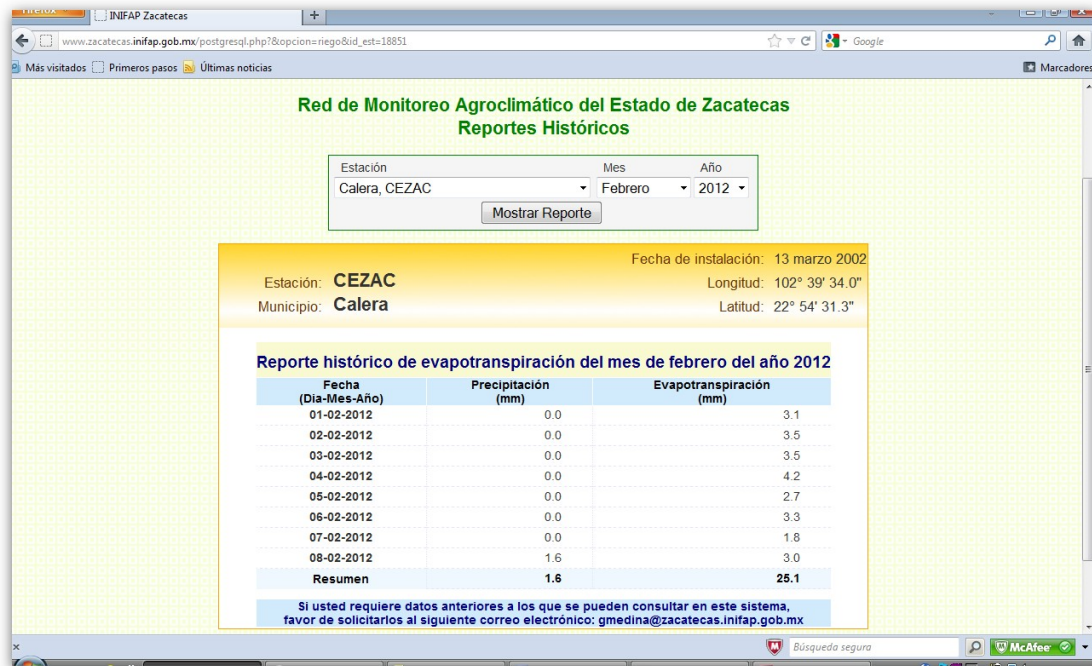


Figura 5.18: Reporte de evapotranspiración estación Calera, Zacatecas.

municipio de Calera, Zacatecas.

Con los valores de evapotranspiración presentados en los reportes del INIFAP se puede calcular la cantidad de agua a regar en el cultivo utilizando la ecuación de Penman-Monteith (2.1) descrita en el Capítulo 2.

5.7 COEFICIENTE DE CULTIVO (K_c) PARA CULTIVOS

ANUALES

El coeficiente de cultivo (K_c) varía de cultivo en cultivo, de la etapa fenológica de crecimiento y de la ubicación geográfica. Según el método de la FAO [6], los valores máximos de K_c se alcanzan en la floración, se mantienen durante la fase media y finalmente decrecen durante la maduración (ver Figura 2.2).

A continuación se presenta el K_c para los cultivos de mayor importancia a nivel mundial según el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de

Agricultura de los Estados Unidos. (*USDA*, por sus siglas en inglés United States Department of Agriculture).

Desarrollo	Maíz	Trigo	Algodón	Sorgo	Cártamo	Soya	Arroz	Frijol
0 %	0.42	0.15	0.20	0.30	0.14	0.51	0.45	0.50
5 %	0.45	0.20	0.22	0.35	0.16	0.45	0.50	0.54
10 %	0.48	0.30	0.25	0.40	0.18	0.41	0.55	0.60
15 %	0.51	0.40	0.28	0.48	0.22	0.45	0.65	0.65
20 %	0.60	0.55	0.32	0.60	0.27	0.51	0.72	0.73
25 %	0.65	0.70	0.40	0.70	0.35	0.51	0.80	0.80
30 %	0.70	0.90	0.50	0.80	0.44	0.51	0.85	0.90
35 %	0.80	1.10	0.62	0.90	0.54	0.52	0.90	0.97
40 %	0.90	1.25	0.89	1.00	0.64	0.55	0.92	1.05
45 %	1.00	1.40	0.90	1.08	0.76	0.57	0.93	1.10
50 %	1.05	1.50	0.98	1.07	0.88	0.60	0.93	1.12
55 %	1.07	1.57	1.00	1.05	0.98	0.63	0.93	1.12
60 %	1.08	1.62	1.02	1.00	1.07	0.66	0.92	1.10
65 %	1.07	1.61	1.00	0.95	1.07	0.68	0.90	1.05
70 %	1.05	1.55	0.95	0.90	1.08	0.70	0.85	1.02
75 %	1.02	1.45	0.87	0.82	1.02	0.70	0.80	0.95
80 %	1.00	1.30	0.80	0.75	0.96	0.69	0.68	0.87
85 %	0.95	1.10	0.75	0.70	0.86	0.63	0.63	0.80
90 %	0.90	0.95	0.65	0.65	0.76	0.56	0.58	0.72
95 %	0.88	0.80	0.55	0.60	0.60	0.43	0.55	0.70
100 %	0.85	0.62	0.50	0.55	0.45	0.31	0.47	0.62

Tabla 5.1: Coeficiente de cultivo (k_c) para cultivos anuales parte I.

Desarrollo	Ajonjolí	Garbanzo	Cebada	Jitomate	Linaza	Chile	Papa
0 %	0.30	0.30	0.15	0.43	0.30	0.48	0.30
5 %	0.35	0.35	0.20	0.43	0.65	0.50	0.35
10 %	0.40	0.40	0.30	0.43	0.40	0.55	0.40
15 %	0.50	0.50	0.40	0.45	0.50	0.65	0.45
20 %	0.60	0.55	0.55	0.45	0.55	0.75	0.50
25 %	0.70	0.65	0.70	0.50	0.70	0.80	0.60
30 %	0.80	0.70	0.90	0.55	0.90	0.90	0.70
35 %	0.87	0.78	1.10	0.65	1.00	0.93	0.82
40 %	0.95	0.80	1.25	0.75	1.10	0.95	0.97
45 %	1.00	0.82	1.40	0.85	1.15	1.03	1.05
50 %	1.10	0.82	1.50	0.95	1.20	1.05	1.06
55 %	1.20	0.80	1.57	1.00	1.28	1.05	1.25
60 %	1.28	1.57	1.62	1.03	1.30	1.05	1.30
65 %	1.30	0.82	1.61	1.02	1.35	1.03	1.35
70 %	1.32	0.80	1.55	0.98	1.30	1.00	1.38
75 %	1.29	0.75	1.45	0.95	1.28	0.97	1.38
80 %	1.25	0.70	1.30	0.90	1.25	0.90	1.35
85 %	1.10	0.65	1.10	0.85	1.10	0.85	1.33
90 %	1.00	0.60	0.95	0.80	0.95	0.80	1.30
95 %	0.90	0.50	0.80	0.75	0.80	0.70	1.25
100 %	0.80	0.40	0.62	0.70	0.60	0.60	1.20

Tabla 5.2: Coeficiente de cultivo (k_c) para cultivos anuales parte II.

CAPÍTULO 6

METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se presenta la metodología de solución propuesta para resolver los modelos presentados en el Capítulo 4 y además, se presentan algunos resultados experimentales para cada modelo correspondiente a cada fase del problema.

