



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“Nuevos esquemas de integración para el manejo
sustentable del agua a nivel macroscópico”**

Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería
Química

Presenta:

Esbeydi Villicaña García

Asesor:

Dr. José María Ponce Ortega

Diciembre 2016

Facultad de Ingeniería Química, Morelia, Michoacán, México

Contenido	
Resumen	3
Abstract	4
1. Introducción	5
2. Generalidades	5
3. Justificación	10
4. Planteamiento del problema	11
5. Objetivos e Hipótesis	12
6. Metodología	13
6.1 Modelo	13
6.2 Caso de estudio	28
7. Resultados	30
8. Conclusiones	41
9. Nomenclatura	42
10. Bibliografía	47
11. Apéndice A	52
12. Apéndice B	54

Índice de Figuras	
Figura 1. Distribución del agua en el mundo	6
Figura 2. Planteamiento del problema	10
Figura 3. Superestructura propuesta	12
Figura 4. Enfoque para desarrollar un modelo matemático	14
Figura 5. a) Localización de la región hidrológica; b) Lázaro Cárdenas	28
Figura 6. Soluciones óptimas Pareto para el caso de estudio	31
Figura 7. Solución escenario A	32
Figura 8. Solución escenario E	34
Figura 9. Solución escenario B	35
Figura 10. Solución escenario C	36
Figura 11. Solución escenario D	37

Índice de Tablas	
Tabla 1. Resultados para las diferentes soluciones Pareto para el caso de estudio	33
Tabla 2. Resultados de la distribución de los diferentes flujos de agua residual tratada para el caso de mínimo TAC	38
Tabla 3. Resultados de la distribución de los diferentes flujos de agua residual tratada para el caso de mínimo TFW	39
Tabla A1. Parámetros usados para el caso de estudio	51

Resumen

El agua es uno de los recursos más importantes en el mundo debido a que es esencial para la vida. Recientemente, se han reportado muchas estrategias con el propósito de mejorar su uso en los diferentes sectores (industrial, agricultura y doméstico), los cuales involucran opciones tales como recicló, reúso y regeneración. Sin embargo, lo que respecta al manejo del agua a nivel macroscópico ha tenido menor atención. Se han considerado una infinidad de usos de agua a nivel macroscópico con diversas fuentes de agua fresca para satisfacer dicha demanda, donde además puede ser implementado el recicló, reúso y la regeneración. Así mismo, en esta Tesis se propone una nueva estrategia de optimización para el apropiado uso de agua a nivel macroscópico, el cual involucra el recicló, reúso y regeneración de agua, así como el impacto que existe en los alrededores de la cuenca hidrológica. Se analiza un caso de estudio de la parte central de México, y los resultados muestran que es posible reducir el consumo de agua fresca en un 21% con una inversión de US \$686,510,000/año

Palabras clave: Manejo de agua; Recolección de agua pluvial; Optimización; Recicló; Reúso.

Abstract

Water is one of the most important resources in the world because it is essential for the life. Recently, several strategies for the proper use of water in different sectors (industrial, agricultural and domestic) have been ported, which involve options such as recycling, reusing and regeneration. However, the overall water management in a macroscopic level has received lower attention. In the macroscopic level, numerous water uses are involved and several sources of fresh water can interact to satisfy the fresh water demands, where also recycling, reusing and regeneration strategies can be implemented. Therefore, in this paper is proposed a new optimization formulation for the proper use of water in a macroscopic level involving water recycling, reusing and regeneration as well as accounting for the impact in the surrounding watershed. A case study from the central-west part of Mexico was analyzed, and the results show that is possible to reduce the fresh water consumption by 21% with an investment of US \$686,510,000/y.

Keywords: Water management; Rainwater harvesting; Optimization; Recycling; Reuse.

1. Introducción

El correcto manejo del agua resulta ser uno de los problemas recientes más graves que se han presentado puesto que no existe una óptima distribución de dicho recurso en el planeta y desafortunadamente no todos los usuarios pueden contar con la cantidad suficiente para satisfacer sus necesidades. Es por ello que se buscan formas de aprovechar de mejor manera el agua sin comprometer las fuentes naturales por medio de técnicas capaces de utilizarla, como son: recolección de agua pluvial y reutilización de agua. Por otro lado, se pretende que la descarga de aguas contaminadas hacia una cuenca hidrológica sea tratada y de esa forma se tengan en cuenta normas ambientales que aseguren el bajo disturbio que se generará en el ambiente.

