



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“Optimización de redes de agua aplicadas a la
agricultura”**

TESIS presentada por:

José Antonio Meza Contreras

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química como
requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor: **Dr. Fabricio Nápoles Rivera**

Co-Asesor: **Dr. José María Ponce Ortega**

Morelia, Michoacán

Octubre del 2016

ABSTRACT

Optimization of Agricultural Water Networks

By

Eng. José Antonio Meza Contreras

October 2016

Master in Chemical Engineering Sciences

Supervised by Dr. Fabricio Nápoles Rivera and Dr. José María Ponce Ortega

In the present work, an optimization model based on mathematical programming for the integration of water in agriculture is presented. Thus, the proposed methodology is applied for the reuse and recycling of water. The proposed model is based on a superstructure that considers all configurations of interest to find the optimal distribution of water available in a set of crops. In this sense, this approach includes the possibility of installing pumps, pipes and storage tanks in order to store and distribute water at different periods of irrigation. The objective function is to minimize the total annual cost consisting in the cost of the total amount of water used, the cost of capital and operating cost of the equipment used in the process and transportation costs associated to the water system. On the other hand, two types of uncertainties were considered, the first one associated with the amount of water available for this activity and the other considered the cost of water resources, thus, it generates a broader view of the problem. All this would lead to greater availability of water for agricultural use and decrease the deterioration of natural reservoirs. Therefore, the optimization model is solved as a mixed integer nonlinear optimization problem, which considers simultaneously the configuration and optimal operating conditions of the systems under study. The model was coded in the GAMS platform and a case study was solved for the state of Sinaloa.

Keywords: Water integration, Agricultural water management, optimal planning and design, Reusing, Recycling.

RESUMEN

Optimización de Redes de Agua Aplicadas a la Agricultura

Por

I.Q. José Antonio Meza Contreras

Octubre del 2016

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigido por Dr. Fabricio Nápoles Rivera y Dr. José María Ponce Ortega

En el presente trabajo se plantea un modelo de optimización basado en programación matemática para la integración del agua empleada en la agricultura. Para esto se propone una metodología en la cual se aplica su reúso y reciclaje; el modelo propuesto está basado en una superestructura que considera todas las configuraciones de interés para encontrar la distribución óptima del agua disponible en un conjunto de cultivos, considerando su reutilización. En ese sentido, se incluye la posibilidad de la instalación de bombas, tuberías y tanques de almacenamiento y distribución del agua en los diferentes periodos de riego. La función objetivo consiste en minimizar el costo de la red de distribución de agua, la cual se conforma por el costo de la cantidad de agua total utilizada, el costo de capital y el costo de operación de los equipos usados en el proceso. Por otro lado, se manejan dos tipos de incertidumbres, una asociada a la cantidad de agua disponible para esta actividad y otra que considera su costo, de esta manera podemos tener una visión más amplia del problema. Todo esto nos llevaría a lograr una mayor disponibilidad de agua para uso agrícola, así como disminuir el deterioro de los reservorios naturales. Por tal motivo, el modelo de optimización se resuelve como un problema de optimización mixto entero no lineal, el cual considera simultáneamente la configuración y las condiciones de operación óptimas de los sistemas bajo estudio. El modelo se codificó en la plataforma de GAMS y se resolvió un caso de estudio para el estado de Sinaloa. Se encontró que la implementación de este tipo de metodología puede reducir hasta un 40% el consumo de agua fresca utilizada.

Palabras Clave: Integración de agua, Manejo del agua en la agricultura, Planificación y diseño óptimo, reúso, reciclaje.

DEDICATORIA

A mis padres Jesús Cuauhtémoc Meza Rivera y María Esthela Contreras García
Ustedes que han sido siempre un ejemplo para mí, siempre me han apoyado de
manera incondicional, gracias a ustedes es quien soy hoy en día, este logro no
solo es mío es también de ustedes, por esto y más gracias.

A mis hermanos y hermana Jesús Cuauhtémoc Meza Contreras, Jorge Iván Meza
Contreras, Esthela Jazmín Meza Contreras
De alguna u otra manera siempre me han apoyado con su cariño y confianza,
gracias por su inagotable apoyo y gran compañía. Son únicos a su propia manera.

A mis amigos Francisco, Luis Ángel, Karina y Andrea
Ustedes son mi segunda familia, cada uno son personas muy especiales que han
tenido gran impacto en mi vida. Que puedo decir que no sepan ya, los aprecio
demasiado que las palabras no podrían describirlo.

A mis amigos Mónica y Josemaría
Primero que todo felicidades, muchas gracias por su amistad tal vez cuando más
la necesitaba gracias por todo.

A mis amigos Iván, Carlos, Mariana, Olimpia
Que puedo decir gracias a ustedes mi estadía en Morelia fue mucho más amena
ya que cada uno a su manera me ha ayudado inmensamente. Son personas
inigualables y considero que haber realizado esta maestría sin ustedes a su lado
no hubiera sido lo mismo. Gracias por todo y más, espero no perder su amistad
nunca.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Fabricio Nápoles Rivera y al Dr. José María Ponce Ortega por todo el apoyo y conocimiento que me han brindado en todo el transcurso de mi maestría, lo cual me ha permitido realizar mi tesis, fortalecido mi crecimiento personal y profesional.

A todos mis maestros con los que tome clase en la maestría los cuales me ayudaron a superarme a mí mismo y obtener no solo conocimientos académicos si no personales.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por ser mi casa todo este tiempo y darme las facilidades para crecer.

A CONACYT ya que sin él esta maestría no pudiera haberse cumplido, gracias por todo el apoyo económico.

INDICE

ABSTRACT	ii
RESUMEN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
INDICE.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS.....	ix
NOMENCLATURA	x
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Marco teórico.....	3
1.1.1 Agricultura.....	3
1.1.2 Redes de agua en la industria.....	6
1.1.3 Uso del agua en la agricultura	8
1.1.4 Programación matemática	10
1.1.5 GAMS	11
1.1.6 Características del sistema.....	11
1.1.7 Modelos soportados.....	13
1.2 Antecedentes.....	13
1.2.1 Redes de agua en la agricultura.....	13
1.3 Hipótesis	15
1.4 Objetivos.....	15
1.4.1 Objetivo General	15
1.4.2 Objetivos Particulares.....	15
1.5 Justificación	16
1.6 Alcance	16
2 METODOLOGIA.....	17
2.1 Planteamiento del problema	18
2.2 Superestructura	19
2.3 Modelo Matemático.....	21

2.3.1	Balance de masa para el agua fresca	21
2.3.2	Balance de masa en la entrada de cada cultivo	22
2.3.3	Balance de masa en la salida de cada cultivo	22
2.3.4	Balance de masa para los tanques de almacenamiento.....	23
2.3.5	Balance de masa en la descarga ambiental.....	24
2.3.6	Costo capital para los tanques de almacenamiento	24
2.3.7	Costo capital de bombas.....	25
2.3.8	Costo de capital de tuberías.....	25
2.3.9	Costo de mantenimiento para los equipos de proceso	25
2.3.10	Costo de mantenimiento para bombas	26
2.3.11	Costo de agua fresca	26
2.3.12	Existencia de los equipos.....	27
2.3.13	Función Objetivo.....	28
3	RESULTADOS.....	30
3.1	Caso de Estudio	30
3.2	Análisis del caso de estudio	35
3.3	Análisis de los Escenarios	36
3.3.1	Escenario A.....	39
3.3.2	Escenario B.....	40
3.3.3	Escenario C y D.....	41
3.3.4	Escenario E	43
3.3.5	Escenario F	45
3.4	Análisis del proceso bajo incertidumbre	47
3.4.1	Incertidumbre aplicada en el agua.....	47
3.4.2	Incertidumbre aplicada en el costo del agua.....	50
4	CONCLUSIONES	54
5	REFERENCIAS	55

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de riego	5
Figura 2. Porcentaje de agua concesionado en México	6
Figura 3. Esquema general de una red de intercambio de agua	7
Figura 4. Malas prácticas presentadas en la agricultura	10
Figura 5. Clasificaciones de modelos en función de sus variables	12
Figura 6. Diagrama de la metodología propuesta	17
Figura 7. Esquema tradicional de riego	19
Figura 8. Superestructura	20
Figura 9. Módulos de riego del distrito 010 Culiacán–Humaya	30
Figura 10. Área de los diferentes grupos de cultivos para el módulo de riego II-1	32
Figura 11. Superestructura adaptada al caso de estudio	34
Figura 12. Esquema para el Escenario A	39
Figura 13. Esquema para el Escenario B	41
Figura 14. Esquema para el Escenario C	42
Figura 15. Esquema para el Escenario D	43
Figura 16. Esquema para el Escenario E	44
Figura 17. Esquema para el Escenario F	46
Figura 18. Grafica de variabilidad para los 100 eventos	48
Figura 19. Eventos acomodados del menor al mayor respecto al costo	49
Figura 20. Grafica de Variabilidad para el escenario A	51
Figura 21. Eventos en lista para el escenario A	51
Figura 22. Grafica de Variabilidad para el escenario E	52
Figura 23. Eventos en lista para el escenario E	52

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tamaño de los grupos de cultivo	33
Tabla 2. Parámetros más importantes en el modelo	33
Tabla 3. Integración en los escenarios	35
Tabla 4 Resultados para todos los escenarios.....	46

NOMENCLATURA

Subíndices

W	Origen de agua fresca
C	Cultivos
S	Tanques de almacenamiento
t	Periodo de tiempo

Parámetros

Cf_{c,c_1}^{pip}	Costo fijo para las tuberías que transportan agua de un cultivo a otro, US\$
$Cf_{c,s}^{pip}$	Costo fijo para las tuberías que transportan agua de un cultivo a los tanques de almacenamiento, US\$
Cf_{c,c_1}^{pump}	Costo fijo para las bombas que envían agua de un cultivo a otro, US\$
$Cf_{c,s}^{pump}$	Costo fijo para las bombas que envían agua hacia los tanques de almacenamiento, US\$
Cf_s^{sw}	Costo fijo para los tanques de almacenamiento, US\$
Cu_c^{op}	Costo unitario de operación para los tanques de almacenamiento, US\$
$Cu_{c,c'}^{op}$	Costo unitario de operación para las bombas que envían agua hacia otros cultivos, US\$
$Cu_{c,s}^{op}$	Costo unitario de operación para las bombas que envían agua hacia los tanques de almacenamiento, US\$

$Cu_{w,t}^{op}$	Costo unitario del agua fresca, US\$
Cv_{c,c_1}^{pip}	Costo variable para las tuberías que transportan agua de un cultivo a otro, US\$
$Cv_{c,s}^{pip}$	Costo variable para las tuberías que transportan agua de un cultivo a los tanques de almacenamiento, US\$
Cv_{c,c_1}^{pump}	Costo variable para bombas que envían agua de cultivo a otro cultivo diferente, US\$
$Cv_{c,s}^{pump}$	Costo variable para las bombas que envían agua hacia los tanques de almacenamiento, US\$
Cv_s^{sw}	Costo variable para los tanques de almacenamiento, US\$
$Fwf_{w,t}^{tot}$	Caudal total de agua fresca para cada periodo, m ³
K_F	Factor de anualización
$L_{c,c'}$	Longitud de la tubería de un cultivo hacia otro cultivo, m
$L_{c,s}$	Longitud de la tubería de un cultivo hacia los tanques de almacenamiento, m
n	Número de años, años

Letras Griegas

α	Exponente de escala económica
η_a	Eficiencia del agua absorbida por el cultivo

η_e	Eficiencia del agua perdida por evapotranspiración
m	Tasa de interés fraccional por año
Ω_{Fcc}^{\max}	Límite superior de la capacidad de bombas y tuberías para el agua enviada de cultivo a otro cultivo diferente, m^3
Ω_{Fst}^{\max}	Límite superior de la capacidad de bombas y tuberías para el agua enviada de cultivo a tanques de almacenamiento, m^3
Ω_{Fst}^{\max} m^3	Límite superior de la capacidad de los tanques de almacenamiento, m^3
Ω_{Fstc}^{\max}	Límite superior de la capacidad de bombas y tuberías para el agua enviada de tanques de almacenamiento a cultivos, m^3
$\Omega_{w,t}^{\max}$	Límite superior para cada tipo de agua fresca

Variables binarias

z_{c,c_1}^{pip}	Variable binaria que denota la existencia de tuberías para el envío de agua de cultivo a otro cultivo diferente
$z_{c,s}^{pip}$	Variable binaria que denota la existencia de tuberías para el envío de agua de los cultivos a los tanques de almacenamiento
z_{c,c_1}^{pu}	Variable binaria que denota la existencia de bombas para el envío de agua de cultivo a otro cultivo diferente
$z_{c,s}^{pump}$	Variable binaria que denota la existencia de bombas para el envío de agua hacia los tanques de almacenamiento

z_s^{sw} Variable binaria que denota la existencia de los tanques de almacenamiento

Variables

Capc Costo de capital total, US\$

Copc Costo de operación total, US\$

$FC_{c,t}^{tot,out}$ Caudal de salida para cada cultivo en cada periodo, m³

$FCC_{c,c_1,t}$ Flujo de agua enviado desde un cultivo a otro cultivo en cada periodo, m³

FCC_{c,c_1}^{capc} Capacidad máxima utilizada del flujo enviado desde los cultivos a otros cultivos diferentes, m³

$Fce_{c,t}$ Caudal de agua en la descarga al ambiente desde cada cultivo en cada periodo, m³

$Fcst_{c,s,t}$ Flujo de agua enviado hacia los cultivos desde los tanques de almacenamiento en cada periodo, m³

$Fcst_{c,s}^{capc}$ Capacidad máxima utilizada del flujo enviado desde los cultivos a los tanques de almacenamiento, m³

Fe_t Caudal total de agua en la descarga ambiental en cada periodo, m³

$Frsc_{s,c,t}$ Caudal recirculado desde los tanques de almacenamiento hacia cada cultivo en cada periodo, m³

Fst_s^{capc} Capacidad máxima de los tanques de almacenamiento utilizada, m³

$Fst_{s,t}^{tot}$	Caudal total en la entrada para cada tanque de almacenamiento en cada periodo, m ³
$Fst_{s,t-1}^{tot}$	Caudal total en la entrada para cada tanque de almacenamiento en un periodo anterior, m ³
$Fst_{s,c}^{capc}$	Capacidad máxima utilizada del flujo enviado desde los tanques de almacenamiento hacia los cultivos, m ³
$Fw_{c,t}^{ab}$	Agua absorbida por cada cultivo en cada periodo, m ³
$Fw_{c,t}^{ev}$	Agua perdida por evapotranspiración para cada cultivo en cada periodo, m ³
$Fw_{c,t}^{in}$	Agua alimentada a cada cultivo en cada periodo, m ³
$Fw_{c,t}^{out}$	Flujo de salida de agua fresca para cada cultivo en cada periodo, m ³
Fwc	Costo total del agua fresca, US\$
$Fwcc_{c',c,t}$	Agua reutilizada proveniente de otros cultivos para cada cultivo en cada periodo, m ³
$Fwfs_{w,c,t}$	Agua fresca enviada a cada cultivo en cada periodo, m ³
$Fwst_{s,c,t}$	Agua recirculada desde los tanques de almacenamiento para cada cultivo en cada periodo, m ³
$Pipc_{c',s}^{cap}$	Costo de capital de tuberías para cada cultivo hacia los tanques de almacenamiento, US\$
$Pips_{c,s}^{cap}$	Costo de capital de tuberías para cada cultivo hacia los tanques de almacenamiento, US\$

$Pumpc_{c,c'}^{op}$	Costo operacional para las bombas para el agua enviada desde los cultivos hacia otros cultivos diferentes, US\$
$Pumpc_{c',s}^{cap}$	Costo de capital de bombas para el envío de agua de cultivo a otro cultivo diferente, US\$
$Pumps_{c,s}^{cap}$	Costo de capital de bombas para cada cultivo hacia los tanques de almacenamiento, US\$
$Pumps_{c,s}^{op}$	Costo operacional para las bombas del agua enviada desde los cultivos hacia los tanques de almacenamiento, US\$
Sw_s^{op}	Costo operacional para los tanques de almacenamiento de agua fresca, US\$
Sw_s^{cap}	Costo de capital de tanques de almacenamiento, US\$
TAC	Costo total anual, US\$

1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería química y el agua siempre han estado relacionadas fuertemente, esto debido a que en gran parte de los procesos industriales; el uso de este recurso es esencial para el desarrollo de los mismos. Por otro lado, el agua es cada vez más escasa, no solo en zonas propensas a la sequía y áridas, sino también en las regiones donde las lluvias solían ser abundantes. Esto debido al aumento acelerado de la población y el desarrollo económico que hacen necesaria una mayor cantidad de agua para satisfacer las crecientes demandas de la agricultura, la industria y sociedad. Por lo tanto, la ingeniería química siempre ha buscado el mejoramiento de las tecnologías y metodologías asociadas al uso del recurso hídrico.

Particularmente, la agricultura es una de los sectores económicos que más agua demandan en el mundo, está representa alrededor del 70% del agua utilizada en el mundo, la cual se ve afectada por el exceso de nutrientes, plaguicidas y otros contaminantes. Sin embargo, la competencia por el agua y su contaminación representan un aumento en el costo debido al tratamiento y distribución que actualmente es necesaria. La demanda del recurso hídrico es cada vez más grande, debido a la urbanización, industrialización y al cambio climático, promueven a que exista una mayor competencia por el agua. El cambio climático podría afectar el suministro de agua y a la agricultura debido al cambio en el calendario estacional de las lluvias, mayor incidencia en inundación y sequías (FAO, 2012).

La gestión sustentable del agua en la agricultura es fundamental para aumentar la producción agrícola, así como asegurar que el agua pueda ser compartida entre todos los usuarios. Con esto podremos mantener los beneficios ambientales y sociales de los sistemas de agua. Por otra parte, el gobierno tiene que mejorar la eficiencia económica y la eficacia ambiental de las políticas que buscan mejorar la eficiencia del uso de los recursos hídricos así como reducir la contaminación del agua en los sistemas agrícolas (OECD, 2015).