Por lo tanto, el capítulo será dividido en dos secciones, la primera sección es empleada para explicar la metodología utilizada para dar solución a los modelos propuestos y, la segunda sección, es para mostrar los resultados experimentales.

6.1 METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Los modelos matemáticos desarrollados en este proyecto de investigación se encuentran dentro de la clasificación de los Programas Enteros Mixtos Lineales, es decir, son programas donde la función objetivo y las restricciones del problema son formuladas como ecuaciones lineales y las variables utilizadas son tanto enteras como continuas.

Para resolver esta clase de problemas se pueden utilizar algoritmos exactos, algoritmos de aproximación y/o heurísticas.

Los algoritmos exactos aseguran obtener la solución óptima del problema, la desventaja es que, en algunos casos, el tiempo computacional puede ser demasiado elevado. Un ejemplo de estos algoritmos es el de Ramificación y Acotamiento (*B&B*, por sus siglas en inglés Branch and Bound) [38, 68].

Con los algoritmos de aproximación no se asegura alcanzar la solución óptima del problema, sin embargo, una ventaja de utilizar esta clase de algoritmos es que el tiempo computacional es muy razonable, por lo general es de tiempo polinomial [38, 68].

Al igual que los algoritmos de aproximación, las heurísticas no aseguran alcanzar la solución óptima del problema, la diferencia con éstos es que la solución obtenida no tiene estimación en su calidad. Las heurísticas son, por lo general, los algoritmos más rápidos de los métodos mencionados anteriormente [38, 68].

Los modelos presentados en el Capítulo 4 se han resuelto por métodos exactos, y en lapsos de tiempo muy cortos, utilizando el algoritmo de Ramificación y Acotamiento (B&B) que se explica brevemente a continuación.

El B&B es uno de los métodos más populares utilizados para resolver de manera exacta problemas de programación entera basándose en el enfoque *divide y vencerás*, es decir, subdividir el problema en subproblemas más pequeños [47].

Cada subproblema incluye una o más restricciones que se utilizan para descartar posibles subproblemas que no conducen a la solución óptima. El proceso de descomposición es aplicado repetidamente hasta que cada uno de los subproblemas no examinados se vuelven a descomponer, se resuelven, o dan una solución infactible al problema inicial.

Los subproblemas son representados como nodos en un árbol de búsqueda generado dinámicamente donde cada nodo puede ser etiquetado como nodo vivo, nodo muerto o nodo en expansión [3].

Un nodo vivo es un nodo factible y prometedor del que no se han generado todos sus hijos y del que es posible conseguir una solución mejor que la solución actual.

El nodo muerto es aquél que ya no va a explorarse debido a que ya se han generado todos sus hijos y la solución, o no es factible, o el nodo no es prometedor,

es decir, ya no se puede conseguir una mejor solución que la actual.

Un nodo en expansión es el que está en proceso y del que se están generando sus hijos en ese instante. Pueden existir varios nodos vivos y muertos en cualquier instante del algoritmo pero sólo puede existir un nodo en expansión.

El Branch and Bound utiliza una lista para almacenar y manipular los nodos vivos. Existen diferentes tipos de listas utilizadas para ordenar el recorrido del espacio de búsqueda de los nodos, las más reconocidas son las FIFO, las LIFO y las de costo mínimo [3].

Las FIFO (*First In First Out*) hacen que la lista funcione como una cola, donde el primer elemento que llega es el primero que sale. Esto da lugar a un recorrido del espacio de búsqueda por niveles o en anchura.

En las LIFO (*Last In First Out*) el comportamiento de la lista es semejante al de una pila, es decir, el último elemento en entrar es el primero en salir. El recorrido que se realiza es en profundidad.

En las listas de costo mínimo (*Least Cost*) la lista se comporta como una cola de prioridad. Este enfoque es utilizado por el algoritmo del Branch and Bound para resolver los problemas de minimización.

El algoritmo de ramificación y acotamiento comienza con una relajación lineal del problema, es decir, se resuelve el problema pero sin considerar las restricciones de integralidad. Si el algoritmo devuelve una solución entera entonces la solución de la relajación se toma como solución óptima y finaliza el algoritmo. Pero si el algoritmo no arroja una solución entera entonces el problema es dividido en dos subproblemas y se inicia la construcción del árbol de búsqueda tomando como nodo raíz el resultado de la relajación.

El nuevo nodo en expansión es el nodo vivo más prometedor de la lista de nodos vivos. Se generan todos sus hijos y a cada uno de ellos se les aplica el siguiente análisis :

- Si el nodo hijo que se está analizando no es factible entonces el nodo pasa a ser un nodo muerto.
- Si el nodo hijo es factible y el valor de la solución es peor que el de la solución actual, entonces el nodo pasa ser un nodo muerto y nunca más se volverá a considerar.
- Si el nodo hijo es factible y el valor de la solución es mejor que el de la solución actual, pero el nodo no es solución, entonces el nodo se inserta con su valor en la cola de prioridad de nodos vivos.
- Si el nodo hijo es factible y el valor de la solución es mejor que el de la solución actual y el nodo es solución, entonces el nodo pasa a ser la nueva mejor solución. Además se revisan todos los nodos de la lista y se eliminan todos aquellos que tengan un valor peor o igual que el actual.

Una vez que se han generado y analizado todos los hijos del nodo en expansión, éste se convierte en un nodo muerto y se vuelve a repetir el proceso. El proceso del B&B termina cuando la cola de prioridad está vacía. En ese momento la mejor solución actual se convierte en la solución óptima del problema.

A continuación se presenta un pequeño ejemplo para demostrar el funcionamiento del Branch & Bound.

$$\begin{aligned} \min \quad & x_1 + x_2 \\ \text{Sujeto a:} \quad & 2x_1 + 3x_2 \geq 3 \\ & 2x_1 - 2x_2 \leq 3 \\ & 2x_1 + 4x_2 \leq 19 \\ & x_1, x_2 \geq 0, \text{ enteros} \end{aligned}$$

Al resolver el problema anterior sin las restricciones de integralidad tenemos que $x_1 = 4.167$, $x_2 = 2.667$ y $z = 6.833$. Como no se obtuvo solución al problema

entero se procede a ejecutar el algoritmo de ramificación y acotamiento colocando como nodo raíz el valor de la relajación, en este caso 6.833. A continuación se escoge una variable con valor fraccional y se imponen más restricciones para forzarla a ser entera y se continúa con el proceso mencionado anteriormente hasta encontrar solución al problema.

En la Figura 6.1 se presenta el procedimiento completo realizado por el Branch and Bound para llegar a la solución del problema. Los valores de la solución óptima son $x_1 = 3$, $x_2 = 3$ y $z = 6$.