2. Generalidades

El agua es una de los recursos más importantes para la vida humana, la cual es utilizada para actividades industriales, agrícolas y domésticas. Recientemente, alrededor del mundo se han observado severos problemas de escasez de agua debido a su intenso uso. La **Figura 1** muestra las intensas interacciones entre las actividades que involucran el uso del agua. En el pasado, el agua se consideraba como un recurso renovable porque pertenece a un ciclo, sin embargo, actualmente la situación ha cambiado debido a los problemas de contaminación. Aunque el planeta tenga aproximadamente 1400 millones de km³ de agua (SEMARNAT 2014), recientemente se ha observado una sobreexplotación en los cuerpos de agua fresca y eso ha promovido la escasez del agua. En el sector industrial, se han aplicado exitosamente el uso de redes de agua para recicló, reúso y regeneración. En este contexto, Foo (2009) presentó una extensa revisión de las técnicas basadas en el punto de pliegue para la síntesis de redes de agua en procesos continuos, haciendo notar que las técnicas basadas en el punto de pliegue representan la base para la integración del agua en los procesos industriales. Gows et al. (2010) presentaron una revisión para la minimización del agua en la industria, la cual involucra procesos batch. Jezowski (2010) reportó una revisión respecto a las redes de agua industriales usando técnicas gráficas y de programación matemática. Las técnicas de programación matemáticas son capaces de dar mejores soluciones que otros enfoques. Ng et al. (2010) presentaron una optimización matemática para determinar el objetivo para el mínimo consumo de agua en los procesos industriales. Fu et al. (2012) desarrollaron un

enfoque para el consumo de agua en diferentes procesos. Estos enfoques reportados previamente han sido de gran utilidad debido a las reducciones significantes del consumo de agua en procesos industriales; es por ello que ha motivado a la implementación de rigurosas optimizaciones matemáticas para la síntesis de redes de agua en diferentes actividades. En este contexto, Santos-Pereira et al. (2002) discuten algunos de los problemas relacionados con el manejo del agua para la irrigación en cultivos, centrándose en el manejo de las políticas de gestión en situaciones bajo escasez de agua. Jhorar et al. (2009) propusieron un modelo para la distribución del agua para el riego en condiciones de baja precipitación. Agrofioti y Diamadopoulos (2012) mostraron que acoplando las plantas existentes de aguas residuales para incluir el tratamiento terciario podría ayudar a satisfacer hasta el 4.3% de las necesidades de riego en la isla de Creta. Adicionalmente, otros estudios han sido propuestos para la regeneración de agua. De esta forma, Hurimann (2011) reportó que el uso del agua regenerada en hogares tiene potencial para satisfacer algunas de las demandas principales para el riego. Zaneti et al. (2012) presentaron un estudio para el uso de agua regenerada en el lavado de vehículos. Al Khamisi et al. (2013) recomendaron el uso de agua regenerada para satisfacer los requerimientos de agua de riego.