La agricultura es una actividad imprescindible para la humanidad, motivo por el cual se ha ocasionado un constante desarrollo tecnológico, ya sea en el mejoramiento de semillas, fertilizantes o en metodologías empleadas en los sistemas de irrigación. Siendo esto último enfocado directamente a la reducción en la demanda de agua y/o al control en el suministro de este recurso para incrementar la producción. Incluso, efluentes obtenidos del tratamiento de plantas de aguas residuales son aprovechados para irrigar algunos cultivos.

Podemos observar que la agricultura es un sector con grandes oportunidades económicas; por lo tanto, el implementar nuevas metodologías podría llevar a grandes beneficios económicos y ambientales. Debido a que el problema de uso de agua no sólo tiene que ver con la síntesis de sistemas de riego agrícola nuevos sino también con el rediseño de los sistemas de riego existentes, es importante que se planteen metodologías para lograr tal objetivo. Diferentes esquemas de reajuste de redes de agua en la industria han sido propuestos (Sotelo-Pichardo y Col., 2011; Rubio-Castro y col, 2012), los cuales representan una base apropiada para desarrollar modelos para el reajuste de sistemas de riego agrícola existentes, tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Así también, la demanda de agua en la agricultura está muy relacionada con los tipos de cultivo que se llevan a cabo en cada temporada, ya que cada uno de estos requiere cierta cantidad del recurso y en cierto tiempo. Por lo que la planeación de cultivos depende fuertemente de la disponibilidad de agua, es por esto que buscamos la mejor manera de seleccionar de forma sistemática las redes de agua que representen la mejor relación entre la parte económica y ambiental.

Es por ello que en la presente Tesis se desarrolla una estrategia para obtener redes de intercambio de agua en la agricultura, que permitan reducir la demanda de agua durante el riego de cultivos sin afectar la producción de los mismos. Dicha estrategia se basa en construir y resolver un modelo matemático en el que se consideren todas las configuraciones de uso, reusó, recicló y

almacenamiento de agua, el cual está conformado por balances de materia, restricciones operacionales, de diseño y de producción.

1.1 Marco teórico

1.1.1 Agricultura

La agricultura es el conjunto de actividades y conocimientos desarrollados por el hombre, destinados a cultivar la tierra y cuya finalidad es obtener productos vegetales (verduras, granos, frutos y pastos) para la alimentación del ser humano y del ganado (FAO, 2006). Como puede notarse, en la definición se resalta la relación trascendental que guarda el hombre con la agricultura, al grado de que sin el hombre la agricultura no existiera y viceversa; permaneciendo esta simbiosis hasta la actualidad. Así también, a partir de la definición anterior es posible establecer que uno de los objetivos de la agricultura es satisfacer la necesidad de alimento del hombre. Debido a esto, se ha visto sujeta a una evolución técnica y científica constante.

La agricultura tradicional propició el desarrollo de diferentes métodos basados en la observación de la naturaleza. Aquí la mayoría de los logros obtenidos fueron resultado de prácticas al azar que se repetían para obtener cosechas con características similares, hasta que estas características eran las deseadas o representaban alguna mejora. Por otra parte, se acudió a la rotación de cultivos con la finalidad de adaptar las cosechas a condiciones climáticas en determinado período del año. Aunado a esto, se ha recurrido al empleo de abono para proveer a la tierra de nutrientes y hacerla más fértil. Siendo estos métodos tradicionales en la agricultura. Esto ha sido la base para el avance tecnológico que observamos en estos días, donde la biotecnología forma parte importante debido al mejoramiento de especies vegetales en términos de mayor adaptabilidad a diferentes climas, mayor resistencia a plagas y sobre todo en el estudio para incrementar la producción.

Sin embargo, independientemente de la etapa en el desarrollo de la agricultura, ésta se encuentra íntimamente ligada al consumo de agua, ya que ésta representa un elemento imprescindible para las etapas de crecimiento de las especies vegetales. Como se mencionó anteriormente, la agricultura es una de las actividades social y económica que más agua demanda en el mundo, si se toma la agricultura como un proceso industrial, el desperdicio y desechos que como proceso representa, afecta a los reservorios naturales, ya que en algunos casos se desaprovecha hasta el 50 % del agua alimentada a los cultivos. Este porcentaje es reflejo del mal manejo que en ocasiones se presenta en la distribución de agua o de la falta de conocimiento en la planificación de los diferentes tipos de riego. En la aplicación de los diferentes tipos de riego debe tenerse en cuenta el tipo de cultivo, características de la tierra y condiciones atmosféricas.

Se representan tres de los principales sistemas de riego que con más frecuencia se utilizan en la agricultura actualmente. El riego por goteo la característica de utilizar pequeños caudales a baja presión con lo cual se pretende reducir el volumen de suelo mojado, se debe operar con altas frecuencias de aplicación (**Figura 1.a**). Se puede hablar de una reducción en la evaporación de agua debido al arreglo específico de estos sistemas dependiendo de cada cultivo, pero no de la transpiración del cultivo, que se debe tomar en cuenta en la demanda total de agua como proceso. Existen algunos inconvenientes con este tipo de sistema de riego, esto se debe mayormente al costo que representa el diseño específico para cada cultivo, pero también se puede hablar de un incremento en la concentración de sales alrededor de las zonas regadas, esto puede constituir un inconveniente importante para la plantación siguiente, si las lluvias no son suficientes para lavar el suelo.

En el sistema de riego por aspersión (**Figura 1.b**), la aplicación de agua se realiza en forma de lluvia, lo cual ayuda a disminuir la pérdida de agua de la planta por transpiración. La localización específica de este tipo de sistemas determina su eficiencia, contando con la ventaja de aprovechar la altura de los terrenos pronunciados. Uno de los riegos utilizados desde la antigüedad y que se sigue

utilizando hasta la fecha es el riego por inundación (**Figura 1.c**). Este riego se caracteriza por tener un bajo costo de capital debido a la disminución del uso de equipo para su aplicación. Si bien es un sistema con una eficiencia máxima del 50% en la absorción del agua por parte del cultivo, la penetración del agua en el suelo y su permanencia permite disminuir las pérdidas por evaporación, siendo el otro 50% de pérdidas por el indebido manejo y/o malas prácticas.



a) Riego por goteo



b) Riego por aspersión



c) Riego por inundación

Figura 1. Tipos de riego

Como se muestra en la **Figura 2**, el agua concesionada a la agricultura representa el mayor porcentaje. Es por esto que el considerar el uso de agua en la agricultura como un proceso, permitirá desarrollar metodologías para la síntesis e integración como en los procesos industriales con el fin de utilizar de manera adecuada este recurso.

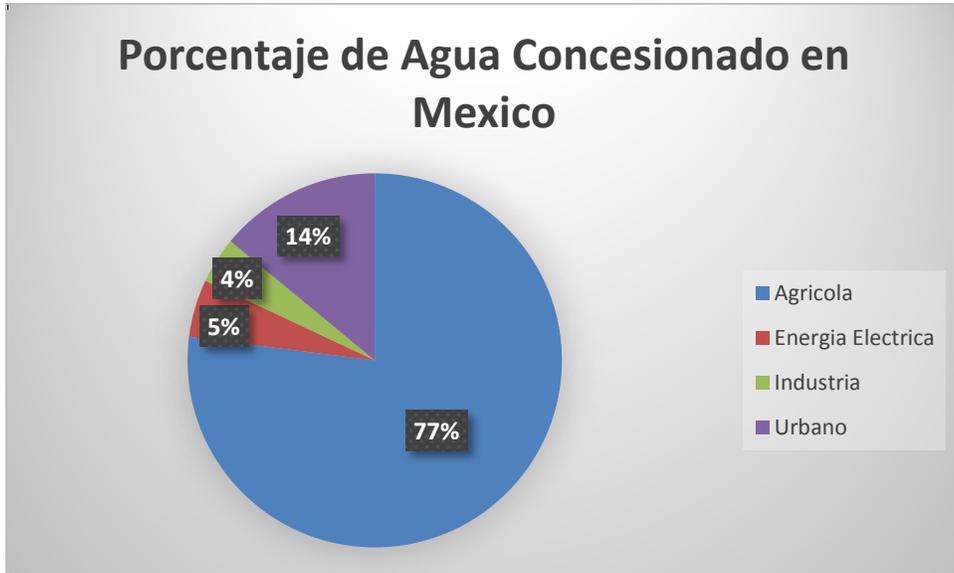


Figura 2. Porcentaje de agua concesionado en México

1.1.2 Redes de agua en la industria

Las redes de agua en la industria tienen como objetivo el minimizar el uso de este recurso así como los costos asociados a los procesos. La escasez de agua es un problema que ha sido analizado de manera matemática con algoritmos, gráficas y métodos algebraicos. En la **Figura 3** podemos encontrar el esquema más básico donde el agua desechada de una industria es recirculada (o tratada previamente si es que se necesita) a esta misma o desechada.

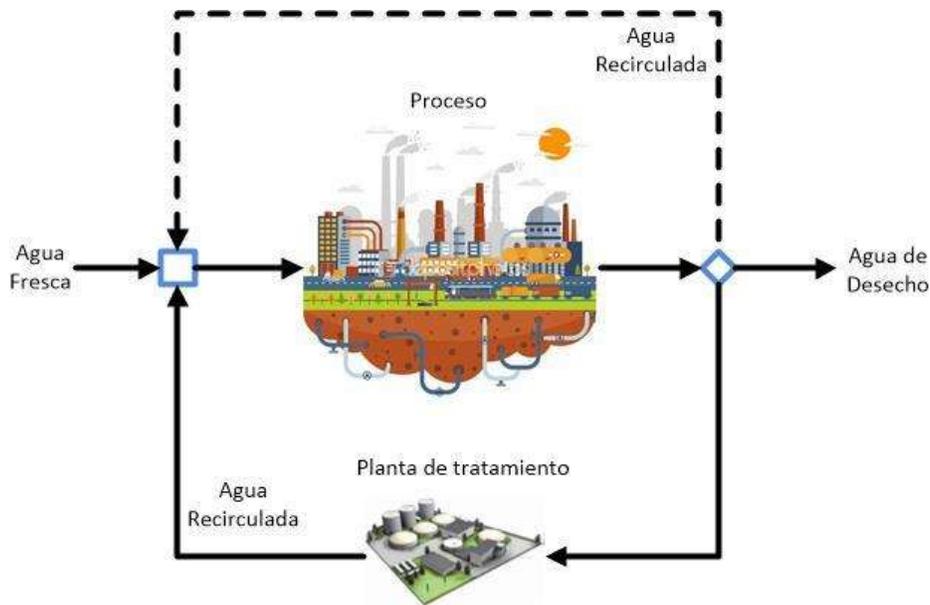


Figura 3. Esquema general de una red de intercambio de agua

La integración de agua en plantas ha sido abordada de diferentes maneras, dependiendo de su objetivo (minimización de agua fresca, flujo de descarga al medio ambiente y costo de tratamiento), para su modelación Olesen y Polley (1996) reportaron métodos gráficos y Chew y col. (2007), Foo (2008), Bandyopadhyay y col. (2010), Chew y col. (2010a, 2010b) propusieron métodos algebraicos. La integración de procesos en el diseño de redes de agua en refinerías y plantas de procesamiento se basan en un rediseño de la red existente considerando la forma en que interactúan con los diferentes sistemas (Bagajewiz, 2000), este tipo de problemas ha sido abordado principalmente utilizando programación matemática ya que la interacción entre el gran número de variables hace demasiado complejo el problema y es ineficiente tratarlo de otra manera. Savelski y col (2000) presentaron un modelo para las condiciones óptimas en una planta de procesamiento, estas son consideradas en base a los contaminantes y a las diferentes locaciones de agua en la planta. Por otro lado, se han desarrollado una serie de metodologías para la optimización global en una planta para la integración de los sistemas de agua (Karuppiah y col., 2006; Xigang y col., 2008).

Por otra parte, la integración de redes de intercambio de agua de diferentes industrias recibe el nombre de parque industrial. Cuando esta agrupación de industrias busca en conjunto un óptimo funcionamiento económico y ambiental a través de una colaboración eficiente es llamado parque eco-industrial (Lowe, 1997). Diferentes trabajos han abarcado diversas problemáticas de los parques eco-industriales, análisis teóricos de la integración de agua entre diferentes plantas (Chwan y col., 2009). Kathleen y col. (2010) propusieron un modelo de optimización difuso para el intercambio de agua en el cual la principal particularidad reside en la toma de decisiones existentes en la planta y la variabilidad en el costo del agua fresca. Rubio-Castro y col. (2011) presentaron un modelo de optimización global para la integración de agua en parques eco-industrial considerando múltiples contaminantes. De esta manera, podemos observar que existe una gran cantidad de trabajos que han abordado el problema de síntesis de integración de redes de agua entre plantas basados en optimización global, y considerando las composiciones de las corrientes (Lovelady y col., 2007; Liao y col., 2007; Chew y col., 2008; Chew y Foo, 2009; Lovelady y El-Halwagi, 2009; Lim y Park, 2010; Rubio-Castro y col., 2012).

1.1.3 Uso del agua en la agricultura

La agricultura es la actividad que representa el mayor consumo de agua a nivel mundial, la cual requiere cien veces más agua que la usada para las necesidades personales. Hasta un 70% del agua que tomamos de ríos y aguas subterráneas se destina a la agricultura, aproximadamente el 10% es utilizada para usos domésticos y el 20% en la industria. Actualmente, cerca de 3,600 km³ de agua dulce son retirados para uso humano. De ellos, aproximadamente la mitad es consumida como resultado de la evaporación, la incorporación en los cultivos y la transpiración de los cultivos. La otra mitad se dirige hacia las aguas subterráneas y fluye superficialmente o se pierde en la evaporación improductiva. Hasta el 90% del agua extraída para uso doméstico se devuelve a los ríos y

acuíferos como agua residual y las industrias suelen consumir sólo el 5% del agua que se retira (FAO, 2012).

En el transcurso de los años, la gestión del agua de riego ha tenido que adaptarse a las necesidades de producción cada vez más grandes; sin embargo, las tecnologías de ahorro de agua ya se encuentran disponibles y pueden reducir significativamente la pérdida de agua. Los agricultores podrían adoptar diferentes tecnologías de riego para ahorrar agua considerando los incentivos gubernamentales o aranceles. Las principales tecnologías susceptibles a ser utilizadas en los países en desarrollo, donde la mano de obra es abundante, son tecnologías subterráneas y el riego por goteo. Ambas tecnologías dependen de la aplicación frecuente de pequeñas cantidades de agua lo más directamente posible a las raíces de los cultivos. La reducción de la contaminación del agua utilizada por las granjas, industrias y áreas urbanas permitiría un gran incremento en el agua utilizada en el riego. Existen enormes beneficios potenciales que se obtienen de la utilización de aguas residuales para el riego.

Una vez dicho lo anterior, se puede concluir que la agricultura puede ser señalada como una actividad de uso ineficaz del agua debido a las malas prácticas (**Figura 4**), baja eficiencia de riego y la variabilidad existente del sistema. Ya que la *eficiencia del uso del agua* (relación entre el agua de riego absorbido por las plantas y la cantidad de agua extraída para fines de riego) a nivel global, en países en vías de desarrollo, es alrededor del 38 % (FAO, 2006), y en las próximas décadas se estima un leve incremento en la mencionada eficiencia. Esto a partir de la tecnificación y planeación de los sistemas de riego existentes, tales como, riego por inundación, por goteo y por aspersión.



Figura 4. Malas prácticas presentadas en la agricultura

1.1.4 Programación matemática

La programación matemática es una herramienta que permite plantear y resolver problemas de alto grado de complejidad, en la programación matemática se involucra la optimización de una funciones objetivo que depende de un conjunto de variables de decisión y de parámetros. Estas variables pueden ser continuas o enteras, y pueden tener límites máximos y mínimos, así como formar parte de un conjunto de restricciones que limitan la solución de nuestro problema. El tipo de variables y de restricciones determinan el tipo de modelo como podemos observar en la **Figura 5**. Se observa que existen problemas enteros, problemas lineales, problemas no lineales, problemas mixtos-enteros lineales y problemas mixtos-enteros no lineales. En los diferentes tipos de problemas pueden entrar en juego variables continuas y/o enteras asociadas de manera inteligente por medio de disyunciones matemáticas (Vecchietti y col., 2003). La solución para problemas de programación matemática se compone de tres etapas: la primera etapa corresponde a la obtención del modelo matemático que por medio de ecuaciones algebraicas debe representar los fenómenos y/o situaciones prácticas del problema en cuestión. Una vez obtenido el modelo se procede a la segunda etapa:

la codificación del mismo en la plataforma computacional apropiada; y finalmente, la tercera etapa: se ejecuta tal codificación por medio de resolvers previamente cargados en la plataforma computacional a fin de obtener las condiciones óptimas del caso de estudio. En cuanto a las plataformas computacionales, una de las más empleadas para resolver problemas de optimización es *GAMS*, por sus siglas en inglés *General Algebraic Modeling System* (Brooke y col., 2011). Tal plataforma, es un programa de implementación de algoritmos matemáticos que permiten resolver problemas de optimización, y presenta la ventaja de promover un lenguaje de programación que permite escribir en un editor la formulación matemática del problema y posteriormente aplicar una serie de resolvers para dar solución al problema.

1.1.5 GAMS

GAMS es un software de modelado algebraico general que está diseñado específicamente para el modelado de problemas de optimización lineal, no lineal y mixto enteros. El sistema es especialmente útil con problemas grandes y complejos. GAMS está disponible para su uso en computadoras personales, estaciones de trabajo, mainframes y supercomputadoras. GAMS permite al usuario concentrarse en el problema de modelado, haciendo la instalación simple. El sistema se encarga de los detalles que requieren mucho tiempo de la máquina y el sistema de aplicación de software específico.