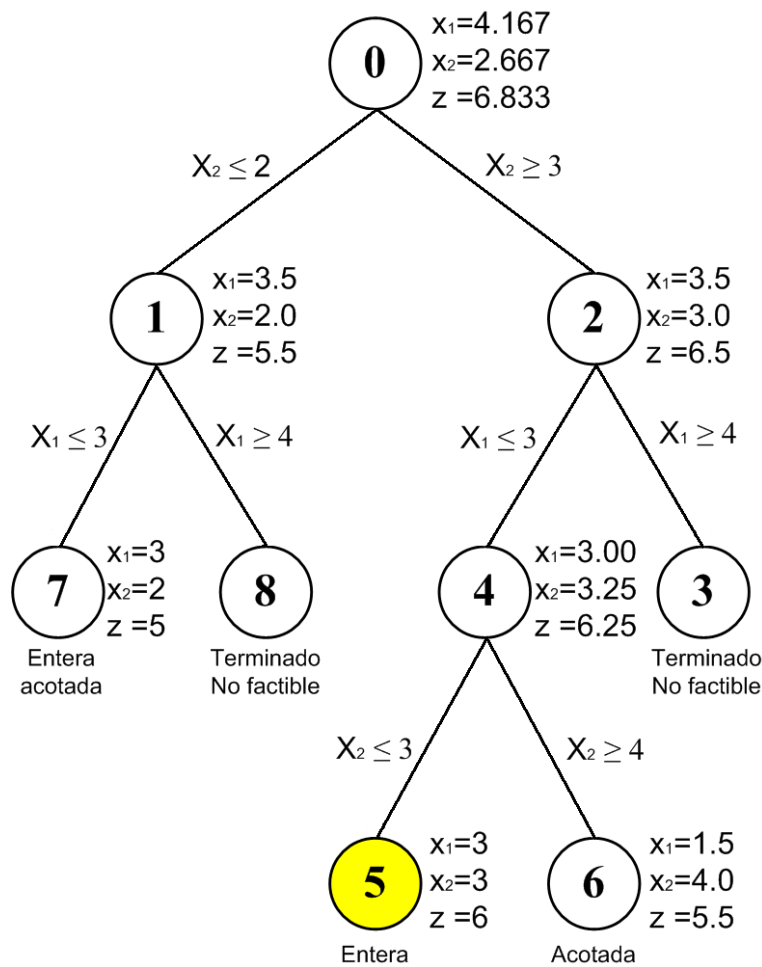


Figura 6.1: Algoritmo de Ramificación y Acotamiento.

En muchas ocasiones el B&B puede llegar a ser ineficiente por el tiempo que tarda en obtener una solución al problema. Esto se puede dar debido a que existe un

número extremadamente grande de ramificaciones en el árbol de búsqueda. Por esta razón, el algoritmo se puede modificar con técnicas avanzadas, como ramificaciones específicas realizadas por medio de técnicas de corte, para explotar la estructura del problema y reducir su espacio de solución [3, 47].

Para resolver los modelos presentados en el Capítulo 4 se ha utilizado el método de ramificación y acotamiento incluido en el CPLEX, un potente software reconocido mundialmente por su capacidad para resolver problemas de optimización [39].

6.2 EXPERIMENTACIÓN

A continuación se presentan resultados experimentales para cada uno de los modelos desarrollados en este proyecto de investigación. Primeramente se muestran los resultados para el modelo de la planificación de la producción y posteriormente para el modelo de la planificación eficiente del riego.

Se debe resaltar que las instancias presentadas en este proyecto fueron generadas con datos aleatorios debido a que únicamente se demuestra la funcionalidad y eficiencia de los modelos desarrollados y no su aplicación práctica en un problema del mundo real.

Recordemos que los datos únicamente influirán en el resultado de la función objetivo de cada uno de los problemas y no en su proceso de resolución.

6.2.1 PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Por simplicidad y para demostrar el funcionamiento de este modelo se han realizado instancias con las siguientes consideraciones: existen 7 posibles cultivos para ser sembrados, 100 parcelas que pueden ser cultivadas, se conoce la cantidad de hectáreas totales para cada parcela, cada parcela puede tener a lo más 3 tipos de suelos diferentes, la cantidad de agua que consume el cultivo depende del tipo de suelo donde es sembrado. A continuación se hace una descripción más detallada para

cada consideración proporcionada.

La Tabla 6.1 muestra los datos generales de los cultivos que pueden ser plantados.

Cultivo	Nombre	Rendimiento (Tn/hect)	Densidad de siembra (kg/hect)	Costo por sembrar (\$/hect)	Costo por comprar semilla (\$/kg)	Cantidad de semilla existente (kg)	Beneficio (\$/Tn)	Demanda (Tn)
1	Sorgo	9	20	1,500	20	0	1,000	0
2	Trigo	4.5	120	1,500	30	1,000	800	0
3	Chile	4	70	3,000	53	1,000	2,000	8
4	Cebada	6	120	1,500	9	1,000	1,839	0
5	Frijol	3.1	40	2,000	18	2,000	1,016	0
6	Maíz	8	30	2,000	10	1,000	1,500	20
7	Avena	4	100	1,500	10	500	1,516	0

Tabla 6.1: Datos generales de los cultivos.

Para cada cultivo se conoce el rendimiento, la densidad de siembra (cantidad de semilla que se necesita para sembrar una hectárea de la parcela), el costo por sembrar una hectárea, el costo por comprar semilla (en caso de ser requerida), la cantidad de semilla almacenada y que puede ser utilizada para la siembra, el beneficio por vender una tonelada del cultivo y la cantidad de demanda que tiene que ser cubierta (esto es sólo para ciertos cultivos y en caso de ser necesaria).

También es necesario conocer los datos generales de las parcelas. Dentro de esta información se incluye la cantidad de secciones de la parcela, la cantidad de hectáreas totales y el costo por obtener un m³ de agua para abastecerla. En la Tabla 6.2 se presenta la información correspondiente para algunas de estas parcelas.

Parcela	Sección	Hectáreas totales	Costo de Agua (\$/m ³)
1	2	4	10
2	3	7	05
3	3	3	15
4	3	5	19
5	2	6	11
6	2	8	13
7	3	5	16
8	2	6	12
9	3	9	17
⋮	⋮	⋮	⋮
93	3	3	15
94	3	5	19
95	2	6	11
96	2	8	13
97	3	5	16
98	2	6	12
99	3	8	10
100	3	9	11

Tabla 6.2: Datos generales de las parcelas.

Otro punto que es muy importante conocer es la cantidad de agua que consume el cultivo en cada sección de la parcela. Recordemos que las parcelas han sido seccionadas según el tipo de suelo existente en ella y, por lo tanto, la cantidad de recursos que se consume es diferente para cada sección de la parcela.

En la Tabla 6.3 se desglosa información sobre las parcelas, por ejemplo, el número de secciones que tiene, la cantidad de hectáreas en cada sección y el volumen de agua que consume el cultivo durante todo el ciclo de producción en cada una de estas particiones.

Parcela	Sección	Hectáreas	Agua utilizada por cultivo (m ³ /hect)						
			Sorgo	Trigo	Chile	Cebada	Frijol	Maíz	Avena
1	1	1	980	790	630	730	660	920	850
1	2	3	600	550	730	560	570	740	910
2	1	3	520	610	790	990	890	580	800
2	2	2	960	750	760	690	740	900	950
2	3	2	980	570	940	970	690	980	700
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
99	1	3	940	910	540	800	940	710	930
99	2	3	950	930	630	820	750	890	730
99	3	2	850	760	780	730	680	860	790
100	1	3	660	930	940	750	800	790	650
100	2	3	810	800	590	800	940	780	690
100	3	3	570	590	790	730	810	940	660

Tabla 6.3: Agua requerida por cultivo en cada sección de cada parcela.

Por ejemplo, el cultivo Chile consume 630 m³ de agua por hectárea en la primera sección de la primer parcela mientras que para la segunda sección requiere de 730 m³. Para el mismo cultivo, pero para la segunda sección de la parcela número cien necesita de 590 m³ para producirse. Además, de esta misma tabla, se puede obtener información sobre la cantidad de hectáreas que tiene cada sección de la parcela.