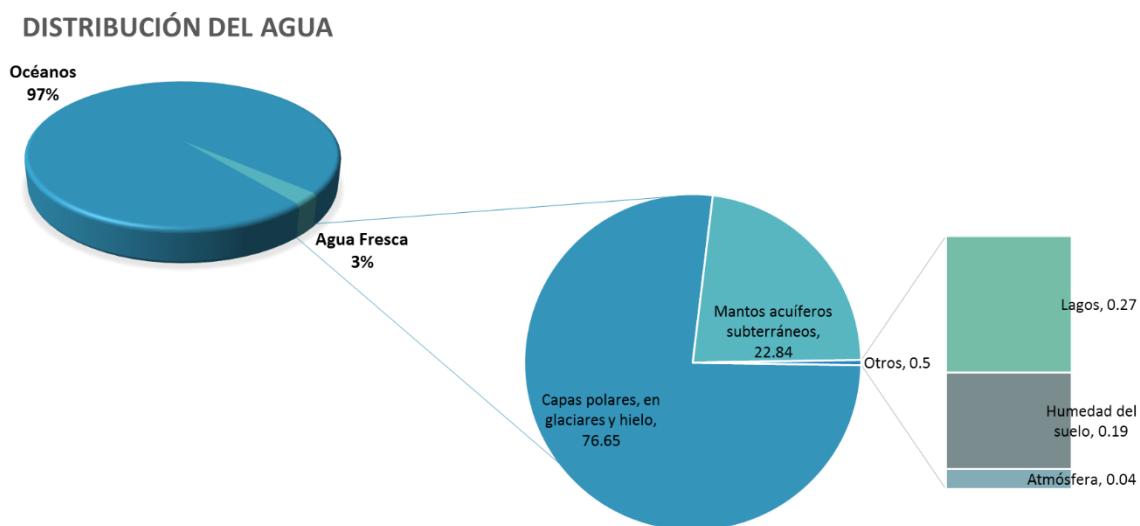


Figura 1. Distribución del agua en el mundo (CONAGUA 2012)

Recientemente algunas estrategias han sido propuestas para considerar el reúso del agua en las diferentes actividades humanas. Por ejemplo, Chilton et al. (1999) implementaron un análisis para la recolección de agua en sistemas instalados en centros comerciales. Appan (2000) propuso el uso de sistemas para la recolección de agua de lluvia en la Universidad Tecnológica Nanyang en Singapur; de igual forma Abdulla y Al-Shareef (2006) presentaron un análisis para el uso de los techos para la recolección de agua de lluvia. Cheng et al. (2006) presentaron un método de evaluación cuantitativa para la recolección de agua pluvial. Es por ello que la recolección de agua de lluvia ha sido explorada como una alternativa viable. En este contexto, Eroksuz y Rahman (2010) propusieron el uso de tanques para el agua de lluvia en edificios de unidades múltiples. Domènech y Saurí (2011) implementaron un estudio comparativo para el uso del agua de lluvia en edificios para una o varias familias. De esta forma, Domènech et al. (2012) estudiaron el uso de agua pluvial recolectada para el desarrollo de los países. Rahman et al. (2012) propusieron el uso de tanques para almacenar agua pluvial en casas que están separadas. Bocanegra-Martínez et al. (2014) presentaron una optimización para la captación y distribución de agua pluvial en hogares. García-Montoya et al. (2015a) propusieron un modelo matemático para la síntesis de redes de agua domestica involucrando agua gris que se recicla y después García-Montoya et al. (2015b) incorporaron la evaluación del impacto ambiental asociado a este enfoque. De esta misma manera, Rojas-Torres et al. (2014) reportaron un modelo matemático multi-periodo para la planificación óptima del almacenamiento y distribución de agua en un sistema macroscópico. Adicionalmente, para el manejo del agua proveniente de la agricultura, Raul et al. (2011) presentaron una simulación para mitigar el déficit del agua de riego en un sistema de cultivo de arroz considerando el agua de la tierra como una fuente alternativa sin comprometer dicho recurso. Siguiendo el mismo patrón, Arredondo-Ramírez et al. (2015) presentaron un enfoque para el diseño de las redes de agua proveniente de la agricultura involucrando el reciclaje, reúso y regeneración. Los enfoques anteriores han identificado que es posible reducir significativamente el consumo de agua fresca en diferentes actividades humanas a través de técnicas para la integración del agua.