1.1.6 Características del sistema

El software GAMS permite al usuario concentrarse en el modelado, al eliminar la necesidad de pensar en los problemas puramente técnicos específicos de la máquina, tales como cálculos de direcciones, tareas de almacenamiento, la vinculación de subrutinas de entrada-salida y el control de flujo, lo cual aumenta el tiempo disponible para conceptualizar y ejecutar el modelo, así como el análisis de

los resultados. El lenguaje GAMS es formalmente similar a los lenguajes de programación de uso general. Por lo tanto, es familiar para cualquier persona con experiencia en programación. Utilizando GAMS, los datos se introducen una sola vez en la lista de parámetros y forma de tabla. Los modelos se describen en declaraciones algebraicas concisas que son fáciles de leer para los seres humanos y las máquinas. De esta manera, juegos completos de restricciones estrechamente relacionadas se introducen en una sentencia. GAMS genera automáticamente cada ecuación de restricción, y permite al usuario hacer excepciones en los casos en que no se desea la generalidad. Las declaraciones de los modelos pueden ser reutilizados sin tener que cambiar el álgebra cuando surgen otras instancias de los mismos o de otros problemas conexos. La ubicación y el tipo de errores se identifican antes de que se tenga una solución. GAMS maneja modelos dinámicos que implican secuencias de tiempo, retrasos y clientes potenciales y el tratamiento de los extremos temporales. Los modelos pueden ser desarrollados y documentados de forma simultánea porque GAMS permite al usuario incluir un texto explicativo, como parte de la definición de cualquier símbolo o ecuación. (Brooke *et al.*, 2014).

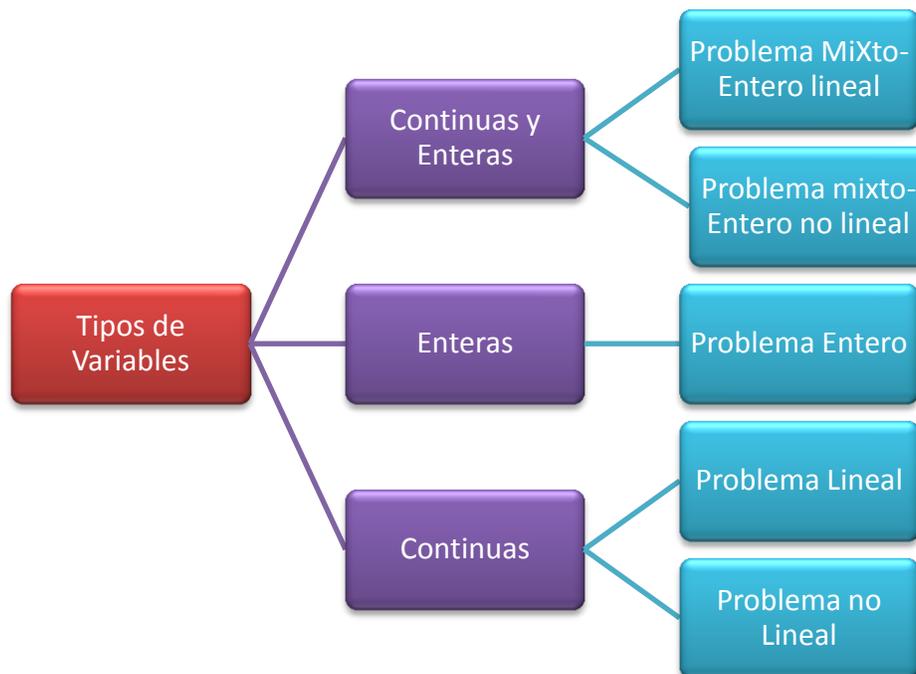


Figura 5. Clasificaciones de modelos en función de sus variables

1.1.7 Modelos soportados

Los tipos de modelo que incluye GAMS son del tipo lineal (LP), mixto entero lineal (MIP), mixto entero no lineal (MINLP), y las diferentes formas de problemas no lineales (NLP), y puede soportar los siguientes tipos de modelos básicos:

- LP Programación lineal.
- MIP Programación entera mixta.
- NLP Programación no lineal.
- MCP Problemas complementarios mixtos.
- MPEC Programas matemáticos con restricciones de equilibrio.
- CNS Sistemas restringidos no lineales.
- DNLP Programación no lineal con derivadas discontinuas.
- MINLP Programación con mezcla de integración y no lineal.
- QCP Programación cuadrática restringida.
- MIQCP Programas con restricciones de mezcla de integración cuadrática.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Redes de agua en la agricultura

La integración del agua en la agricultura ha sido poco estudiada en términos de desarrollo sistemático, ya que no se cuenta con una metodología que permita diseñar sistemas de reúso y reciclaje de agua. Los trabajos reportados han tenido diferentes enfoques, por ejemplo Anderson (2003) presentó un análisis de los beneficios ambientales relacionados al reúso y reciclaje de agua en la agricultura, así como Asim y col. (2015) presentaron diferentes metodologías, oportunidades y perspectivas de cómo podría reutilizarse agua de descargas urbanas, de igual manera Lazarova y Bahir (2000) propusieron una guía para la planeación de proyectos de reúso de agua en la agricultura.

Por otra parte, para mejorar el uso del agua en la agricultura se han implementado diversas metodologías en el proceso de irrigación. Se han trabajado diferentes metodologías en las cuales se mejoran los procesos de riego o en su defecto tratan de mejorar las locaciones óptimas de reutilización de agua en la agricultura, Dentro de este contexto, Bin y col. (2012) presentaron un modelo para la localización óptima de tanques de almacenamiento para el reúso de agua regenerada, Roozbahani y col. (2015) propopoen una metodologia óptima para la reutilizacion de agua a travez de un problema multi-objetivo ambiental, social y economico. Por otra parte, tambien se ha revisado el problema de planificación del uso de aagua bajo incertidumbre, la cual esta asociada hacia los parametros relacionados con este recurso (Mo y Ping, 2014).

Por otro lado, se han propuesto diferentes métodos para mejorar el proceso de riego a través de la optimización de la programación de riego (Pereira y col., 1999). Burke y col. (1999) presentaron diferentes enfoques para maximizar la productividad de la planta y reducir al mínimo la pérdida del agua durante el riego. Así también, se han desarrollado modelos de optimización de irrigación bajo condiciones de escasez de agua (Shangguan y col., 2002; Songhao y Mao, 2006). Por otro lado, Paolo y col (2008) presentaron diferentes eficiencias para el cultivo de maiz así como los efectos del riego en los mismos. Jones y Hunt (2010) incorporaron metodologías para el almacenamiento de aguas pluviales con el objetivo de utilizarla para el riego de cultivos. Theocharis y col. (2006) presentaron un modelo lineal para seleccionar el mejor diámetro de las tuberías empleadas para la irrigación. Izquier y col (2015) mostraron una metodologia para la selección óptima de los tanques de almacenamiento. Katerji y col. (2008) presentan un estudio de diferentes cultivos conociendo así su productividad, evotranspiracion y eficiencia del agua bajo condiciones de estres. Moradi-Jalal (2007) optimizaron la operación de reservorios para la irrigación. Garg y Dadhich (2014) incorporaron modelos no lineales para la calendarización de procesos de irrigación. Zhu (2011) propusieron un modelo de optimización estocastica lineal para el manejo de agua. Belaqziz y col. (2014) presentaron una estrategia evolutiva para el diseño óptimo de procesos de irrigación. Si bien existe una gran cantidad de trabajos

relacionados con la optimización del agua en la agricultura no existen estrategias ordenadas que permitan la integración de redes de agua, de la misma forma que existen para la actividad industrial.

1.3 Hipótesis

Considerar la integración másica de agua en la agricultura desde el punto de vista de síntesis, permitirá identificar escenarios de uso racional de este recurso, lo cual se reflejará en una mayor disponibilidad y calidad de agua, en mayores ingresos económicos y menor impacto ambiental.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Desarrollar un modelo para el diseño óptimo de redes de intercambio de agua en la agricultura, que permita el uso mínimo de este recurso, manteniendo la misma producción.

1.4.2 Objetivos Particulares

- Aplicar el modelo propuesto a un caso de estudio del estado Sinaloa.
- Determinar las mejores opciones de reúso de agua así como sus implicaciones técnico, económicas y ambientales del caso de estudio.
- Evaluar el modelo obtenido a partir de la superestructura propuesta.
- Identificar las potenciales soluciones para reducir al máximo el consumo de agua fresca en el caso de estudio.

1.5 Justificación

El estado de Sinaloa es uno de los líderes mundiales en la producción de alimentos debido a su agricultura. Sin embargo, las sequías de los últimos años, el incremento de la población y el uso irracional de los recursos naturales como el agua han generado escasez de la misma en la entidad. Esto ha tenido un impacto adverso sobre la agricultura; ya que el agua es materia prima imprescindible en tal actividad. Por lo tanto, es de suma importancia el desarrollo de técnicas que permitan el uso óptimo del agua en la agricultura a fin de reducir la demanda de esta sin afectar la producción y afectar lo menos posible el ambiente.

1.6 Alcance

En el presente trabajo de tesis se planea generar diferentes escenarios en los cuales podremos observar que es posible recuperar agua por medio de la integración másica. Esto nos permitirá comprender de mejor manera el problema existente y así tener una perspectiva más amplia del mismo. Conoceremos el sistema integrado, de igual manera que el comportamiento individual de todas las partes del proceso, los tanques de almacenamiento, los intercambios de masa entre cultivo y cultivo. Todo esto nos permitirá evaluar el sistema desde diferentes puntos de vista, económico, ambiental y social. El modelo propuesto representa una herramienta importante para la toma de decisiones ya que la solución óptima para los diferentes casos propuestos no representa un beneficio económico mayor sino uno donde se es más amigable con el ambiente, siendo posible así un acercamiento más real dependiendo de las limitaciones económicas existentes.

2 METODOLOGIA

Para resolver la problemática planteada, se propone la siguiente metodología en la que se involucran los siguientes pasos (**Figura 6**).



Figura 6. Diagrama de la metodología propuesta

1.- Se realizó una extensa revisión bibliográfica, referente a todos los temas de interés del proyecto, optimización de redes de agua en la industria y en la agricultura desde un panorama general. Todo esto permitió atender desde aspectos generales, hasta aspectos específicos y así determinar los factores que influyan de manera importante en las redes de agua en la agricultura.

2.- Se propone una superestructura que incluya todas las configuraciones de interés respecto al uso, reusó y recicló del agua demandada en la agricultura; tales como: a) el agua fresca proveniente de una presa, ésta podrá ser enviada hacia cada tierra de cultivo de un grupo definido para cumplir con las demandas de agua de cada cultivo en específico, b) la corriente de agua de salida de cada tierra de

cultivo podrá ser enviada hacia el drenaje, hacia tanques de almacenamiento y/o hacia otra tierra de cultivo para su reuso, c) en los tanques de almacenamiento se tendrá la posibilidad de captar agua de desecho proveniente de cada tierra de cultivo d) la corriente de agua de salida de cada tanque de almacenamiento deberá tener como posibilidad de destino a cada tierra de cultivo para su reuso.

3.- En base a la superestructura generada se procedió a desarrollar un modelo de optimización para las redes de sistemas de agua en la agricultura contemplando todos los balances de materia necesarios así como restricciones de equipo y reglas de dedo.

4.- Posteriormente se procedió a codificar el modelo en el software GAMS.

5.- Una vez que el código fue depurado, se procedió a analizar el caso de estudio con diferentes escenarios. Estos resultados permiten evaluar de manera económica y ambiental el proceso.

6.- Finalmente, se procedió a reportar los resultados obtenidos así como a la escritura y defensa de la tesis.

2.1 Planteamiento del problema

El esquema tradicional de riego agrícola en Sinaloa es presentado de forma generalizada en la **Figura 7**, donde el agua almacenada en una unidad central llamada presa es distribuida para ser alimentada a un número de tierras de cultivos. Una vez que el agua se alimenta a cada cultivo existen pérdidas por absorción al suelo y por evaporación; no obstante, se tiene cierto flujo de descarga mismo que normalmente es enviado directamente hacia el drenaje y en pocas ocasiones es reutilizado en otro cultivo (esto debido a que no existe una planeación sistemática del uso del agua). Posteriormente, el agua que es descargada al ambiente es enviada hacia un reservorio natural tal como un río,

laguna y/o el océano. Como puede verse en la **Figura 7** no existe un uso óptimo del agua ya que no se considera el reúso y/o el reciclaje de la misma entre un grupo de tierras de cultivo y tampoco existe ninguna opción de recuperación de esta agua, más aún el almacenamiento de agua fuera de las presas centrales no es una opción.

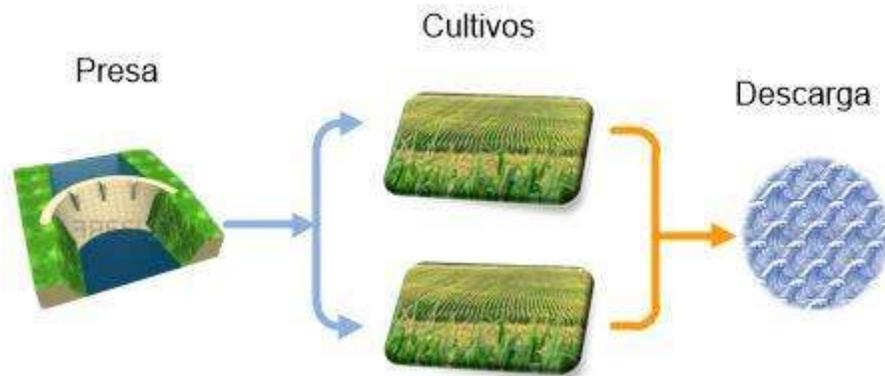


Figura 7. Esquema tradicional de riego

2.2 Superestructura

La superestructura propuesta está basada en la **Figura 7**, de donde se muestra un esquema tradicional de riego. Nótese que en esta no se tienen todas las configuraciones de interés que permiten determinar la configuración óptima para la distribución, almacenamiento y planeación del uso del agua en la agricultura. Estas configuraciones se consideran en la **Figura 8**, en la cual se toman en cuenta ocho tierras de cultivo, cuatro tanques de almacenamiento y una presa, sin embargo, es importante mencionar que el modelo es general y se puede aplicar a cualquier número de tierras de cultivo y fuentes naturales de agua

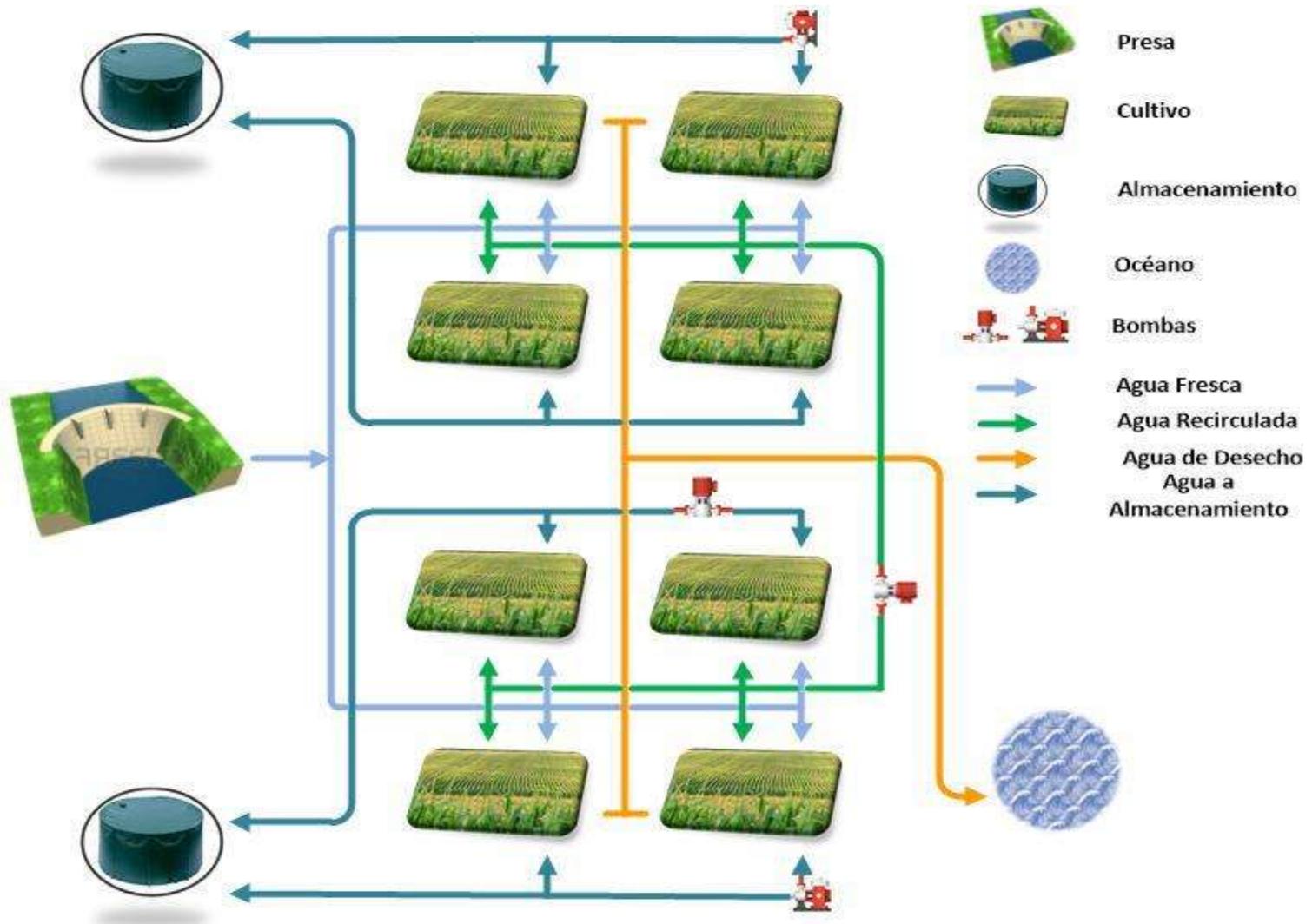


Figura 8. Superestructura

2.3 Modelo Matemático

El siguiente modelo está basado en la superestructura propuesta. En la cual se pueden presentar los siguientes intercambios de masa:

- Entre los cultivos
- Desde los cultivos a los tanques de almacenamiento
- Desde los tanques de almacenamiento a los cultivos
- Desde los cultivos a la descarga en el ambiente.