En la Tabla 6.4 se presenta una serie de instancias que han sido elaboradas con la información presentada anteriormente con el propósito de observar el comportamiento del modelo.

Las primeras cinco instancias han sido resueltas fijando la esperanza de la cantidad de agua durante todo el ciclo de producción en 1,000,000 de m³ y tomando los valores de los cultivos de la Tabla 6.1. Para cada una de estas instancias se hicieron

Instancia	Cultivos	Parcelas	Secciones	Agua total (m ³)	Beneficio (\$)
1	7	100	3	1,000,000	309,486.00
2	7	100	3	1,000,000	321,090.00
3	7	100	3	1,000,000	326,156.00
4	7	100	3	1,000,000	296,169.00
5	7	100	3	1,000,000	332,923.00
6	7	100	3	1,000	Infactible
7	7	100	3	1,000	
8	7	100	3	1,000	
9	7	100	3	1,000	
10	7	100	3	1,000	
11	7	100	3	1,000	7,068.00
12	7	100	3	1,000	7,000.00
13	7	100	3	1,000	7,100.00
14	7	100	3	1,000	5,994.00
15	7	100	3	1,000	6,880.00
16	7	500	3	1,000,000	366,080.00
17	7	500	3	1,000,000	354,409.00
18	7	500	3	1,000,000	374,320.00
19	7	500	3	1,000,000	368,926.00
20	7	500	3	1,000,000	357,430.00

Tabla 6.4: Resultados de instancias de la planificación de la producción.

variaciones en el consumo de agua de los cultivos (variaciones en la Tabla 6.3), para observar el comportamiento del modelo, y los resultados fueron muy similares debido a que el consumo de agua fue semejante en todas las instancias realizadas.

Para las instancias de la 6 a la 10 se disminuyó a 1,000 m³ la esperanza de la cantidad de agua disponible para el ciclo de producción y el resultado del modelo fue infactible. Este resultado se comporta de acuerdo a lo esperado, ya que no existe la cantidad de agua suficiente para satisfacer la demanda establecida en los cultivos de la Tabla 6.3.

En las instancias de la 11 a la 15 se establecieron los mismos parámetros que en las instancias de la 6 a la 10 respectivamente, sólo que para éstas se eliminó la cantidad de demanda a satisfacer de los cultivos Chile y Maíz (ver Tabla 6.3). En esta ocasión el modelo si encontró la solución óptima, ya que sí existen combinaciones entre cultivos/parcela que puedan ser cosechados con esta cantidad limitada de recursos.

Por último, en las instancias de la 16 a la 20, se regresó a la cantidad de agua inicial (1,000,000 de m³) pero se aumentó la cantidad de parcelas que pueden ser cosechadas a 500. Como se puede observar, los resultados de estas instancias comparados con los resultados de las primeras cinco son muy similares. Esto se debe a que no existe la suficiente cantidad de agua para incrementar el número de parcelas sembradas y por lo tanto el beneficio final sólo aumenta hasta donde el límite de recursos lo permite. Este punto es muy importante, ya que, cuando no se tenga la suficiente cantidad de recursos para sembrar todas las parcelas, el modelo decidirá qué cultivos y qué parcelas sembrar de manera que se obtenga el mayor beneficio al final del ciclo de producción.

Una vez que se tiene la solución del modelo, el siguiente paso consiste en representar esos resultados en información entendible para el productor. Por simplicidad, en la Tabla 6.5 se representan las soluciones para los resultados de las instancias de la 11 a la 15.

Instancia	Solución encontrada	Beneficio (\$)
11	Sembrar cebada en la parcela 22	7,068.00
12	Sembrar maíz en la parcela 75	7,000.00
13	Sembrar maíz en la parcela 83	7,100.00
14	Sembrar cebada en la parcela 63	5,994.00
15	Sembrar maíz en la parcela 29	6,880.00

Tabla 6.5: Soluciones del modelo “Planificación de la producción”.

Las instancias presentadas en la Tabla 6.4 se resolvieron en un servidor Sun Fire V440 de 4 procesadores, 140 Gb de disco duro, 2 Gb de RAM y con sistema operativo Solaris (Unix), utilizado el método de ramificación y acotamiento que viene incluido en la versión 11.2 del CPLEX, con un tiempo de resolución que osciló de los 0.015 segundos a los 0.016 segundos, lo que demuestra la eficacia y la eficiencia del modelo. Se debe resaltar que se realizaron instancias con 100 cultivos, 1,000 parcelas y 10 niveles de humedad y los resultados se obtuvieron en periodos de tiempo de hasta 7 segundos, dónde se vuelve a comprobar la buena funcionalidad del modelo.

6.2.2 PLANIFICACIÓN EFICIENTE DEL RIEGO

Para esta etapa del problema ya se conoce la superficie y el patrón de cultivos óptimo sembrado, es decir, ya se tiene información sobre qué parcela ha sido sembrada y con qué cultivo.

Ahora, el siguiente paso consiste en decidir la cantidad de agua que se debe suministrar al cultivo durante cada turno de irrigación para que su rendimiento se mantenga al cien por ciento al final del ciclo de producción y, por lo tanto, el beneficio al final del ciclo no se vea disminuido.

Se recuerda que para especificar algunos de los parámetros de este modelo son necesarios los resultados del modelo de la planificación de la producción.

Para ejemplificar el funcionamiento del modelo, por simplicidad, se tomará la solución de la instancia 13 del modelo anterior, presentada en la Tabla 6.5, donde se especifica que hay que sembrar el cultivo maíz en la parcela 83 para obtener un ingreso de \$ 7,100.00 al final del ciclo de producción.

Los demás valores requeridos para definir los parámetros correspondientes a este modelo se encuentran definidos en la Tabla 6.7.

El porcentaje de rendimiento alcanzado por el cultivo se define como la suma ponderada de los porcentajes del nivel que ha alcanzado la parcela y de todos los

niveles que se encuentran anterior a este. Por ejemplo, en el segundo turno de irrigación la parcela fue regada hasta alcanzar el segundo nivel de humedad, esto implica que el porcentaje total sea la suma del primero y del segundo ($0.8 + 0.2 = 1$) lo que indica que se puede obtener el cien por ciento de su rendimiento, por lo tanto, el cultivo ha sido regado a su nivel óptimo. Sin embargo, en el tercer turno de irrigación, debido a que no existía la suficiente cantidad de agua, la parcela únicamente almacenó humedad hasta el tercer nivel lo que propició que el rendimiento alcanzado fuera sólo el 90% del rendimiento anterior ($0.4 + 0.3 + 0.2 = 0.9$). Es necesario mencionar que los niveles de humedad se encuentran separados cada 8 pulgadas uno del otro, por ejemplo, el primer nivel se encuentra a 8 pulgadas de la superficie, el segundo nivel a 16 y así sucesivamente. También se puede observar que para algunos niveles de humedad el porcentaje es negativo, lo que indica que no es rentable regar el cultivo hasta ese nivel, es decir, se está colocando exceso de agua a la parcela y esto puede traer como consecuencias una disminución en el rendimiento del cultivo

Las columnas siguientes de la Tabla 6.7 representan la cantidad de agua que se tiene disponible para el turno de irrigación, el nivel de humedad que tiene la parcela antes de ser regada, el nivel de humedad alcanzado en la parcela después del riego, el porcentaje acumulado que será multiplicado por el rendimiento del turno anterior, el rendimiento alcanzado por el cultivo en el turno actual, el beneficio por vender una tonelada del cultivo y la ganancia total de la parcela.