Cabe destacar que el modelo a obtener será un modelo general indexado para c tierras de cultivo, s tanques de almacenamiento, y w presas. De los cuales serán seleccionados aquellos que en conjunto representen el menor costo de la red de intercambio de agua. La representación matemática de la superestructura se presenta a continuación.

2.3.1 Balance de masa para el agua fresca

El total del caudal de agua fresca para cada periodo ($Fwf_{w,t}^{tot}$) es igual a la suma de agua fresca enviada a cada cultivo ($Fwfs_{w,c,t}$),

$$Fwf_{w,t}^{tot} = \sum_{c \in C} Fwfs_{w,c,t}, \quad w \in W; t \in T \quad (1)$$

Existe un límite superior para cada tipo de agua fresca ($\Omega_{w,t}^{max}$). Esto es debido a que el agua fresca depende de la disponibilidad de esta,

$$Fwf_{w,t}^{tot} \leq \Omega_{w,t}^{max}, \quad w \in W, t \in T \quad (2)$$

Nótese que se han mencionado tipos de agua fresca, esto es porque en algunos casos se utiliza más de una fuente de agua fresca.

2.3.2 Balance de masa en la entrada de cada cultivo

El balance másico en los cultivos se encuentra dado en la imagen anterior. En los cultivos es importante alimentar tanta agua como sea necesaria para aumentar la producción a su máximo. El agua alimentada en cada periodo se encuentra dada de la siguiente manera: el agua fresca entrante, el agua reutilizada proveniente de otros cultivos y el agua recirculada desde los tanques de almacenamiento.

$$FW_{c,t}^{in} = \sum_{w \in W} FW_{w,c,t} + \sum_{c' \in C'} FW_{c,c',t} + \sum_{s \in S} FW_{s,c,t} \quad c \in C, t \in T \quad (3)$$

2.3.3 Balance de masa en la salida de cada cultivo

El flujo de salida en cada cultivo para cada periodo está formado por el agua de la salida la cual es agua al agua entrante menos el agua absorbida por los cultivos y el agua perdida por la evapotranspiración

$$FW_{c,t}^{out} = FW_{c,t}^{in} - FW_{c,t}^{ab} - FW_{c,t}^{ev}, \quad c \in C; t \in T \quad (4)$$

Respecto al agua adsorbida y el agua perdida, estas están relacionadas a las eficiencias de almacenaje y de uso consuntivo

$$FW_{c,t}^{ab} = \eta_a FW_{c,t}^{in} \quad c \in C, t \in T \quad (5)$$

$$FW_{c,t}^{ev} = \eta_e FW_{c,t}^{in} \quad c \in C, t \in T \quad (6)$$

Finalmente, el caudal de salida para cada cultivo puede ser enviado al ambiente, a otros cultivos ($FW_{c,c_1,t}$), y/o a los tanques de almacenamiento ($FW_{c,s,t}$).

$$FW_{c,t}^{tot,out} = FW_{c,t} + \sum_{c' \in C'} FW_{c,c',t} + \sum_{s \in S} FW_{c,s,t}, \quad c \in C, t \in T \quad (7)$$

Se necesita agregar una ecuación que para conocer las necesidades de agua dependiendo del área de cada cultivo Wnc_c .

$$Wnc_c = Ac_c wu \quad c \in C \quad (8)$$

$$Fw_{c,t}^{in} \geq \frac{Wnc_c}{5} \quad c \in C, t \in T \quad (9)$$

Donde el parámetro wu a nos dice la cantidad de agua que necesita una hectárea multiplicado por el área en hectáreas de cada cultivo (Ac_c). De la misma manera, se agrega un límite mínimo para la entrada de agua en los cultivos, de esta manera aseguramos una cantidad mínima a cumplir en cada uno de los cultivos. Este último límite sólo se aplica para los meses en los que se encuentra el periodo de riego.

2.3.4 Balance de masa para los tanques de almacenamiento

El balance de masa para cada tanque de almacenamiento está determinado por la siguiente expresión matemática:

$$Fst_{s,t}^{tot} = Fst_{s,t-1}^{tot} + \sum_{c \in C} Fcst_{c,s,t} - \sum_{c \in C} Frsc_{s,c,t}, \quad s \in S; t \in T \quad (10)$$

Aquí $Fst_{s,t}^{tot}$ es el caudal total en la entrada para cada tanque de almacenamiento en cada periodo t . $Fst_{s,t-1}^{tot}$ es el caudal total en la entrada para cada tanque de almacenamiento en el periodo $t-1$. $Fcst_{c,s,t}$ es el caudal mandado desde cada cultivo hacia cada tanque de almacenamiento en el periodo t y $Frsc_{s,c,t}$ es el caudal recirculado desde los tanques de almacenamiento hacia cada cultivo en el periodo t . Independientemente del agua almacenada antes del primer periodo de tiempo, si

tal almacenamiento es nulo entonces debe especificarse que el contenido en los tanques es igual a cero:

$$Fst_{s,t=0}^{tot} = 0, \quad s \in S \quad (11)$$

Esto es porque en el tiempo inicial los tanques de almacenamientos están vacíos.

2.3.5 Balance de masa en la descarga ambiental

La descarga ambiental en cada periodo (Fe_t) está compuesta por el caudal segregado desde los cultivos ($Fce_{c,t}$).

$$Fe_t = \sum_{c \in C} Fce_{c,t} \quad t \in T \quad (12)$$

2.3.6 Costo capital para los tanques de almacenamiento

El costo de capital de los tanques de almacenamiento depende del costo fijo unitario, el cual se relaciona con la existencia de esta unidad, el cual es multiplicado por su variable binaria correspondiente. Además, el costo variable depende de la capacidad del tanque elevada a un exponente. De esta manera, la ecuación para el tanque de almacenamiento está dada de la siguiente forma:

$$Sw_s^{cap} = K_F \left[z_s^{sw} Cf_s^{sw} + Cv_s^{sw} \left(Fst_s^{cap} \right)^\alpha \right] \quad s \in S \quad (13)$$

Podemos notar que el exponente en la función de costo de capital es menor que uno (el cual representa la economía de escala) y estos dependen del tipo de unidad de proceso. El segundo término en la ecuación está relacionado con la parte variable del costo del equipo y la economía de escalas. Esto significa que el equipo que procesa una mayor cantidad de materia representara un mayor costo.

El factor K_F es un factor de anualización. Este última depende de la tasa de interés fraccional por año (m) y el número de años (n).

$$K_F = \frac{m(1+m)^n}{(1+m)^n - 1} \quad (14)$$

2.3.7 Costo capital de bombas

Similar al costo de capital de los tanques de almacenamiento, el costo de capital de las bombas involucradas es determinado considerando la existencia de los equipos y la capacidad requerida. Por lo tanto, la ecuación siguiente representa el costo capital de las bombas:

$$Pumps_{c,s}^{cap} = K_F \left[z_{c,s}^{pump} Cf_{c,s}^{pump} + Cv_{c,s}^{pump} (Fcc_{c,s}^{capc})^\alpha \right] \quad c \in C; s \in S \quad (15)$$

Cabe destacar que la misma ecuación se repite para el caso donde se envía agua de cultivo a cultivo:

$$Pumpc_{c',s}^{cap} = K_F \left[z_{c,c_1}^{pu} Cf_{c,c_1}^{pump} + Cv_{c,c_1}^{pump} (Fcc_{c,c_1}^{capc})^\alpha \right] \quad c' \in C'; s \in S \quad (16)$$

2.3.8 Costo de capital de tuberías

El costo de capital para la instalación de las tuberías es determinando tomando en cuenta la existencia de las mismas y la máxima capacidad, el cual es representado de la siguiente manera:

$$Pips_{c,s}^{cap} = K_F \left[z_{c,s}^{pip} Cf_{c,s}^{pip} + Cv_{c,s}^{pip} Fstc_{s,c}^{capc} \right] \quad c \in C; s \in S \quad (17)$$

Así como también cuando existe agua enviada de cultivo a cultivo:

$$Pipc_{c',s}^{cap} = K_F \left[z_{c,c_1}^{pip} Cf_{c,c_1}^{pip} + Cv_{c,c_1}^{pip} Fcc_{c,c_1}^{capc} \right] \quad c' \in C'; s \in S \quad (18)$$

2.3.9 Costo de mantenimiento para los equipos de proceso

El costo de mantenimiento para los tanques de almacenamiento de agua fresca es calculado considerando el costo unitario de operación y el total del agua almacenada para los diferentes periodos de tiempo. De esta manera se encuentra dado de la siguiente manera:

$$Sw_s^{op} = Cu_s^{op} \sum_{t \in T} Fst_{s,t}^{tot} \quad s \in S \quad (19)$$

2.3.10 Costo de mantenimiento para bombas

El costo de mantenimiento para las tuberías está asociado al agua fresca y es determinado considerando el costo unitario de bombeo y la energía consumida por la bomba:

$$Pumps_{c,s}^{op} = Cu_{c,s}^{op} \sum_{t \in T} Fst_{s,c}^{capc} \quad c \in C; s \in S \quad (20)$$

También se calcula para el costo de operación para el agua enviada de cultivo a cultivo:

$$Pumpc_{c,c'}^{op} = Cu_{c,c'}^{op} \sum_{t \in T} Fcc_{c,c'}^{capc} \quad c \in C; c' \in C' \quad (21)$$

2.3.11 Costo de agua fresca

De la siguiente manera podemos observar la forma en que se calcula el agua fresca, la cual está en términos del costo unitario de agua fresca ($Cu_{w,t}^{umw}$) y el agua fresca enviada a cada cultivo ($Fwfs_{w,c,t}$):

$$Fwc = \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} Cu_{w,t}^{uw} Fwfs_{w,c,t} \quad (22)$$

2.3.12 Existencia de los equipos

Finalmente, para modelar la existencia o no de los tanques de almacenamiento, las siguientes restricciones lógicas son usadas:

$$Fst_s^{capc} \geq Fst_{s,t}^{tot} \quad s \in S; t \in T \quad (23)$$

$$Fst_s^{capc} \leq z_s^{sw} \Omega_{Fst}^{\max} \quad s \in S \quad (24)$$

De la misma manera son determinadas las existencias de los equipos de proceso restantes así como de las tuberías:

- Bombas y tuberías utilizadas para enviar caudales de los cultivos a otros cultivos:

$$Fcc_{c,c_1}^{capc} \geq Fcc_{c,c_1,t}, \quad c, c_1 \in C; t \in T \quad (25)$$

$$Fcc_{c,c_1}^{capc} \leq z_{c,c_1}^{pu} \Omega_{Fcc}^{\max}, \quad c, c_1 \in C \quad (26)$$

$$z_{c,c_1}^{pu} = z_{c,c_1}^{pip}, \quad c, c_1 \in C \quad (27)$$

- bombas y tuberías utilizadas para enviar caudales de los tanques de almacenamiento a los cultivos:

$$Fstc_{s,c}^{capc} \geq Fstc_{c,s,t}, \quad s \in S; c \in C; t \in T \quad (28)$$

$$Fstc_{s,c}^{capc} \leq z_{s,c}^{pump} \Omega_{Fstc}^{\max}, \quad s \in S; c \in C \quad (29)$$

$$z_{s,c}^{pump} = z_{s,c}^{pip}, \quad s \in S; c \in C \quad (30)$$

- bombas y tuberías utilizadas para enviar caudales de los cultivos a los tanques de almacenamiento:

$$Fcst_{c,s}^{capc} \geq Fcst_{c,s,t}, \quad c \in C; s \in S; t \in T \quad (31)$$

$$Fcst_{c,s}^{capc} \leq z_{c,s}^{pump} \Omega_{Fcst}^{\max}, \quad c \in C; s \in S \quad (32)$$

$$z_{c,s}^{pump} = z_{c,s}^{pip}, \quad c \in C; s \in S \quad (33)$$

En las ecuaciones anteriores, Ω^{\max} es un límite superior de la capacidad de los diferentes equipos de proceso y tuberías, z es una variable binaria, ésta es igual a 1 cuando se selecciona un equipo de proceso o tubería asociada a la configuración óptima, en caso contrario, es igual a cero

2.3.13 Función Objetivo

La función objetivo consiste en minimizar el costo total anual, la cual está compuesta por el costo capital de tanques de almacenamiento (Sw^{cap}), tuberías (Pip^{cap}) y bombas ($Pump^{cap}$). Así como también los costos de operación asociados al mantenimiento de los tanques de almacenamiento (Sw^{op}), bombas ($Pump^{op}$) y el costo del agua fresca utilizada (Fwc).

$$TAC = \sum_{\substack{c \in C \\ s \in S}} Pump_{c,s}^{cap} + \sum_{\substack{c' \in C' \\ s \in S}} Pump_{c',s}^{cap} + \sum_{\substack{c \in C \\ s \in S}} Pip_{c,s}^{cap} + \sum_{\substack{c' \in C' \\ s \in S}} Pip_{c',s}^{cap} \quad (34)$$

$$+ \sum_{s \in S} Sw_s^{cap} + \sum_{\substack{c \in C \\ s \in S}} Pump_{c,s}^{op} + \sum_{\substack{c' \in C' \\ s \in S}} Pump_{c',s}^{op} + \sum_{s \in S} Sw_s^{op} + Fwc$$

En la ecuación anterior es importante notar que los términos de los costos de capital están relacionado con la compra de los diferentes equipos. Cualquiera de estos términos están constituidos por una parte fija, la cual es independientemente del tamaño del equipo y se activa cuando el equipo es requerido; el segundo término incluye la parte variable, la cual está relacionada con la capacidad de la unidad y también se encuentra elevado a un exponente que denota la economía de escala. Por otro lado, tenemos el costo de operación, el cual está relacionado a los flujos utilizados en todos los periodos de tiempo.

El modelo matemático formulado anteriormente es un problema mixto entero no lineal (MINLP por sus siglas en ingles).

3 RESULTADOS

3.1 Caso de Estudio

El caso de estudio propuesto se encuentra en el estado de Sinaloa México. Este caso de estudio corresponde al distrito de riego 010 Culiacán-Humaya, el cual cuenta con tres presas de almacenamiento de agua, así como 5 presas derivadores y cuatro plantas de bombeo para la distribución de agua. El distrito de riego 010 Culiacán-Humaya cuenta con 12 módulos de riego, los cuales están distribuidos de manera geográfica, de norte a sur, empezando por el módulo de riego V-2, V-1, IV-4, IV-3, IV-2, IV-1, I-2, I-1, I-3, II-1, II-2 Y II-3, estos 12 módulos constituyen al distrito, tal y como se presenta en el mapa mostrado en la **Figura 9**.

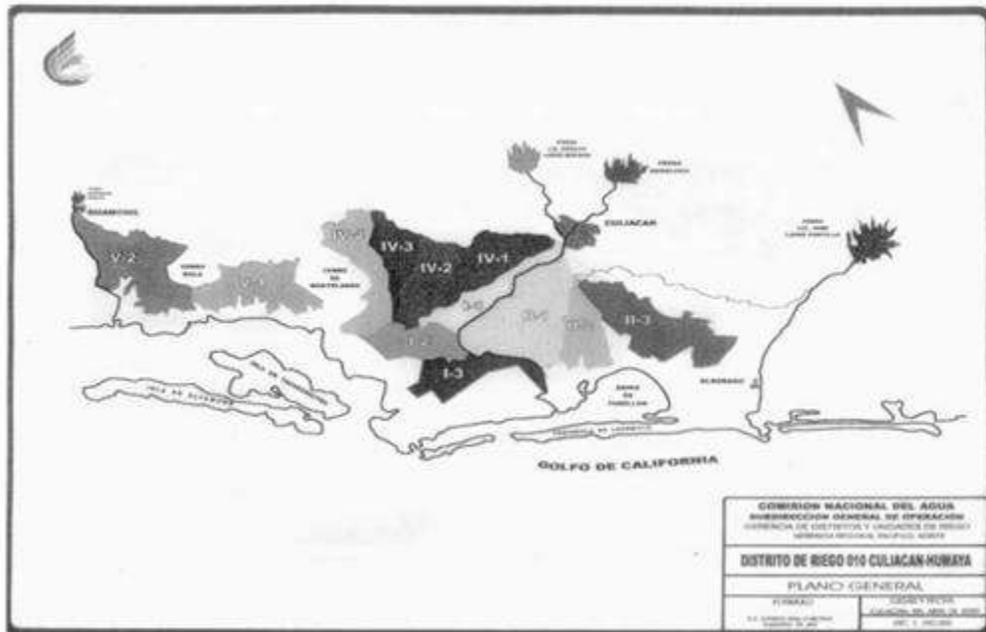


Figura 9. Módulos de riego del distrito 010 Culiacán–Humaya

Se trabajará con el módulo de riego II-1, el cual corresponde a dicho distrito. Este cuenta con una superficie de 18 908,86 hectáreas y tiene un volumen de agua asignada de 130.1 millones de m³. El agua en la región proviene de presas, la cual es distribuida por medio de gravedad y diferentes plantas de bombeo.

Tratando de centrar un poco más el problema, tomaremos una parte de este módulo de riego para simplificar la búsqueda de parámetros; sin embargo, es necesario mencionar que la metodología es general y se puede extender a cualquier área de interés para la cual se cuente con la información necesaria. El área designada cuenta con 138 hectáreas, las cuales son cultivadas con maíz, podemos agruparlas en 10 grupos diferentes con la posibilidad de poner 5 tanques de almacenamiento en diferentes locaciones para suplir la demanda de los diferentes grupos de cultivos (**Figura 10**). Se planean 5 periodos de riego, 1 inicial y 4 en la temporada. De esta manera, se piensa tratar una de las problemáticas que se vive año con año en este modelo de riego que es la de la poca cantidad de agua disponible para suplir las demandas necesarias de agua.

Los datos utilizados para resolver el siguiente problema se muestran en las **Tablas 1 y 2** así como los diferentes parámetros económicos y operacionales. Cabe mencionar que los datos propuestos son para el cultivo del maíz, ya que este representa el principal producto en la región (58% del total) haciéndolo así el más importante para la región. La precipitación es una de las partes a resaltar del modelo, si bien no existe una gran precipitación en las temporadas de lluvia, esta existe en diferentes periodos del año en los cuales podemos almacenar agua para ser utilizada en el primer riego.

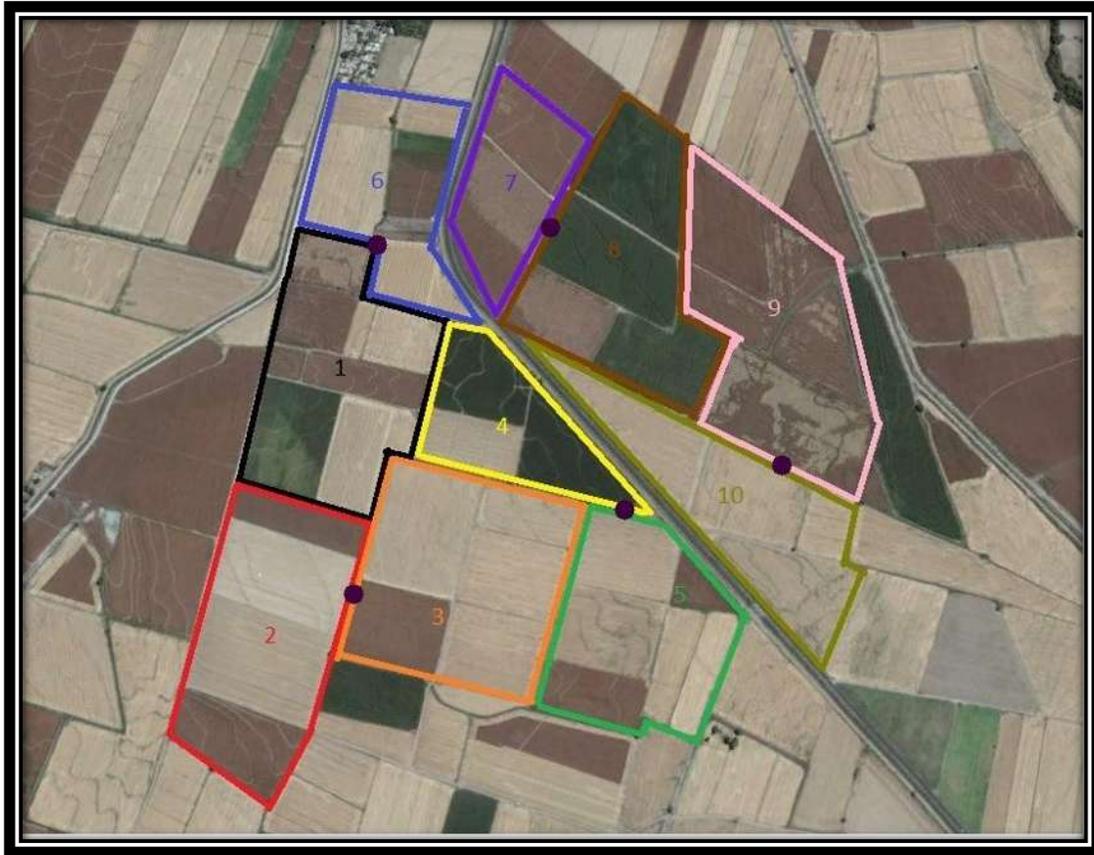


Figura 10. Área de los diferentes grupos de cultivos para el módulo de riego II-1

En la **Figura 10** podemos apreciar los 10 grupos de cultivos, los cuales cubren un total de 138 hectáreas. Por otra parte, también podemos observar que existen 5 puntos purpuras, los cuales representa las posibles localizaciones para la instalación de los tanques de almacenamiento y cómo podemos observar cada uno de los tanques pueden enviar agua principalmente a los cultivos con los cuales colindan, pero esto no significa que no puede enviar agua hacia los demás grupos de cultivos. El tamaño de cada cultivo lo podemos encontrar en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Tamaño de los grupos de cultivo

Cultivo	Tamaño
1	16.15 ha
2	14.17 ha
3	15.89 ha
4	9 ha
5	12.63 ha
6	13 ha
7	9 ha
8	17.6 ha
9	18.33 ha
10	13 ha
Total	138.8 ha

Tabla 2. Parámetros más importantes en el modelo

Parámetros	
Area Total (Ha)	138
Demanda de agua (m³/Ha)	11750
Costo del AF(US\$/m³)	0.017
Numeros de cultivos	10

En la **Figura 11** se puede observar la distribución de los 10 cultivos que se tomaron en cuenta del distrito de riego propuesto y así como sus posibles configuraciones. Para demostrar la aplicación del modelo propuesto, se plantean diversos escenarios, los cuales nos permiten analizar el problema desde diferentes puntos de vista, mostrando así la metodología desarrollada en esta tesis.

En base al caso de estudio, la superestructura se modificó de la siguiente manera:

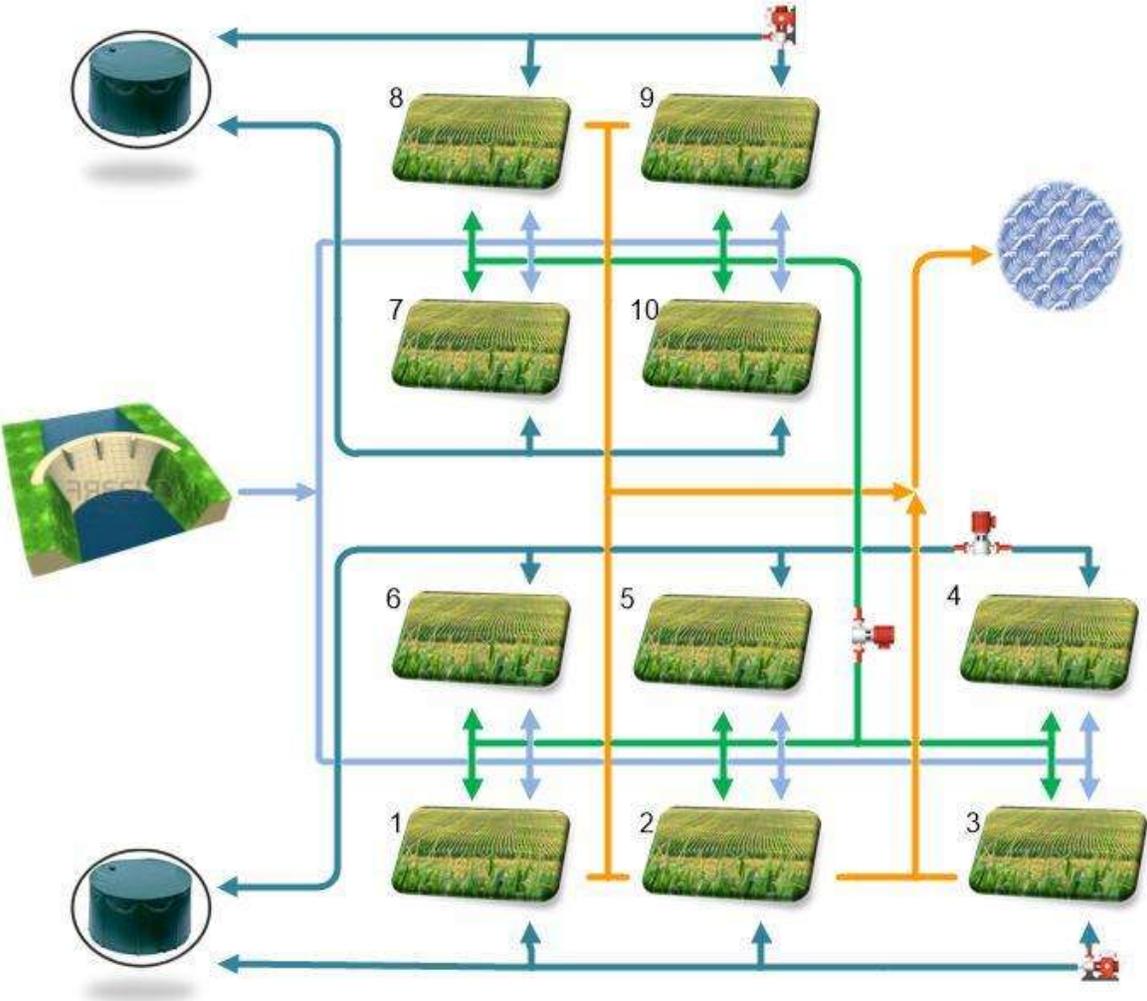


Figura 11. Superestructura adaptada al caso de estudio

Podemos observar en la **Tabla 3** que se proponen 6 escenarios (A, B, C, D, E, F) para analizar el sistema. Cada uno de estos escenarios representa diferentes niveles de integración y diferentes restricciones usadas en el problema y serán explicados a continuación con el análisis del mismo escenario.

Tabla 3. Integración en los escenarios

Escenario	Integración
A	0%
B	10%
C	20%
D	30%
E	Máxima Integración
F	Situación Anormal

3.2 Análisis del caso de estudio

Escenario A (Sin integración): El problema se resuelve sin considerar la integración de agua, es decir bajo el esquema de riego tradicional en el cual sólo se utiliza agua. Lo podemos apreciar en la **Figura 12**, donde no se incluye ninguna interacción entre las diferentes tierras de cultivo. Para lograr esto, las restricciones de equipos, intercambio de agua entre los cultivos y tanques de almacenamiento quedan anuladas.

Escenarios B, C, D (ahorro de un 10, 20, 30%, respectivamente): En estos escenarios se plantea un ahorro gradual del 10, 20, y 30% de toda el agua utilizada en los cultivos, esto considerando la integración de agua (tanques de almacenamiento, bombas, tuberías). El ahorrar un 10, 20, y 30% de agua implica que existan intercambio másico entre ciertos cultivos (existen de 1 a 4 intercambios de masa) esto para cumplir con esta restricción, pero en ninguno de estos casos se presenta el almacenamiento de agua. Podemos apreciar los escenarios en las **Figuras 13, 14, 15**.

Escenario E (Máximo ahorro de agua posible): En este escenario el problema se resuelve recirculando toda el agua que sea factible, lo cual es alrededor de un 40%. Debido a esto, el costo para este escenario es el mayor de todos ya que para poder ahorrar el 40% del agua entrante se necesita del

intercambio de agua en cada uno de los cultivos ciento así este el escenario con más intercambios utilizados. El escenario E lo podemos encontrar en la **Figura 16**.

Escenario F (Situación anormal en la disponibilidad de agua): Para este escenario se minimiza el costo de la red de agua como en los escenarios anteriores la diferencia reside en la entrada de agua. En este escenario, la entrada de agua presenta una deficiencia en un tiempo que nos lleva a que para poder suplir esta deficiencia se utilicen tanques de almacenamiento. El uso de tanques nos permite seguir cumpliendo con la demanda sin contar con el agua necesaria en ese tiempo, pero esto causa que el costo total del proceso se eleve, sin embargo, al mismo tiempo en este escenario se reduce el consumo de agua al máximo como en el escenario E lo que significa una mejora desde el punto de vista ambiental.

En resumen, los resultados para todos los escenarios son presentados en la **Tabla 4**. Nótese que es posible comparar los escenarios abordados en términos económicos (costo total anual del proceso) y ambientales (% de agua reciclada, descarga de agua).

3.3 Análisis de los Escenarios

Económico: En cuestión al costo total anual debido a la producción. El escenario de mayor integración E con un costo total anual de 89.420 US\$ representa el costo más elevado, el cual es un valor esperado ya que entre más integración se utiliza mayor es el costo de la compra de equipos de bombas y tuberías, aunque se reduce el costo por la disminución de agua fresca, esta no es suficiente para compensar la compra de todos los equipos. Podemos observar que el costo para todos los escenarios es directamente proporcional a la integración utilizada ya que el escenario con menor costo es el escenario que representa una menor integración A, y los escenarios de mayor integración aumentan su precio proporcionalmente B, C, D, E. Por otro lado, debemos de recordar que cada uno

de estos escenarios (B, C, D, E) representan una reducción considerable de agua. El escenario F es una situación anormal, por lo tanto no la podemos comparar económicamente con los demás escenarios.

En base a lo anterior, es posible decir que para este determinado caso en términos económicos las mejoras a partir de la integración másica no existen en cambio solo encarecen el proceso. Pero por la parte de la reducción másica de recursos frescos sí se observa un beneficio considerable.

Medio Ambiente: En este aspecto se analiza la demanda de agua, así como la descarga hacia ambiente de los mismos. Lo cual se puede observar en la **Tabla 3**. El escenario E nos permite un ahorro del 40 % de agua fresca respecto al escenario A siendo esta la mayor cantidad de agua posible a recuperar. En los escenarios posteriores encontramos reducciones menores a la del escenario E del 30%, 20% y 10%. Estos escenarios presentan disminuciones en comparación al escenario A. En adición a la demanda de recursos frescos, es importante mencionar que con la configuración obtenida en el escenario E es posible reducir un 80% de agua a comparación del Escenario A. Además, es importante mencionar que si bien no existe una restricción de cuánta agua se puede recircular en los cultivos es importante notar que es imposible reducir al 100% la descarga de agua ya que el agua utilizada para el último riego no existe manera de ser recuperada.

El escenario F, al ser situación anormal en la que las entradas de agua no son iguales a los demás casos. En este sentido, se le obliga a utilizar tanques de almacenamiento por lo cual no podríamos comparar éste con los demás, pero este escenario nos ayuda a predecir si en caso de que no existiera la cantidad de agua necesaria en los cultivos como podríamos solventar este problema y de ser así poder predecir su costo.

Por lo tanto, es evidente que la integración másica permite encontrar escenarios de menor impacto adverso al ambiente, ya que demanda menor cantidad de agua fresca lo que significa menor explotación de los reservorios

naturales (presas, ríos, lagos y mantos freáticos) y en conjunto al máximo de reciclo de agua, las descargas ambientales se reducen y por tanto se tiene menor degradación de los receptores naturales (ríos, lagos, mantos freáticos y mares).

Social: Los beneficios sociales generados por la integración de agua en la agricultura y específicamente en el caso en cuestión, radican en el hecho de que la reducción en la demanda de agua para mencionada actividad económica permite mayor disponibilidad de este recurso para consumo tanto en la misma agricultura como el humano; ya que existe un gran problema escasez de agua en el mismo sector agrícola, actualmente uno de los mayores problemas es que se planta en demasía con el riesgo de no tener el agua necesaria para la producción de cierto cultivo esperado. De igual manera, la escasez de agua para consumo humano es un problema actual que preocupa en gran medida tanto a los gobiernos como a organizaciones mundiales. Además, el hecho de que se disminuya la extracción de agua en reservorios naturales ayuda a la recuperación de los mantos freáticos y a la mayor disponibilidad del recurso. Particularmente, nótese como el Escenario F permite una reducción de 652,220 m³ de agua de desecho respecto al Escenario A.

Finalmente, otro aspecto y seguramente el más importante que tiene la agricultura con la sociedad es el hecho que mediante ésta, se produzca una cantidad de alimentos requerida, como en el caso de las 138.8 Ha con lo cual podemos asegurar una producción alrededor de 1,526 toneladas de maíz. En este mismo sentido, la agricultura también representa fuentes de empleo y el ingreso económico más importante para un número importante de familias, desde este punto de vista la disminución del agua representa la posibilidad de aplicar el agua no utilizada a otras tierras. Lo que significa ingresos económicos para todas las familias relacionadas a estas tierras de cultivo.

Finalmente, las configuraciones obtenidas para cada escenario en cada período de tiempo son presentadas en las **Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17**, las cuales son analizadas a continuación:

3.3.1 Escenario A

La configuración para este escenario se presenta en la **Figura 12**. Donde se observa que debido a que no se considera integración másica en las tierras de cultivo se cumple totalmente con agua fresca el requerimiento de agua para todos los cultivos, el cual es $1,630,548 \text{ m}^3$. Cabe mencionar que esta cantidad de agua representa la totalidad de agua utilizada en todos los tiempos. De la misma manera, la descarga para todos los periodos de tiempos es de $815,273 \text{ m}^3$. Como podremos recordar este escenario es el que representa el esquema tradicional de riego, por lo cual no va más allá del envío de agua desde el reservorio de agua hacia los cultivos donde es aprovechada y después la que no es aprovechada es descargada hacia el medio ambiente.