Al igual que en el modelo anterior, una vez que se tiene la solución, el siguiente paso consiste en representar esos resultados en información entendible para el productor. La Tabla 6.6 presenta la interpretación de las soluciones para los resultados de las instancias generadas para este modelo.

Las instancias presentadas en la Tabla 6.7 se resolvieron en un servidor Sun Fire V440 de 4 procesadores, 140 Gb de disco duro, 2 Gb de RAM y con sistema operativo Solaris (Unix), utilizado el método de ramificación y acotamiento que viene incluido en la versión 11.2 del CPLEX, con un tiempo de resolución que osciló de los 0.015 segundos a los 0.016 segundos, lo que demuestra la eficacia y la eficiencia del

Turno de irrigación	Nivel de riego	Porcentaje acumulado	Rendimiento (Tn/hect)	Beneficio (\$/Tn)	Ganancia (\$)
1	Óptimo	100 % del anterior	8.00	1,500	12,000
2	Óptimo	100 % del anterior	8.00	1,500	12,000
3	Sub-óptimo	90 % del anterior	7.20	1,500	10,800
4	Óptimo	100 % del anterior	7.20	1,500	10,800
5	Sub-óptimo	90 % del anterior	6.48	1,500	9,720
6	Óptimo	100 % del anterior	6.48	1,500	9,720
7	Óptimo	100 % del anterior	6.48	1,500	9,720

Tabla 6.6: Soluciones del modelo “Planificación eficiente del riego”.

modelo. También es necesario aclarar que cada turno de irrigación representa una instancia realizada del problema, por lo tanto para los resultados presentados fueron ejecutadas 7 instancias.

Las Figuras 6.2 y 6.3 presentan gráficas que muestran los resultados del modelo para una serie de instancias que fueron generadas para seis parcelas y cuatro periodos de irrigación. En estas imágenes se puede observar que todas las parcelas se regaron a nivel óptimo durante los primeros dos turnos de irrigación, mientras que, para el tercer y cuarto turno, debido a la insuficiente cantidad de agua, no fue posible regar todos los cultivos hasta su nivel hídrico óptimo.

Se recuerda que el modelo decide automáticamente qué cultivos regar para maximizar el beneficio del productor y que si el cultivo no es regado a su nivel hídrico óptimo, su rendimiento va a disminuir y éste jamás va a ser recuperado aunque el cultivo sea regado a nivel óptimo en los próximos turnos de irrigación, esto puede observarse en el tercer y cuarto turno de las Figuras 6.2 y 6.3.

Para este modelo se realizaron instancias con 1,000 parcelas y 10 niveles de humedad, haciendo variaciones en la cantidad de agua disponible, y los resultados se obtuvieron de manera exacta y en periodos de tiempo de hasta 9 segundos, donde se comprueba la calidad del modelo presentado.

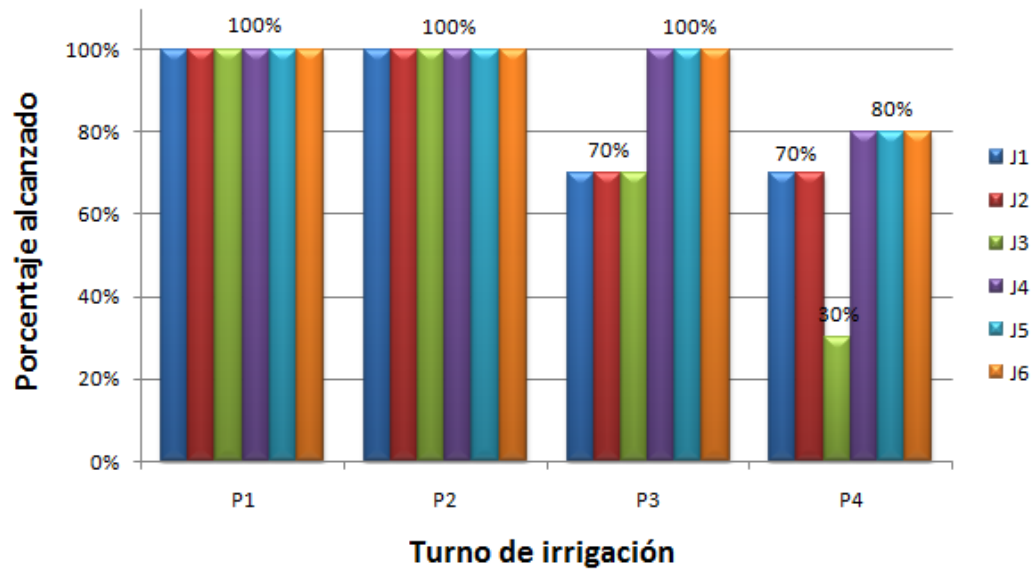


Figura 6.2: Resultados parte I del modelo “Planificación eficiente del riego”.

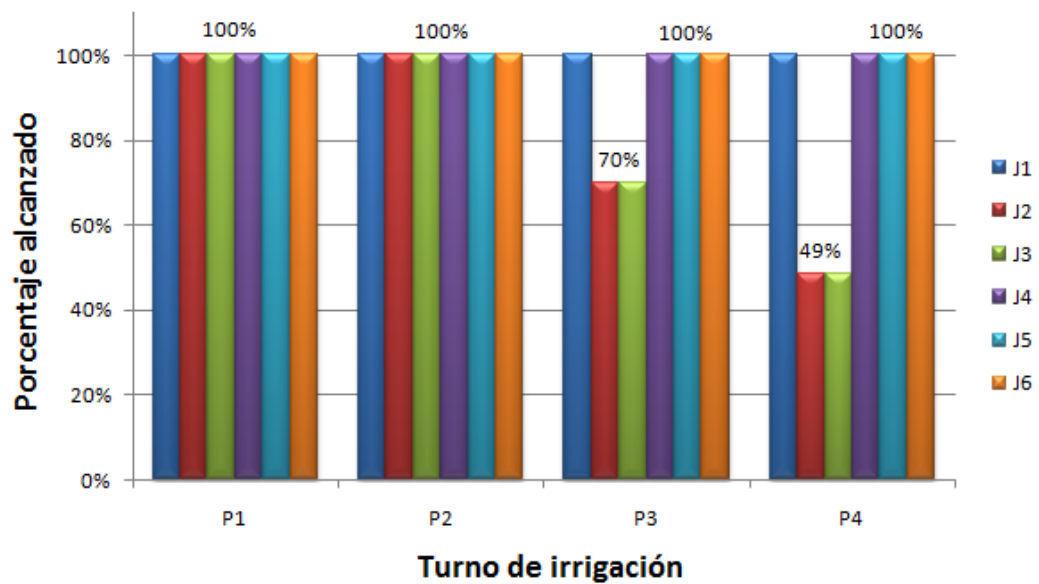


Figura 6.3: Resultados parte II del modelo “Planificación eficiente del riego”.