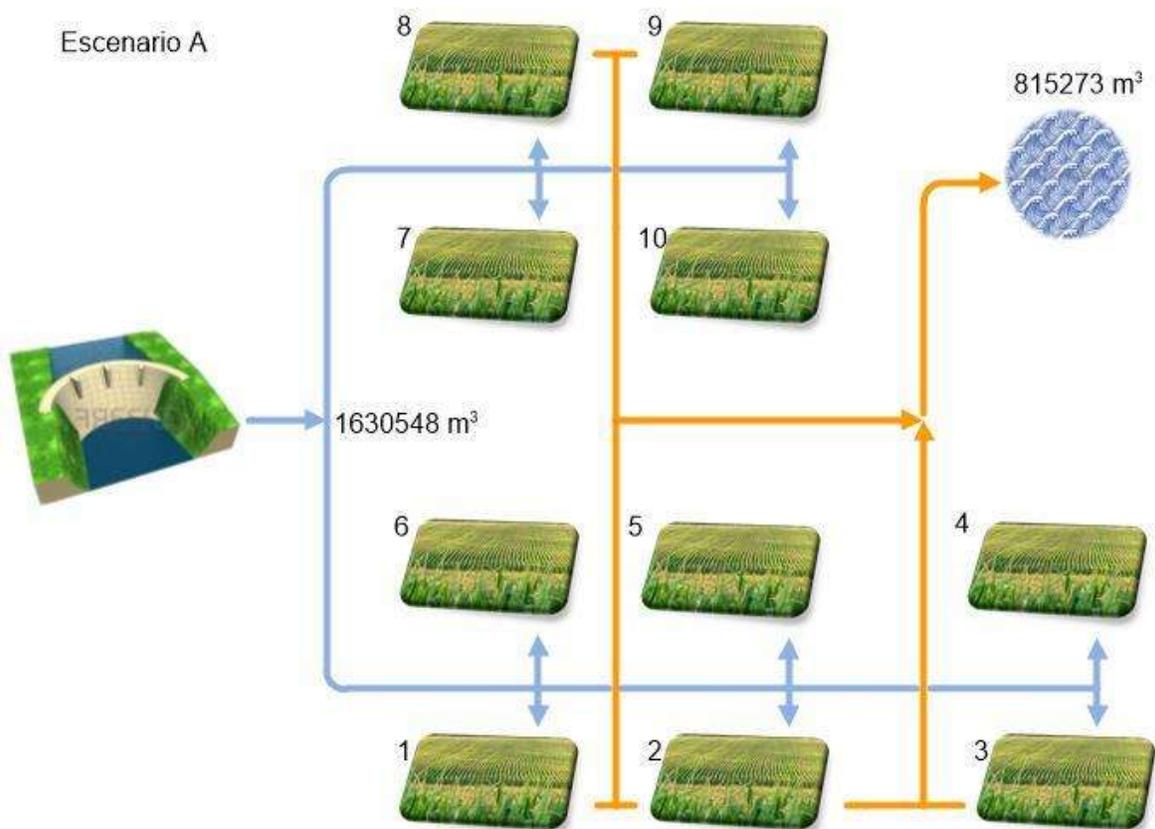


Figura 12. Esquema para el Escenario A

3.3.2 Escenario B

Como se mencionó anteriormente, en este escenario se recupera 10% del agua en la entrada de los cultivos. La configuración obtenida para este escenario es presentada en la **Figura 13**. El ahorro del 10% del agua conlleva a la integración propuesta del intercambio de masa entre los cultivos en este caso podremos observar que existe intercambio de masa entre los cultivos 8 y 9, el agua es recirculada entre estos cultivos ya que si hablamos económicamente es más factible re-utilizar agua con una sola bomba entre estos que la compra de dos bombas y tuberías para el intercambio de agua entre más cultivos, el intercambio entre estos dos cultivos es suficiente para cumplir con el 10% de agua recuperada, lo cual nos deja con una entrada de agua del 1,467,495 m³ y con una descarga del 652,220 m³ en todo los periodos de tiempo. La cantidad total de agua recirculada en este escenario es de 163,053 m³ para todos los periodos de tiempos, la cual la podemos encontrar en la **Tabla 4**.

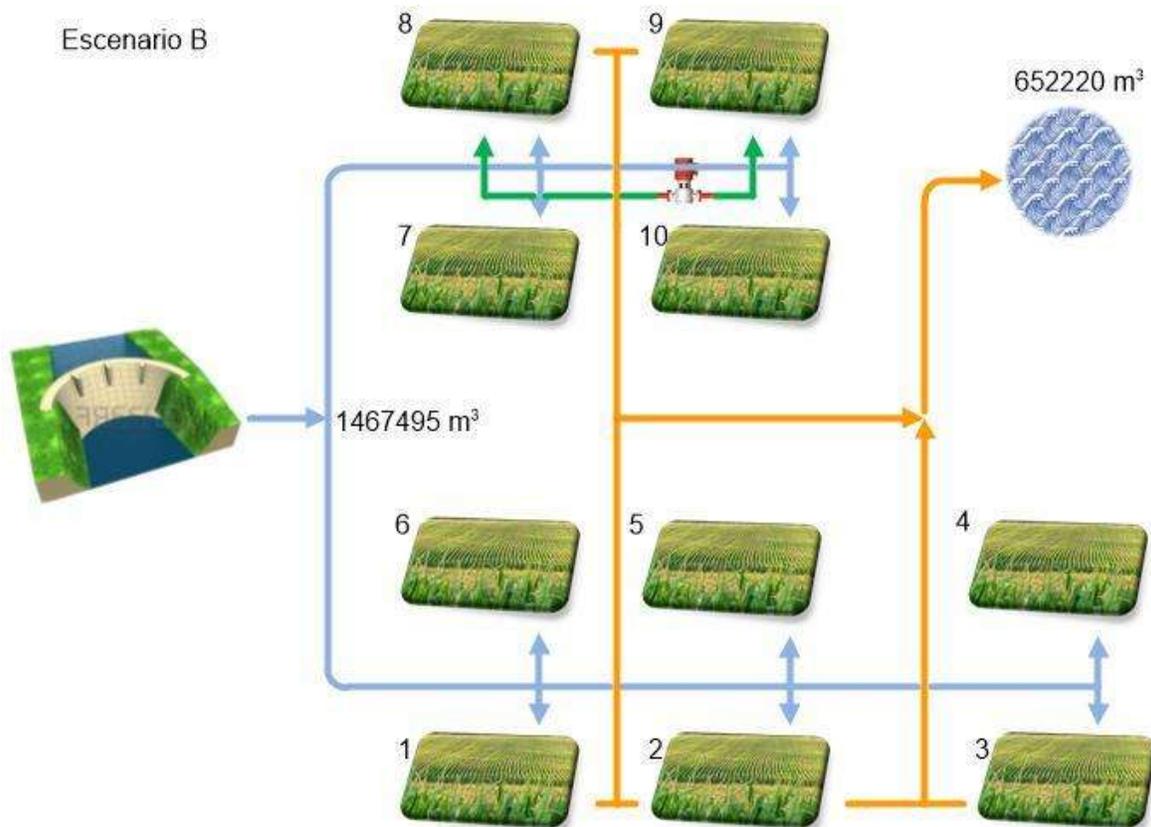


Figura 13. Esquema para el Escenario B

3.3.3 Escenario C y D

En los Escenarios C y D se recuperan respectivamente 20% (326,108 m³) y 30 % (489,163 m³) del agua total utilizada. Las configuraciones obtenidas para estos escenarios son presentadas en la **Figura 14** para el escenario c y en la **Figura 15** para el escenario D. Para estos escenarios podemos observar como los intercambios entre los cultivos son progresivos encontrando 5 y 7 intercambios, respectivamente. Es correcto ver esto debido a que como presentan un ahorro progresivo, los mismos intercambios que encontramos en el escenario C se encuentran en el escenario D con la adicción de dos más para poder así cumplir con el 10% más de ahorro de agua respecto al escenario C. Estos Escenarios

presentan un costo del 58,600 US\$ y 73,889 US\$, una entrada total de agua del 1,304,440 m³ y 1,141,384 m³, así como una descarga del 489,165 m³ y 326,110 m³, y una recirculación total del 326,108 m³ y 489,163 m³ respectivamente para todos los periodos de tiempo.

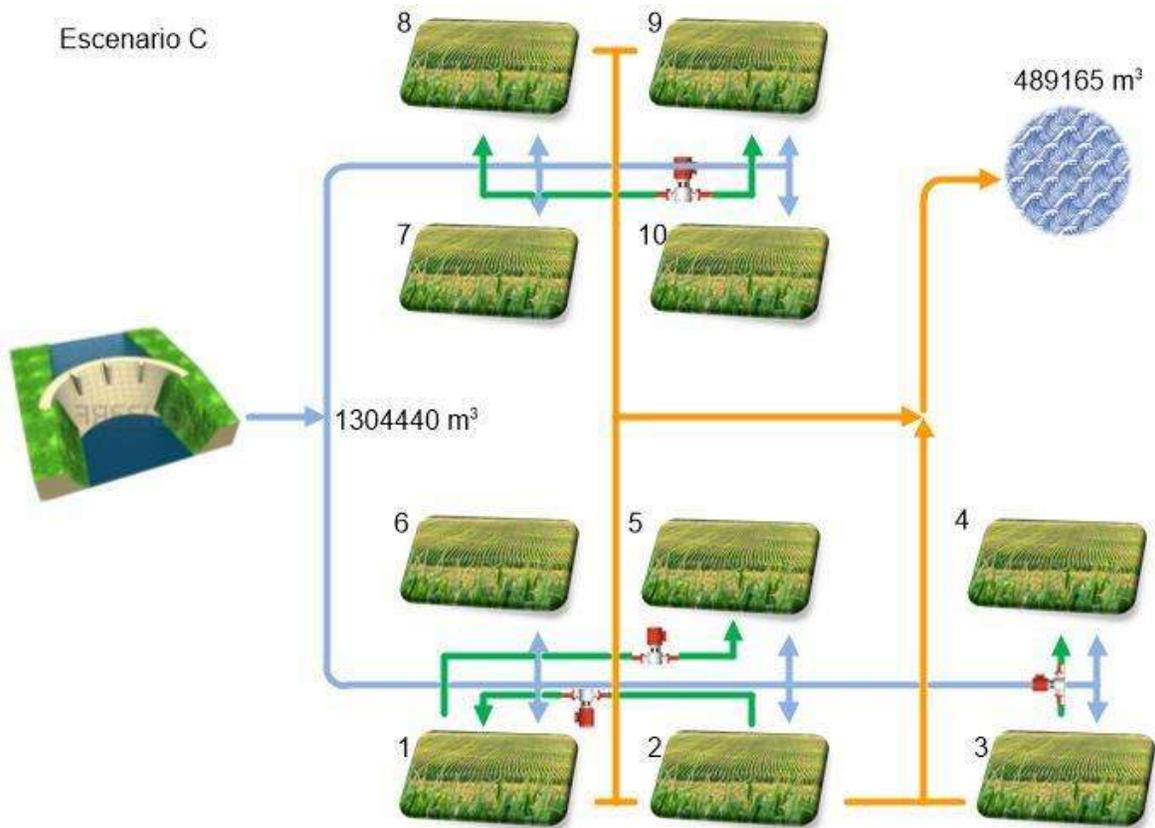


Figura 14. Esquema para el Escenario C

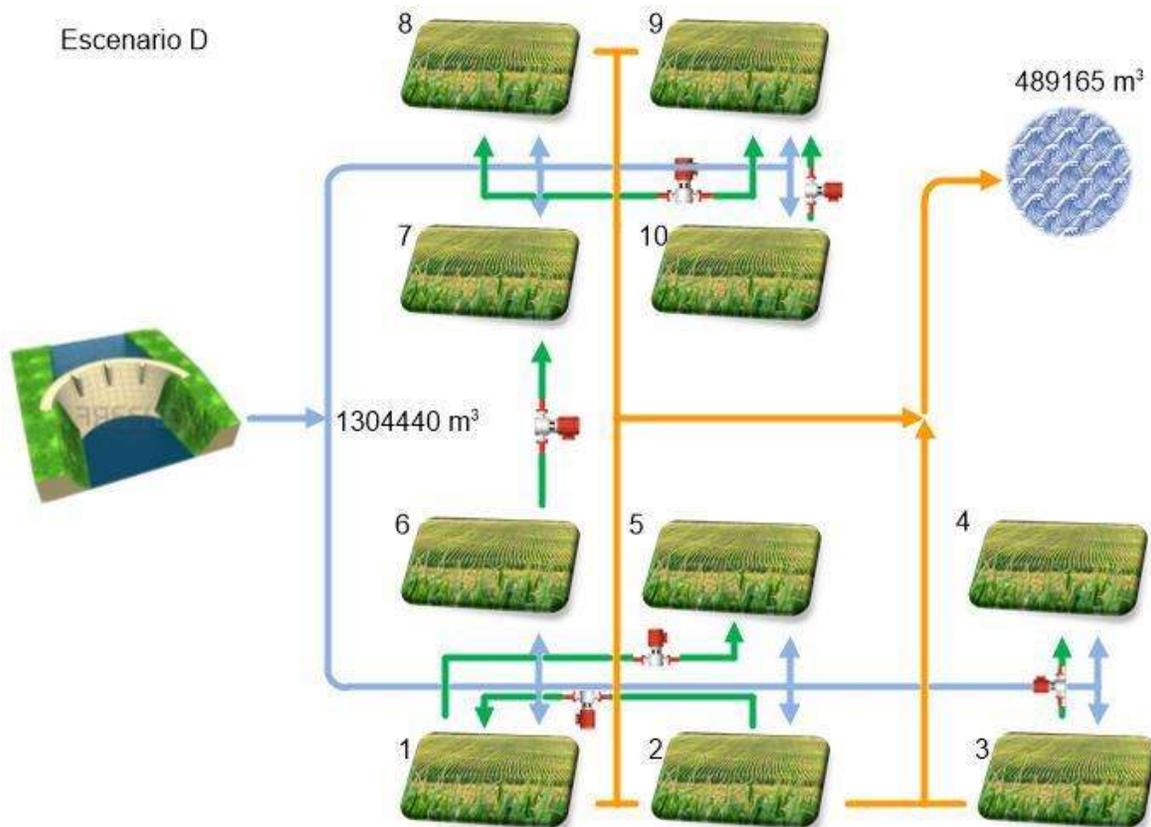


Figura 15. Esquema para el Escenario D

3.3.4 Escenario E

La red óptima para la integración de agua para el escenario E es presentada en la **Figura 16**. El escenario presentado representa la máxima recuperación de agua posible, la cual es alrededor de 40%, para la integración de ésta solo se utilizan bombas y tuberías (la utilización de tanques es exclusiva para las situaciones anormales explicadas en otro escenario). Como podemos observar en la **Figura 16**, existen 10 intercambios para poder cumplir con el ahorro del 40% del agua. Existen recirculaciones entre los cultivos 9 y 8, 4 y 3, 5 y 1, como se había comentado esto para el aprovechamiento de la tubería ya existente, así como la bomba, también existen intercambios de cultivo del 7 al 8, 2 al 1, 6 al 7, 10 al 9 todo esto para lograr la integración deseada. Todos estos intercambios son

los que nos permiten el ahorro del 40% del agua con el mínimo costo total anual de 89,420 US\$, con un total de agua utilizada de 978,329 m³, Total de agua descargada 163,055 m³ y un total de agua recirculada de 652,218 m³, de la misma manera que en los escenarios anteriores todos estos datos son para todos los periodos de tiempo y los podemos encontrar en la **Tabla 4**. Si bien para este caso, el ahorro del 40% del agua implica un aumento de un poco más del 200% de costo total del riego, los beneficios ambientales pueden ser suficientes para considerar la integración como una opción.

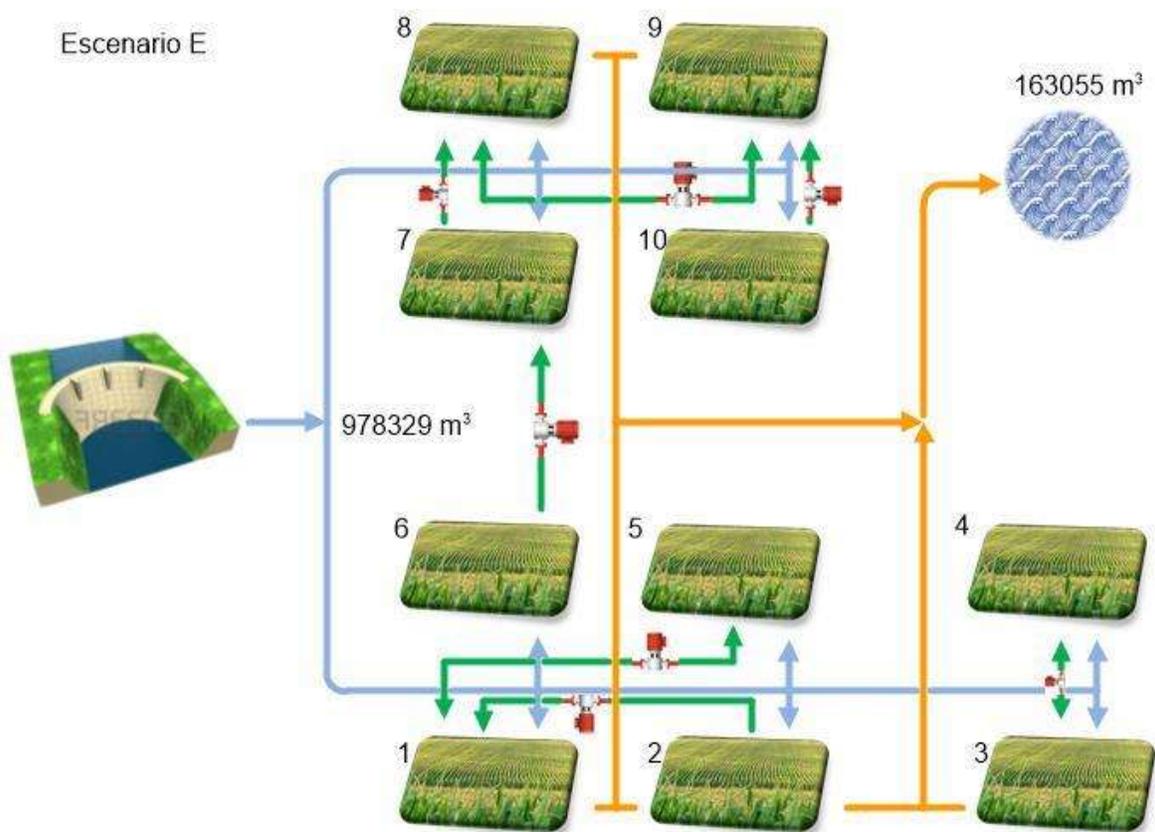


Figura 16. Esquema para el Escenario E

3.3.5 Escenario F

El escenario F es un caso especial, como se mencionó anteriormente, es una situación anormal en la cual por el tipo de entrada de agua es necesario el uso de tanques de almacenamiento para cumplir con la demanda de agua necesaria. Este escenario nos plantea una situación no tan alejada de la realidad, respecto a la escasez de agua que existe actualmente. En este sentido, si observamos la **Figura 17** podemos notar que existe un tanque de almacenamiento, en este caso exclusivamente para el cultivo 9, cuando el agua fresca que no es utilizada en este cultivo es enviada hacia el tanque para ser almacenada y esta ser utilizada en tiempos posteriores. Por otra parte, podemos apreciar que si bien sólo se utiliza un tanque para este cultivo existen intercambios de masa en todos los cultivos, las recirculaciones las encontramos en los cultivos 4 y 3, 2 y 3, 1 y 5, así como intercambio entre cultivos del 7 al 8, 8 al 9, 10 al 8, 9 al 10, 6 al 4, y 4 al 5. Con estos intercambios de agua y el uso del tanque de almacenamiento es como se logra cumplir con un ahorro del 40% y una situación anormal la cual representa un costo de 128,905 US\$, un total de agua utilizada de 978,328 m³, con una descarga total del 163,054 m³, y la cantidad total de agua recirculada de 639,164 m³, todos estos datos son para todos los periodos de tiempo y los podemos observar en la **Tabla 4**.