Turno de irrigación	Porcentaje por nivel de humedad								Agua (m ³)	Nivel actual	Nivel alcanzado	Porcentaje acumulado	Rendimiento (Tn/hect)	Beneficio (\$/Tn)	Ganancia (\$)
	1	2	3	4	5	6	7	8							
1	1.0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	1000	0	1	1.0	8.00	1,500.00	12,000.00
2	0.8	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	800	0	2	1.0	8.00	1,500.00	12,000.00
3	0.4	0.3	0.2	0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	800	1	3	0.9	7.20	1,500.00	10,800.00
4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	-0.2	-0.1	-0.1	800	2	5	1.0	7.20	1,500.00	10,800.00
5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	-0.1	-0.1	800	2	5	0.9	6.48	1,500.00	9,720.00
6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	-0.1	-0.1	-0.1	1000	2	5	1.0	6.48	1,500.00	9,720.00
7	0.3	0.3	0.2	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	1000	2	5	1.0	6.48	1,500.00	9,720.00

Tabla 6.7: Datos generales de los niveles de humedad.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES

FINALES

En este proyecto de investigación se ha abordado el problema de la planificación de la producción agrícola y del manejo eficiente del agua en los sistemas de irrigación. Para realizar esta tarea, el problema fue dividido en dos etapas, una para cada parte del problema.

En la primera etapa, destinada a la planificación de la producción, se determina la superficie y el patrón de cultivos óptimo a ser sembrado respetando aquellos recursos que se encuentran críticamente disponibles, en especial el agua, pero que a su vez se maximice el beneficio total al final del ciclo de producción. Es decir, se decide qué cultivos y qué parcelas sembrar para incrementar los ingresos al final del ciclo de producción. Este proceso se realiza sólo una vez, al inicio de todo el ciclo productivo.

Para la segunda etapa, una vez que se conoce qué parcela ha sido sembrada y con qué cultivo, se decide qué cultivos regar y con cuánta cantidad de agua, procurando que el cultivo alcance su nivel hídrico óptimo, según su etapa fenológica de crecimiento, respetando la cantidad de agua disponible en el turno de irrigación. Este proceso es realizado en cada turno de irrigación a lo largo de todo el ciclo productivo.

Se realizaron dos modelos matemáticos, uno para cada etapa del modelo, los

cuáles fueron realizados como problemas de Programación Entera Mixta (MIP). Para resolver cada uno de estos modelos se utilizó el método de Ramificación y Acotamiento, que viene incluido en el CPLEX versión 11.2. Los resultados experimentales proporcionaron soluciones exactas y rápidas (segundos) para cada uno de los modelos desarrollados, lo que demostró su eficacia y eficiencia.

7.1 CONCLUSIONES

Se ha observado que todos los factores que intervienen en el ciclo de producción de un cultivo (rendimiento, costos, beneficios, cantidad de agua requerida, tipo de suelo, etc.) juegan un papel muy importante en el proceso de toma de decisiones del productor. Por lo tanto, es de suma importancia analizar la cantidad de recursos que se van a tener disponibles, antes y durante la producción, para poder tomar una buena decisión que genere el mayor beneficio para el productor y que minimice los costos de producción.

Se considera que la subdivisión del lote de producción es el factor más importante en la planificación agrícola y en el manejo eficiente del agua. Una mala subdivisión de la parcela puede traer una serie de consecuencias que pueden afectar a la producción en general, algunas de las más importantes se presentan a continuación.

- La decisión sobre la superficie y el patrón de cultivos óptimo a ser sembrado es incorrecta, pese a que el modelo proporciona la solución óptima.
- Los costos de producción se pueden incrementar ya que se suministra a los cultivos una cantidad de recursos mayor de la necesaria.
- La solución proporcionada al productor no es la mejor opción para maximizar los beneficios y reducir los costos de producción.

Por lo tanto, el subdividir adecuadamente el lote de producción es una tarea muy

importante que no se debe dejar pasar por alto ya que ésta influye directamente sobre todo el ciclo de producción agrícola.

En cuanto a los modelos propuestos, tanto para planificar la producción como para el manejo eficiente del agua, se concluye que funcionan de manera eficaz y eficiente y pueden ser utilizados como una herramienta muy importante en el apoyo para la toma de decisiones en la planificación y en el ahorro de recursos agrícolas, principalmente en el ahorro de agua, ya que se obtienen soluciones muy buenas, exactas y rápidas.

Se considera que con las herramientas matemáticas presentadas en esta tesis de investigación se podrá sustituir a la improvisación y el inapropiado estudio de las propiedades del suelo, recursos e insumos, permitiendo tomar decisiones más acertadas en la planificación de la producción y en la optimización de los recursos.

7.2 DISCUSIONES

Debido a que el agua es un recurso natural que se está agotando en todo el planeta y en gran parte del territorio nacional (sobretudo la región centro-norte de la República), un aspecto importante que hay que discutir es a qué se le debe dar prioridad, si realizar la planificación de la producción tomando en cuenta la cantidad limitante de agua, lo cuál podría traer como consecuencias la disminución de los beneficios para el productor pero ayudaría a la conservación de recursos ambientales o, realizar la planificación de tal manera que se obtenga el mayor beneficio pero sin importar las consecuencias naturales que ello implica.

Hay otros elementos que se tienen que discutir, por ejemplo, la cantidad de agua que consume cada cultivo dependiendo al tipo de suelo (arenoso, rocoso, etc.), la cantidad de niveles de humedad que se tienen que considerar para cada cultivo y para cada tipo de suelo, el nivel de afectación del rendimiento del cultivo si es que éste no es regado a nivel óptimo o en caso de que sea regado a un nivel mayor del

óptimo, entre otros.

7.3 TRABAJO FUTURO

Existe aún mucho trabajo por realizar para el problema de la planificación de la producción agrícola. Es cierto que este tema ha sido tratado ampliamente en la literatura, sin embargo, son pocos o casi nulos los trabajos que toman en cuenta los requerimientos de los cultivos en tiempo real.

Por lo tanto, se debe aprovechar toda esta gran cantidad de información, proporcionada por las nuevas herramientas tecnológicas de la Agricultura de Precisión, para incrementar el aprovechamiento de recursos en el campo agrícola. Los modelos realizados en esta tesis de investigación presentan sólo algunos de los beneficios de manipular parte de esta información.

A continuación se enlista una serie de actividades que dan continuidad a este trabajo y que a nuestra consideración pueden ayudar a mejorar la planificación de la producción agrícola.

- Resolver los modelos presentados en este proyecto de investigación con información proveniente de algún problema de la vida real.
- Definir estrategias para mejorar la repartición y el aprovechamiento del agua de tal manera que se asegure la existencia de este valioso recurso.
- Utilizar el enfoque estocástico para resolver el modelo de la planificación de la producción y hacer la comparación con respecto a las soluciones presentadas en este trabajo.
- Realizar un modelo para el seccionamiento del lote de producción de acuerdo a diferentes propiedades del suelo como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), índice de materia orgánica ó, una mezcla de varias propiedades.

-
- Analizar si el seccionamiento resultante es similar con todos los índices de medición y, en caso de no ser así, aplicar las soluciones del modelo en la vida real para determinar cuál es la propiedad que genera el mayor beneficio para el productor y que a su vez ayuda en la conservación de los recursos naturales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Cálculo de Evapotranspiración de cultivo (ETc) mediante el uso de coeficientes(Kc)», Noviembre 2011, URL <http://www.sfa.gob.mx/simarbc/Coeficiente%20del%20cultivo%20%28Kc%29.pdf>.
- [2] «Necesidades de agua de los cultivos», Noviembre 2011, URL http://www.elriego.com/informa_te/riego_agricola/fundamentos_riego/programacion_riegos/necesidades_agua.htm.
- [3] ABAD SORIANO, M. T., «Introducción a los esquemas algorítmicos», *Dept. L.S.I. - U.P.C.*, report LSI-97-6-T, 1997.
- [4] ADEYEMO, J. y F. OTIENO, «Differential evolution algorithm for solving multi-objective crop planning model», *Agricultural Water Management*, **97**(6), págs. 848–856, 2010.
- [5] AGROECONÓMICA, «Sistema de Información Geográfica», Noviembre 2011, URL http://www.scanterra.com.ar/agricultura_precision_inf.html.
- [6] ALLEN, R. G., L. S. PEREIRA, D. RAES y M. SMITH, «Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Riego y Drenaje. Manual 56», *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)*, Roma, Italia, 2006.
- [7] ALMASRI, M. y L. MCNEILL, «Optimal planning of wastewater reuse using the suitability approach: A conceptual framework for the West Bank, Palestine», *Desalination*, **248**(1-3), págs. 428–435, 2009.

- [8] ALMIÑANA, M., L. ESCUDERO, M. LANDETE, J. MONGE, A. RABASA y J. SÁNCHEZ-SORIANO, «WISCHE: A DSS for water irrigation scheduling», *Omega*, **38**(6), págs. 492–500, 2010.
- [9] ALMIÑANA, M., L. ESCUDERO, M. LANDETE, J. MONGE y J. SÁNCHEZ-SORIANO, «WISCHE: A Decision Support System for Water Irrigation Scheduling», *Centro de Investigación Operativa*, Universidad Miguel Hernández, 2008.
- [10] AQUASPY, «Sensores Remotos», Noviembre 2011, URL <http://www.aquaspy.com/Home.aspx>.
- [11] ASSAD, E. y E. SANO, «Sistema de Informações Geográficas aplicações na agricultura», *Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, CPAC, Embrapa-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, SPI*, 1993.
- [12] BAXENDALE, C.A. y G.D. BUZAI, «Áreas de potencial conflicto entre usos del suelo: identificación mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (Primera parte: descripción metodológica)», *Fronteras*, **6**(6), págs. 45–49, 2007.
- [13] BAZARAA, M. S., J. J. JARVIS y H. D. SHERALI, *Programación Lineal y Flujo en Redes*, Limusa, 2004.
- [14] BONGIOVANNI, R. y J. LOWENBERG-DEBOER, «Precision agriculture and sustainability», *Precision Agriculture*, **5**(4), págs. 359–387, 2004.
- [15] BOSQUE SENDRA, J. y R. GARCÍA, «El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial», *Anales de Geografía de la Universidad complutense*, **20**, págs. 49–67, 2000.
- [16] BRAGACHINI, M., A. MARTINI, A. MÉNDEZ y R. BONGIOVANNI, «Avances en la agricultura de precisión en Argentina», *Tercer Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América*, págs. 1–7, 2002.

- [17] BRAVO, J.D. «Breve introducción a la cartografía y a los sistemas de información geográfica (SIG)», *Informe técnico, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas and España. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Ciemat, 2000.*
- [18] CASTERAD, M. y A. MARTÍNEZ-COB, «Aplicación de la teledetección a la mejora del manejo y gestión del agua de riego en Aragón», *Monográfico de Teledetección, Riegos del Alto Aragón, 2010.*
- [19] CHVÁTAL, V., *Linear Programming*, Freeman, 1983.
- [20] COMPANY, D., «Agricultura de Precisión», Noviembre 2011, URL http://www.deere.com/es_MX/ag/ams_jd.html.
- [21] DANTZIG, G. B. y M.N. THAPA, «Linear Programming 1: Introduction», *Springer series in operations research*, 1997.
- [22] DE SANTIAGO, L., A. HERRERA, M. FLORES, J. MARTÍNEZ, J. SOTO y J. BERUMEN, «Optimización de la producción en el área agrícola de la Unidad Académica de Agronomía», *5^{as} Jornadas de Investigación*, Universidad Autónoma de Zacatecas, 2001.
- [23] EARTHSCAN y COLOMBO, «Evaluación exhaustiva del manejo del Agua en Agricultura», *Londres: Instituto Internacional del Manejo del Agua. Agua para la Alimentación, Agua para la Vida*, Londres, 2007.
- [24] FALLAS, J., «Sistemas de Información Geográfica, Teledetección y Sistema de Posicionamiento Global en Costa Rica». *Memoria. Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre para Mesoamérica y Caribe*, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 75p, 1995.
- [25] FAO, «Afrontar la escasez de agua», *Informe técnico*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), Roma, Italia, Marzo 2007.

- [26] FAO, «Día Mundial del Agua 2007 - Afrontar la escasez de agua», *Informe técnico*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), Roma, Italia, Marzo 2007.
- [27] FAO, «La agricultura y la escasez de agua: enfoque programático de la eficiencia en el uso del agua y la productividad agrícola», *Informe técnico*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), Roma, Italia, Enero 2007.
- [28] FAO, «Crisis en el Cuerno de África», Agosto 2011, URL <http://www.fao.org/crisis/horn-africa/home/es/>.
- [29] FAO, «La hambruna se extiende por Somalia», Septiembre 2011, URL <http://www.fao.org/news/story/es/item/89101/icode/>.
- [30] FAO, «Afectadas por la sequía 62 áreas naturales protegidas en México», Enero 2012, URL [http://www.fao.org/agronoticias/agro-noticias/detalle/es/?dyna_fef\[uid\]=120806](http://www.fao.org/agronoticias/agro-noticias/detalle/es/?dyna_fef[uid]=120806).
- [31] FAO, «La sequía abrasa México», Enero 2012, URL [http://www.fao.org/agronoticias/agro-noticias/detalle/es/?dyna_fef\[uid\]=120806](http://www.fao.org/agronoticias/agro-noticias/detalle/es/?dyna_fef[uid]=120806).
- [32] FONSECA, C., «El valor económico del agua», *Contexto*, **1**, págs. 34–38, 2010.
- [33] GEORGOUSSIS, H., C. BABAJIMOPOULOS, A. PANORAS, G. ARAMPATZIS, E. HATZIGIANNAKIS, A. ILIAS y D. PAPAMICHAIL, «Regional scale irrigation scheduling using a mathematical model and GIS», *Desalination*, **237**(1-3), págs. 108–116, 2009.
- [34] GIL, E., «Situación actual y posibilidades de la Agricultura de Precisión», *Escuela Superior de Agricultura de Barcelona*, **18**, 2008.
- [35] GUERRERO, T., C. RIVES, A. RODRÍGUEZ, Y. SALDÍVAR y V. CERVANTES, «El agua en la Ciudad de México», *Ciencias*, **94**(094), págs. 16–23, 2010.

- [36] HASSANLI, A., M. EBRAHIMIZADEH y S. BEECHAM, «The effects of irrigation methods with effluent and irrigation scheduling on water use efficiency and corn yields in an arid region», *Agricultural Water Management*, **96**(1), págs. 93–99, 2009.
- [37] HERNÁNDEZ, M. y A. DIEZ, «Hacia una nueva cultura del agua en México: organización indígena y campesina.», *CIENCIA ergo sum*, **17**, pág. 1, 2010.
- [38] HILLIER, F. S. y G. J. LIEBERMAN, *Investigación de Operaciones*, Mc Graw Hill, 2001.
- [39] ILOG, *ILOG CPLEX 11.0 User's Manual*, Mountain View, EUA, 2007.
- [40] LARREA, C., «El Agua y el futuro de la alimentación mundial», *Repositorio Institucional del Organismo Académico de la Comunidad Andina, CAN*, Universidad Andina Simón Bolívar, Ecuador, 2011.
- [41] LEIVA, F., «La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista», en *Memorias VIII Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos*, 2003.
- [42] LLAMAS, M., M. ALDAYA, A. GARRIDO y E. LÓPEZ, «Soluciones para la escasez del agua en España y su aplicación a otras regiones», *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, **103**(1), págs. 41–54, 2009.
- [43] LLOPIS, J., «Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Gestión del Territorio», *Coordinates (X, Y)*, **280**, págs. 755–3, 2009.
- [44] LOBIANCO, A. y R. ESPOSTI, «The Regional Multi-Agent Simulator (RegMAS): An open-source spatially explicit model to assess the impact of agricultural policies», *Computers and Electronics in Agriculture*, **72**(1), págs. 14–26, 2010.
- [45] LOSADA VILLASANTE, A., «Eficiencia técnica en la utilización del agua de riego», *Revista de Estudios Agrosociales*, **167**, págs. 131–154, 1994.