Como pudo analizarse anteriormente, cuando se tiene suficiente agua para satisfacer las necesidades de irrigación de los cultivos en cada período, la justificación de la integración másica se sustenta más en aspectos ambientales (menor uso de recursos naturales y menor impacto adverso sobre reservorios naturales y mantos freáticos) y sociales (mayor disponibilidad de agua para consumo humano y otras actividades económicas), que en aspectos económicos, ya que realmente no existe una disminución en el costo total si no un incremento. Sin embargo, como es conocido la cantidad de agua disponible para la agricultura no es ilimitada y en muchas ocasiones tal disponibilidad determina tanto la

superficie a sembrar como el rendimiento de los cultivos. Podemos observar los resultados más relevantes en la **Tabla 4**.

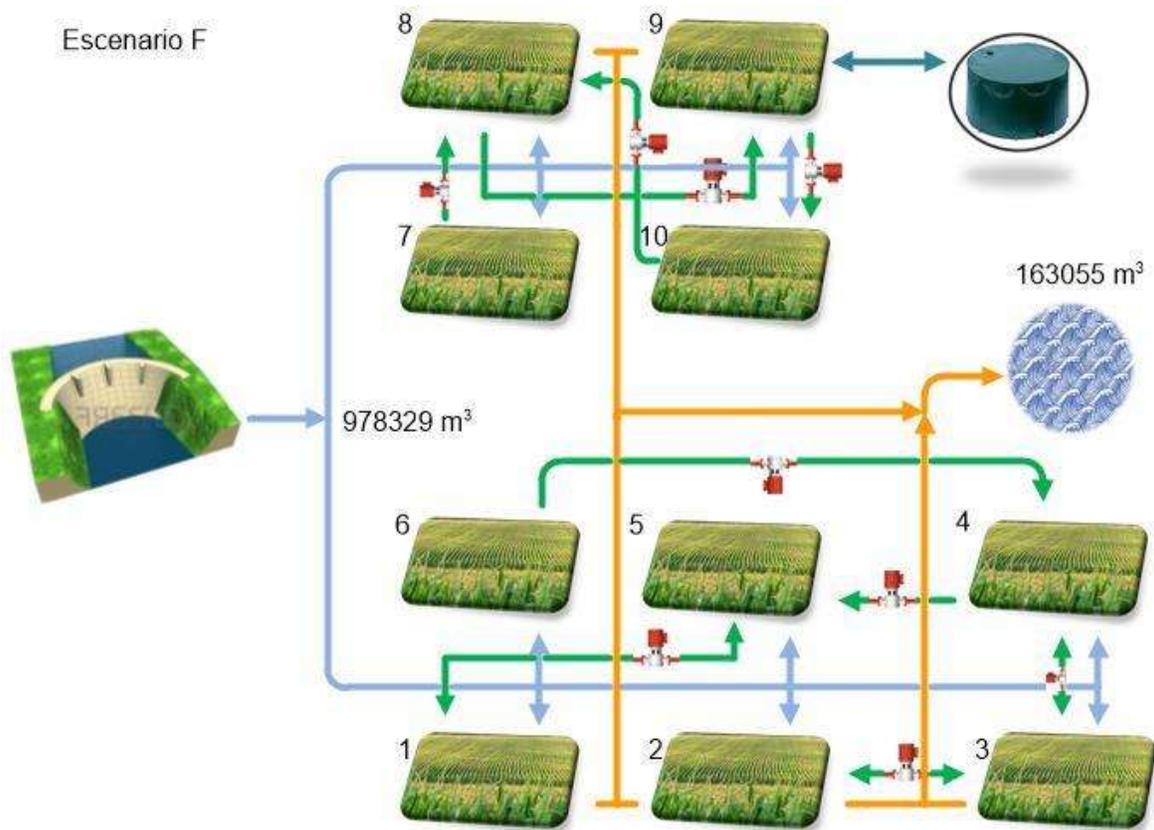


Figura 17. Esquema para el Escenario F

Tabla 4 Resultados para todos los escenarios

Escenarios	A	B	C	D	E	F
Costo Total Anual (US\$/año)	27781	43069	58600	73889	89420	128905
Costo de Bombas (US\$/año)	-	17856	35869	53726	71739	83279
Costo de Tuberías (US\$/año)	-	305	493	697	987	1179
Costo de Tanques (US\$/año)	-	-	-	-	-	27553
Costo de Agua Fresca (m ³)	27781	24947	22175	19403	16631	16631
Total de Agua Utilizada (m ³)	1630548	1467495	1304440	1141384	978329	978328
Total de Agua Descargada (m ³)	815273	652220	489165	326110	163055	163054
Total de Agua Recirculada (m ³)	-	163053	326108	489163	652218	639164
Tiempo de computo (seg)	0.01	0.6	9	11	20	31

3.4 Análisis del proceso bajo incertidumbre

3.4.1 Incertidumbre aplicada en el agua

Para poder conocer el sistema más a fondo, se propuso variar la entrada de agua en el sistema con una distribución normal y una desviación estándar del 20%. Esto se justifica debido a que del agua total concesionada en un módulo de riego se encuentra sujeta a disponibilidad de la misma sobre todo en los riegos posteriores al inicio de la temporada. Tener una variabilidad en la entrada al sistema significa que tendremos múltiples eventos de respuesta para los cuales cada uno de estos eventos tendrá sus propios resultados para la función objetivo y su propia red de agua.

Se propuso tener 100 eventos si bien la elección de la cantidad de eventos es un número arbitrario se considera que 100 es una buena cantidad de eventos con los cuales podremos observar la variabilidad del sistema y poder conocer completamente su comportamiento. Los escenarios fueron generados en la misma plataforma donde se codificó el modelo (GAMS) obteniendo así 100 valores para el parámetro de la cantidad agua total que entra en los cultivos.

Después de resolver el modelo con las adaptaciones necesarias para este tipo de variabilidad se obtuvieron las siguientes gráficas.

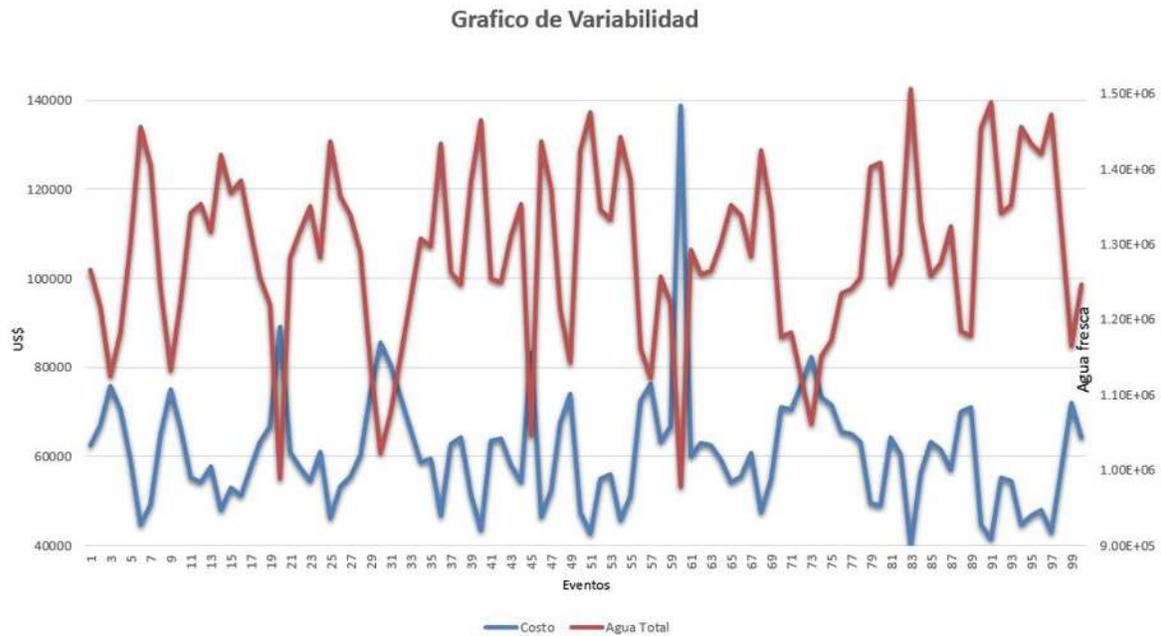


Figura 18. Grafica de variabilidad para los 100 eventos

El grafico de variabilidad (**Figura 18**) (donde el costo total anual se encuentra en líneas de color azul y el agua total utilizada de color rojo) expone la existencia de una relación directamente proporcional con el costo total anual y el agua total utilizada, donde si queremos utilizar una menor cantidad de agua el proceso esto se verá directamente reflejado en el costo del mismo. Esto es claro desde el punto de vista de que estamos usando menos agua, lo cual significa que estamos usando una mayor integración en el proceso (intercambio de agua entre cultivo y cultivo). Si observamos la gráfica a detalle podemos observar que el escenario 60 presenta un costo muy elevado, el cual se sale totalmente de la variabilidad presentada en los 100 eventos y por otro lado este mismo evento utiliza una cantidad de agua muy parecida al evento 19 después de revisar este escenario, en particular la razón que el costo fuera tan elevado es debido a que variamos la cantidad de agua que entra en cada uno de los tiempos. La entrada de agua en uno de los tiempos para este escenario es muy pequeña a comparación de los tiempos anteriores esto conlleva que para poder cumplir con la demanda de

agua necesaria se almacena agua de los tiempos anterior y así cumple con el agua requerida, esto produce que el costo total del proceso se eleve de gran manera en comparación de todos los demás eventos.

En la siguiente grafica tenemos la misma cantidad de escenarios, pero en este caso los eventos se encuentran acomodados de menor a mayor respecto a costo total del proceso. Lo que podemos apreciar en esta grafica es que en donde se tocan las dos líneas tenemos la mejor relación de costo con un mejor uso del agua. Entre más alejadas se encuentran las líneas de costo y del agua total utilizada se puede observar un comportamiento económicamente más favorable, representando de igual manera el punto menos amigable respecto el ambiente. El acercamiento de las líneas representa la integración de agua en el sistema, lo cual lleva a un incremento en el costo total del proceso y a su vez un uso menor de agua con respecto a los eventos con menor costo.

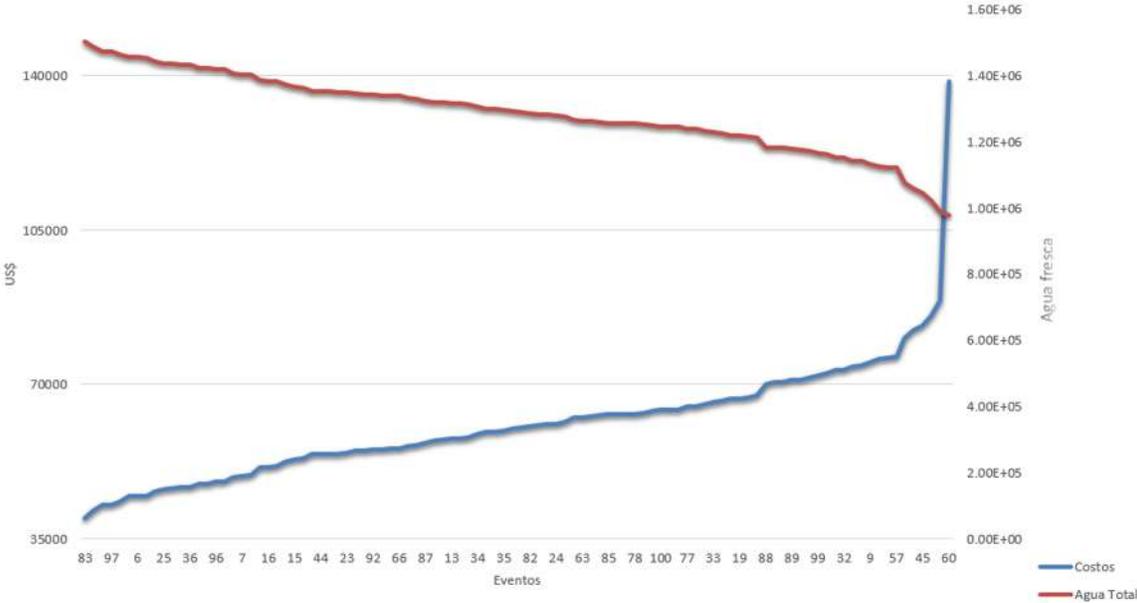


Figura 19. Eventos acomodados del menor al mayor respecto al costo

3.4.2 Incertidumbre aplicada en el costo del agua

De la misma manera que cuando aplicamos la incertidumbre en la entrada de agua se propuso la variabilidad en el costo del agua con una distribución normal y un intervalo de confianza del 20% para este caso. Se resolvieron 100 eventos para representar la variabilidad del problema y observar su comportamiento. Cada uno de los eventos es independiente del anterior, cada uno contara con su propia distribución de red de agua y función objetivo. Los escenarios fueron generados y resueltos en la plataforma GAMS.

La variabilidad en el costo del agua fresca es justificable debido a que la escasez de esta misma hará que el precio aumente en años futuros, en la actualidad uno de los mayores problemas es poder suplir a todos los usuarios de agua fresca y cada vez son más los usuarios solicitando este servicio y la cantidad de agua es un servicio que no se puede asegurar debido a que depende de la disponibilidad y precipitación de la misma. México es uno de los países donde el costo del agua es mínimo, si el costo del agua fuera mayor haría que el aplicar este tipo de metodologías para el reciclaje del agua fuera más atractivas.

Se resolvió el modelo con la incertidumbre aplicada al costo del agua para el escenario A y el escenario E. Enfocándonos en las **Figuras 20, 21, 22, 23**, para los dos escenarios podemos observar que la variabilidad es muy parecida esto porque el costo afecta directamente la función objetivo y como es presentado al cambiar uno el otro responde de la misma manera. El punto de realizarlo para los dos escenarios es poder comprobar que la variabilidad sigue permaneciendo ya sea el escenario sin integración o con integración. Si la variabilidad no cambia en los dos escenarios quiere decir que el precio del agua no influye de gran manera en la función objetivo como para alterar las configuraciones existentes o si se analiza de otra manera quiere decir que no variamos lo suficiente el precio del agua como para afectar las configuraciones de los escenarios A y E.

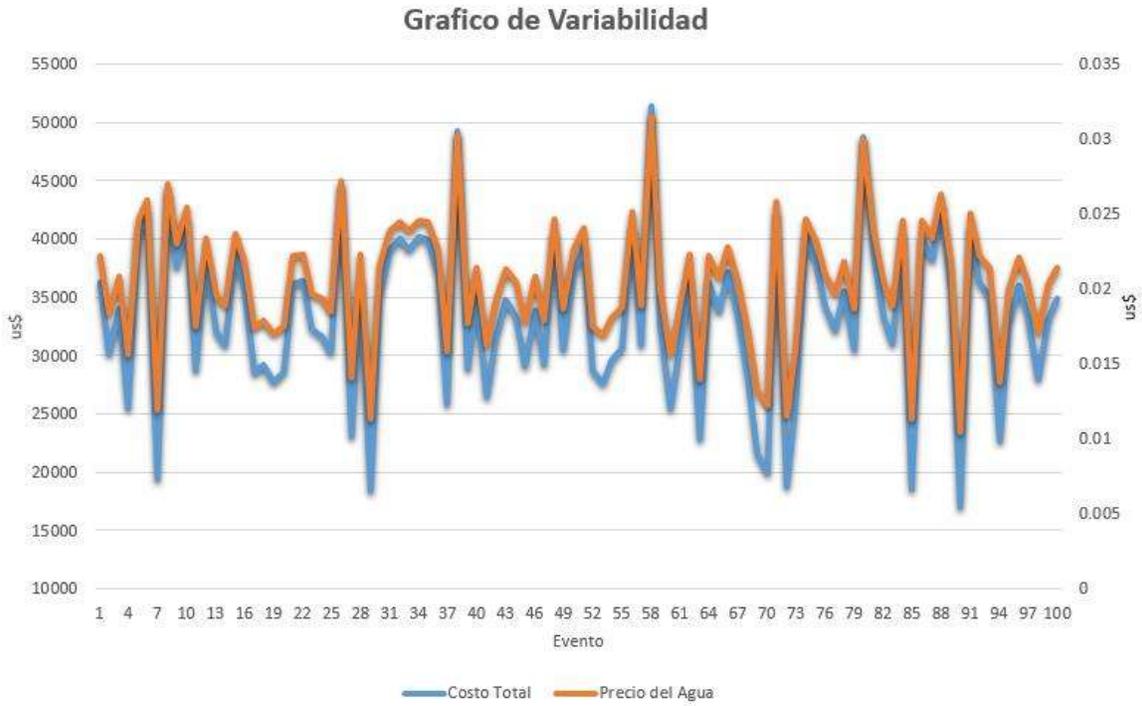


Figura 20. Grafica de Variabilidad para el escenario A

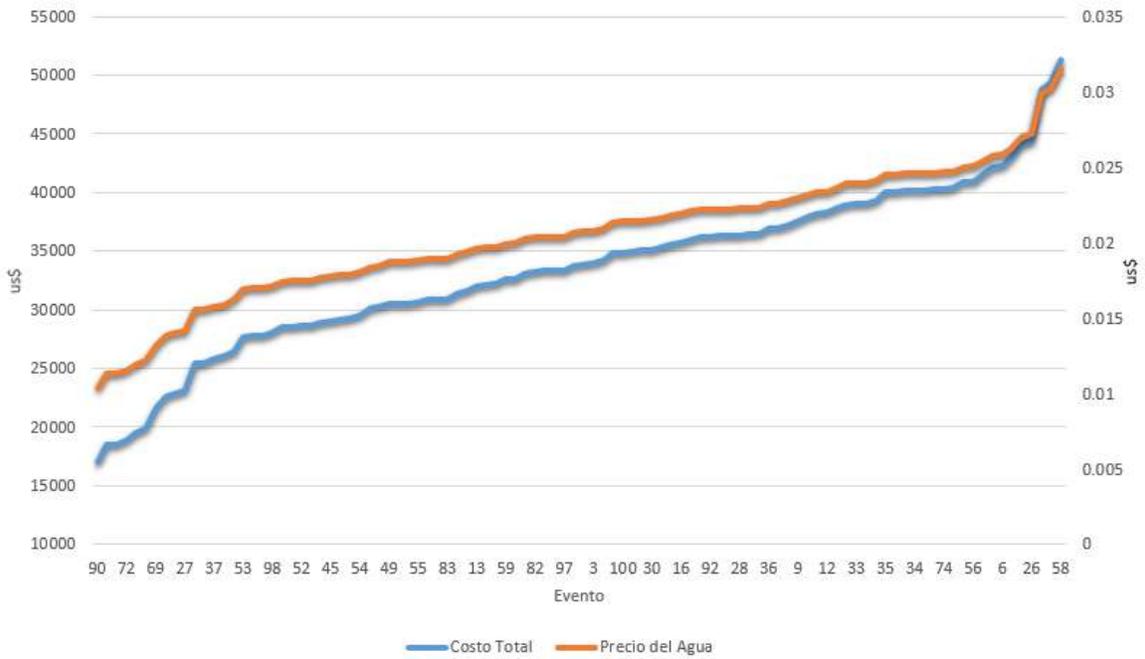


Figura 21. Eventos en lista para el escenario A

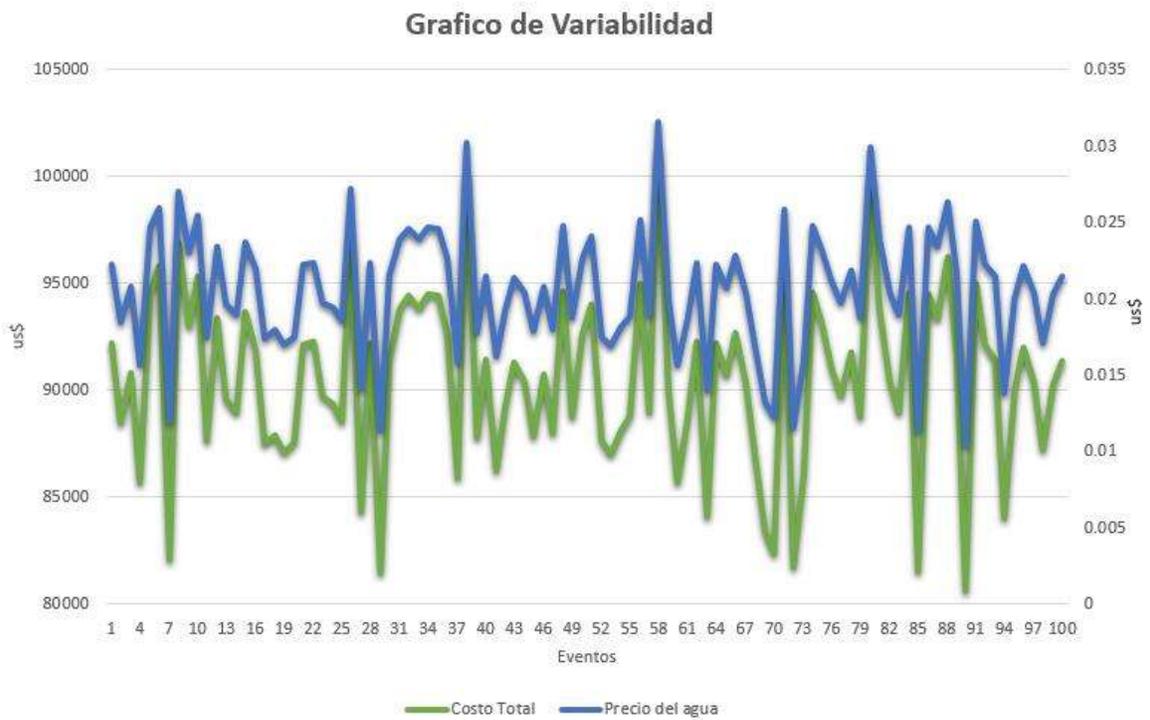


Figura 22. Grafica de Variabilidad para el escenario E

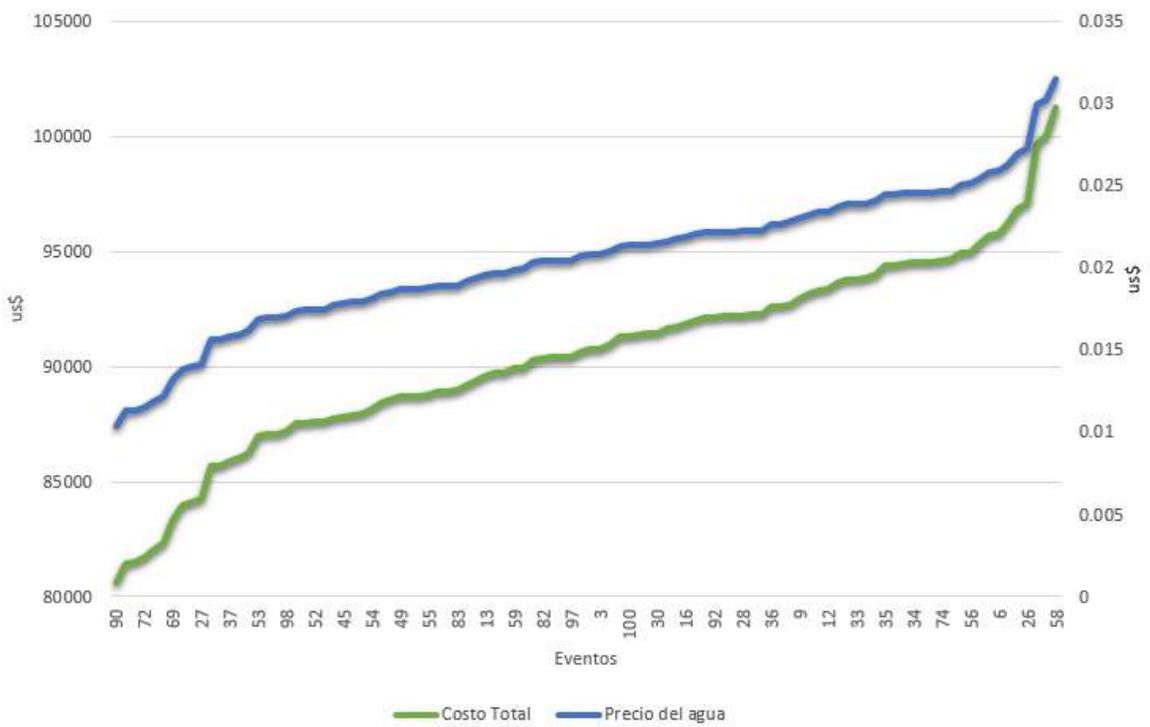


Figura 23. Eventos en lista para el escenario E

Como pudo analizarse anteriormente, aplicando incertidumbre nos pudimos dar cuenta que el agua se encuentra ligada fuertemente al costo de la irrigación y de la configuración de la misma. En cambio el precio del agua es una variable que si bien afecta directamente al costo del proceso en si con la variabilidad presentada no cambia las configuraciones obtenidas. Para que el precio del agua influya no solo en el costo directamente sino también en las redes de riego necesitaríamos aumentar el precio del agua 8 veces para obtener cambios en las configuraciones.

4 CONCLUSIONES

- ❖ La agricultura es una actividad con gran potencial para la implementación de redes de agua esto porque los sistemas actuales y las metodologías empleadas para el riego son ineficaces e ineficientes dando así gran oportunidad a la integración másica de agua.
- ❖ Cuando sólo se considera la adición de sistemas de bombeo en las redes de agua, no representan un gran aumento en los costos y en cambio estos pueden reducir en buena medida la cantidad de agua fresca utilizada.
- ❖ Para la implementación de este tipo de sistemas se requerirían diferentes apoyos gubernamentales, con los cuales se pudieran financiar los costos de bombeo y costos de almacenamiento si es que así se requirieran
- ❖ Hay que recordar que actualmente existe el gran problema en el cual se plantan más cultivos de los que se pueden satisfacer. Esto conlleva a bajas producciones, reducción y explotación de los mantos acuíferos y problemas sociales por el recurso. Implementar los sistemas de redes de agua podría llevar a una mayor estabilidad de recurso hídrico y poder realmente satisfacer las necesidades actuales del mismo
- ❖ El considerar la incertidumbre en el proceso nos permitió conocer completamente su comportamiento respecto al agua entrante y al costo del agua fresca. Lo cual nos permite conocer la variabilidad del problema en si esto nos sirve si en caso de que tuviéramos que tomar decisiones pudiéramos elegir la más acertada en términos económicos y en términos de disponibilidad de agua.

5 REFERENCIAS

- Anderson, J. (2003). The environmental benefits of water recycling and reuse. *Water Supply*, 3 (1): 1-10.
- Belaqziz, S., Mangiarotti, S., Page, M.L., Shabba, S., Er-Raki, S., Agouti, T., Drapeau, L., Kharrou, M., Adnani, M.E., Jarlan, L. (2014). Irrigation of classical gravity network based on the covariance matrix adaptation evolutionary strategy algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 102: 64-72.
- Bin, P., Yun-Xin, Z., Weib, G., Sujuanb, G. (2012). Optimal allocation model of reclaimed water reuse. *Procedia Engineering*, 28: 763-766.
- Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeraus, A. (2014). GAMS User's Guide. The Scientific Press, USA.
- Burke, S., M. Mulligan, Thornes, J.B. (1999). Optimal irrigation efficiency for maximum plant productivity and minimum water loss. *Agricultural Water Management*, 40(2-3): 377-391.
- CONAGUA. Reúso de aguas tratadas. 2012.
- Chew, I.M.L.; Foo, D.C.Y.; Ng, D.K.S. (2007). Targeting for plant-wide water integration. In: Joint Symposium for Chemical and Metallurgical Engineering, Pretoria, South Africa.
- Chew, I.M.L.; Tan, R.; Ng, D.K.S.; Foo, D.C.Y.; Majozi, T.; Gouws, J. (2008). Synthesis of direct and indirect interplant water network. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47 (23) 9485-9496.
- Chew, I.M.L.; Foo, D.C.Y. (2009). Automated targeting for inter-plant water integration. *Chemical Engineering Journal*, 153 (1-3) 23-36.
- Chew, I.M.L.; Foo, D.C.Y.; Ng, D.K.S.; Tan, R.R. (2010a). Flowrate targeting for interplant resource conservation network. Part 1: Unassisted Integration Scheme. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49 (14) 6439-6455.

-
- Chew IML, Foo DCY, Tan RR (2010b) Flowrate targeting algorithm for interplant resource conservation network. Part 2: assisted integration scheme. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 49(14):6456–6468.
 - Crop and drops – FAO 2002
 - Foo, D.C.Y., 2008. Flowrate targeting for threshold problems and plant-wide integration for water network synthesis. *Journal of Environmental Management*, 88 (2) 253-274.
 - Garg, N.K., Dadhich, S.M. (2014). Integrated non-linear model for optimal cropping pattern and irrigation scheduling under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 140: 1-13.
 - H. Zhu, G.H. Huang, SLFP: a stochastic linear fractional programming approach for sustainable waste management, *Waste Manage.* 31 (2011) 2612–2619.
 - Izquier, P. Carrion, J.M. Tarjuelo, M.A. Moreno, (2015). Optimal reservoir capacity for centre pivot irrigation water supply: Maize cultivation in Spain. *Biosystems Engineering*, 135: 61 – 72.
 - Jones, M.P., Hunt W.F. (2010). Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. *Resources, Conservation and Recycling*. 54, 623-629.
 - Karuppiah, R.; Grossmann I.E. (2006). Global optimization for the synthesis of integrated water systems in chemical processes. *Computers and Chemical Engineering*, 30 (4) 650-673.
 - Lazarova, V.; Bahri, A. (2000). Water reuse for irrigation: Agriculture, Landscapes, and Turf Grass. *CRC PRESS*.
 - Liao, Z.W.; Wu J.T.; Jiang B.B.; Wang J.D.; Yang Y.R. (2007). Design methodology for flexible multiple plant water networks. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 46 (14) 4954-4963.
 - Lim, S.R.; Park, J.M. (2010). Interfactory and intrafactory water network system to remodel a conventional industrial park to a green eco-industrial park. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49 (3), 1351-1358
 - Lovelady, E.M.; El-Halwagi, M.M.; Krishnagopalan, G.A. (2007). An

integrated approach to the optimization of water usage and discharge in pulp and paper plants. *International Journal of Environment and Pollution*, 29 (1-3) 274-307.

- Lovelady, E.M.; El-Halwagi, M.M. (2009). Design and integration of eco-industrial parks for managing water resources. *Environmental Progress Sustainable Energy*, 28 (2) 265–272.
- Lowe, E.A. (1997). Creating by-product resource exchanges: Strategies for eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production*, 5 (1-2), 57-65.
- Mariano j. Savelski, Miguel J. Bagajewicz, (2000). On the optimality condition of water utilization systems in process plants with single contaminants. *Chemical Engineering Science*, 55: 5035 – 5048.
- Mo li, Ping Guo, (2014). A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties. *Applied Mathematical Modelling*, 38: 4897 – 4911.
- Bagajewicz, M. (2000). A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants. *Computers and Chemical Engineering*, 24: 9 – 10.
- Moradi-Jalal, M., Bozorg, O.B., Karney, B.W., Mariño, M.A. (2007). Reservoir operation in assigning optimal multi-crop irrigation areas. *Agricultural Water Management*, 90(1-2): 149-159.
- Nilofar Asim, Zeynab Emdadi, Masita Mohammad, M.A. Yarmo, K. Sopian, Agricultural solid wastes for Green desiccant applications: an overview of research achievements, opportunities and perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 53: 501 – 529.
- OECD (2013). *OECD Compendium of Agri-environmental Indicators*, OECD Publishing, doi:10.1787/9789264186217.
- Olesen, S.G.; Polley, G.T. (1996). Dealing with plant geography and piping constraints in water network design. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, 74 (B4) 273-276.
- Rubio-Castro E.; Ponce-Ortega J.M.; Serna-González M.; Jiménez-Gutiérrez A.; El-Halwagi, M.M. (2011). A global optimal formulation for the

-
- water integration in eco-industrial parks considering multiple pollutants. *Computers and Chemical Engineering*, 35 (8): 1558-1574.
- Rubio-Castro E, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi MM, Pham, V. (2012). Global optimization in property-based interplant water integration. *AIChE Journal*, 59 (3) 813-833.
 - Shangguan, Z., Shao, M., Horton, R., Qin, L., Lei, T., Lin, Q.L. (2002). A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications. *Agricultural Water Management*, 52 (2): 139-154.
 - Songhao, S., Mao, X. (2006). Application of a simulation based optimization model for winter wheat irrigation scheduling in North China. *Agricultural Water Management*. 85(2006) 314–322.
 - Sotelo-Pichardo, C., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M., Frausto-Hernández, S. (2011). Optimal retrofit of water conservation networks. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1560–1581.
 - Kurupiah, R., Grossmann, I.E. (2006). Global optimization for the synthesis of integrated water systems in chemical processes, *Computers and Chemical Engineering*, 30: 650-673.
 - Reza Roozbahani, Sergei Schreider, Babak Abbasi, (2014). Optimal water allocation through a multi-objective compromise between environmental, social, and economic preferences. *Environmental Modelling Software*, 138: 51 – 82.
 - Theocharis, M.E., Tzimopoulos, C.D., Yannopoulos, S.I., Sakellariou-Makrantonaki, M.A. (2006). Design of optimal irrigation networks. *Irrigation and Drainage*. 55 (1): 21–32.
 - Luo, Y., UAN, X. (2008). Global optimization for the synthesis of integrated water systems with particle swarm optimization algorithm, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 16: 11-15.
 - Vecchiotti, A., Lee, S., Grossmann, I.E. (2003). Modeling of discrete/continuous optimization problems characterization and formulation

of disjunctions and their relaxations. *Computers and Chemical Engineering*,
27 (3) 433-448.