- [46] MAGUIRE, D., «An overview and definition of GIS», *Geographical information systems: Principles and applications*, **1**, págs. 9–20, 1991.
- [47] MARTELLO, S. y P. TOTH, *Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementation.*, Wiley, N. Y., 1990.
- [48] MCKINION, J., J. WILLERS y J. JENKINS, «Spatial analyses to evaluate multi-crop yield stability for a field», *Computers and Electronics in Agriculture*, **70**(1), págs. 187–198, 2010.
- [49] MORAD, M. y A. TRIVIÑO PÉREZ, «Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación», *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (31), págs. 23–46, 2001.
- [50] MORALES-ROSALES, E., J. ESCALANTE-ESTRADA, L. TIJERINA-CHÁVEZ, V. VOLKE-HALLER y E. SOSA-MONTES, «Biomasa, rendimiento, eficiencia en el uso del agua y de la radiación solar del agrosistema girasol-frijol», *Terra Latinoamericana*, **24**, págs. 55–64, 2006.
- [51] MOYA NAVARRO, M. J., *Investigación de operaciones.*, Editorial Universidad Estatal a Distancia, 1990.
- [52] MURRAY, A. y I. RAY, «Wastewater for agriculture: A reuse-oriented planning model and its application in peri-urban China», *Water research*, **44**(5), págs. 1667–1679, 2010.
- [53] OBERMEYER, N., «PPGIS: the evolution of public participation GIS», *Unpublished UCGIS white paper*, 1998.
- [54] ORTEGA, R. y L. FLORES, «Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio-específico», *Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu*, 1999.

- [55] ORTEGA, R. y O. SANTIBÁÑEZ, «Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility», *Computers and Electronics in agriculture*, **58**(1), págs. 49–59, 2007.
- [56] ORTEGA-GAUCIN, D., E. SÁENZ, E. VÉLEZ y L. PIMENTEL, «Aplicación de la programación lineal para la determinación de planes óptimos de los cultivos en los distritos de riego», *La Ingeniería Agrícola: Motor del Desarrollo de la Agricultura Mexicana, XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola*, Universidad Autónoma de Chapingo, México, págs. 574–586, 2008.
- [57] ORTEGA-GAUCIN, D., E. SÁENZ, E. VÉLEZ, L. PIMENTEL y A. GARCÍA, «Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego», *Terra Latinoamericana*, **27**(3), págs. 219–226, 2009.
- [58] OVALLES, F. *et al.*, «Introducción a la agricultura de precisión», *Revista Digital CENIAP HOY*, **12**, págs. 200–302AR1449, 2006.
- [59] PANIGRAHI, D., P. MOHANTY, M. ACHARYA y P. SENAPATI, «Optimal utilization of natural resources for agricultural sustainability in rainfed hill plateaus of Orissa», *Agricultural Water Management*, **97**(7), págs. 1006–1016, 2010.
- [60] REDDY, M. y D. KUMAR, «Evolving strategies for crop planning and operation of irrigation reservoir system using multi-objective differential evolution», *Irrigation Science*, **26**(2), págs. 177–190, 2008.
- [61] AGROSAT, «Sistema de Posicionamiento Global», Noviembre 2011, URL <http://tecnologiaparaelagro.com/web/productos/computadoras/envizipro-raven/>.
- [62] SARKER, R. y T. RAY, «An improved evolutionary algorithm for solving multi-objective crop planning models», *Computers and Electronics in Agriculture*, **68**(2), págs. 191–199, 2009.
- [63] SARKER, R. A. y C. S. NEWTON, *Optimization Modelling a Practical Approach*, CRC Press, 2007.

- [64] SCANTERRA, «Agricultura de Precisión», Noviembre 2011, URL http://www.scanterra.com.ar/agricultura_precision_inf.html.
- [65] SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA, S., «Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON)», Agosto 2011, URL http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=44&Itemid=378.
- [66] SINGH, U., L. REN y S. KANG, «Simulation of soil water in space and time using an agro-hydrological model and remote sensing techniques», *Agricultural Water Management*, **97**(8), págs. 1210–1220, 2010.
- [67] SZNAIDER, G., I. FERLIJWSKYJ, G. OBREGON y M. SOBRAL, «ADP. Sistema de Procesamiento de Información Espacial para la Optimización de la Producción Agrícola», *37º JAIIO - Jornadas de Inf. Ind. - Agroinformática (JII 2008 Agroinfo)*, págs. 136–149, 2008.
- [68] TAHA, H., *Investigación de operaciones*, Pearson Educación, 2004.
- [69] VALERO UBIERNA, C., «Agricultura de precisión: conceptos y situación actual», *Vida Rural*, (136), págs. 58–62, 2001.
- [70] VALERO UBIERNA, C., «Situación actual de la agricultura de precisión en España», *Vida rural*, (192), págs. 17–20, 2004.
- [71] WEINTRAUB, A. y C. ROMERO, «Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: a review and comparison», *Interfaces*, **36**(5), págs. 446–457, 2006.
- [72] WEINTRAUB, A., C. ROMERO, A. NEWMAN, I. HERRERO y B. T., «Operations research in the natural resource industry», *International Transactions in Operational Research*, (5), págs. 1–24, 2010.
- [73] WILLIAMS, H., *Model Building in Mathematical Programming*, Wiley, John, 1999.

-
- [74] WINSTON, W. L., *Investigación de operaciones. Aplicaciones y algoritmos*, Thompson, 2005.
- [75] WOLSEY, L. A., *Integer Programming*, Wiley, John, 1998.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

I.C. Néstor Miguel Cid García

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias
con especialidad en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y MANEJO EFICIENTE DEL AGUA EN UN SISTEMA DE IRRIGACIÓN

Nací el 20 de enero de 1985 en el municipio de Morelos, Zacatecas. Mis padres Jaime Cid Pérez y Ana María García Medina, soy el segundo de cuatro hermanos. Graduado con Mención Honorífica en la Universidad Autónoma de Zacatecas obteniendo el grado de Ingeniero en Computación en la generación 2003 - 2008. Durante el periodo octubre 2011 - enero 2012 realicé una estancia de investigación en la Universidad Técnica Federico Santa María, Campus Santiago Vitacura, Chile, bajo la supervisión del Dr. Víctor Albornoz Sanhueza en colaboración con el Dr. Rodrigo Ortega Blu. Cursé mis estudios de Maestría en el Posgrado en Ingeniería de Sistemas en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, generación 2010 - 2012, desarrollando este proyecto de investigación bajo la dirección de la Dra. Yasmín A. Ríos Solís.