Así mismo, muchas estrategias han sido reportadas para resolver el problema de la distribución del agua. En este contexto, Oliveira-Esquerre et al. (2011) propusieron un método para minimizar el uso de agua considerando el reúso de ésta misma e involucrando

información geológica e hidrogeológica. Nápoles-Rivera et al. (2013) presentaron un enfoque para el manejo sustentable del agua a nivel macroscópico. Se han reportado numerosos métodos para la síntesis de redes de agua de plantas que están cerca, basadas en reglas heurísticas. En relación a ello, Foo (2008) implementó una herramienta numérica para calcular la mínima cantidad de agua fresca en la integración de plantas que están cerca, y Rubio-Castro et al. (2010) reportaron un programa matemático con un enfoque global para resolver el mismo problema. Además, se han propuesto optimizaciones con enfoques multi-objetivo por Boix et al. (2012). También López-Díaz et al. (2015) presentaron un modelo matemático para la integración de agua en parques eco-industriales con el propósito de mitigar el impacto ambiental de los efluentes industriales que se descargan en las cuencas de agua. Zhang et al. (2013) presentaron un enfoque para la solución de un sistema macroscópico bajo incertidumbre usando agua regenerada como fuente alterna. Así mismo, Alnouri et al. (2014) propusieron una integración y acoplamiento de agua efectivos de corrientes disponibles usando una metodología con restricciones espaciales que utiliza las opciones de ruta más cortas. Sin embargo, muchos de los trabajos pasados no incluyen la interacción con los diferentes usuarios, el almacenamiento de agua y la disponibilidad de las fuentes naturales. Es por ello que Nápoles-Rivera et al. (2015) consideraron fuentes de agua alterna bajo parámetros inciertos para una programación multianual óptima de almacenamiento y distribución de agua. Es importante mencionar que los trabajos antes mencionados no consideran la interacción con los alrededores de la cuenca de agua y tampoco involucran múltiples ciudades.

Recientemente ha sido estudiado el adecuado manejo del agua en las cuencas. De esta forma, la técnica del análisis del flujo de material MFA (por sus siglas en inglés “*material flow analysis*”) ha sido usada para seguir la trayectoria de las especies químicas a través de las cuencas de agua. Es por ello que Baccini and Brunner (1992) desarrollaron el modelo MFA para analizar ecosistemas con actividades humanas que intercambian masa y energía con sus alrededores; siguiendo el mismo patrón, Lampert and Brunner (1999) propusieron el modelo MFA para seguir los principales nutrientes en el río Danubio. Sin embargo, Lovelady et al. (2009) reformularon el modelo MFA para determinar la máxima capacidad de descargas disponible que se hacen hacia una cuenca de agua para asegurar la sustentabilidad del mismo. Lira-Barragán et al. (2011) presentaron una optimización para la instalación adecuada para el manejo del agua en los alrededores de una cuenca de agua. Burgara-Montero et al. (2012)

propusieron una optimización con un enfoque para el diseño de sistemas de tratamiento que se distribuyen a lo largo de los diferentes efluentes que descargan hacia los ríos. Además, Martínez-Gómez et al. (2013) incorporaron los problemas de seguridad que están ligados a las descargas de corrientes de aguas residuales de las industrias durante la síntesis de redes de agua industrial. López-Villarreal et al. (2014) incluyeron un esquema de mercado para el intercambio de contaminantes en las descargas de agua.

Se debe hacer notar que los trabajos mencionados anteriormente no consideran la interacción simultánea con los alrededores de la cuenca de agua en la optimización para el uso del agua a nivel macroscópico (ver **Figura 2**). Esta interacción es muy importante porque existen muchos usos de agua y descargas de aguas residuales que interactúan con los alrededores de las cuencas de agua; es por eso, que se implementa el reciclaje, reúso y regeneración de agua así como las opciones para el almacenamiento y la incorporación de agua de lluvia que afectan la cuenca circundante. Por otra parte, estos aspectos también interactúan con otros usos y descargas, así como los fenómenos naturales que afectan drásticamente la cuenca y la disposición final de esta agua. Por lo tanto, este trabajo propone un programa matemático general para el manejo sustentable de agua a nivel macroscópico el cual considera los diferentes usos de agua (industrial, agrícola y doméstico) así como la incorporación del reúso, reciclaje y regeneración de agua pluvial que es captada, esto para determinar el efecto en los alrededores de las cuencas hidrológicas y en la disposición final. Es necesario destacar que el problema a tratar es muy complicado para formularlo usando el análisis de pliegue. También es considerada la evaluación ambiental en este trabajo por medio de las limitaciones de los contaminantes a través de la cuenca; además se utiliza un enfoque de periodo de tiempo de un año.

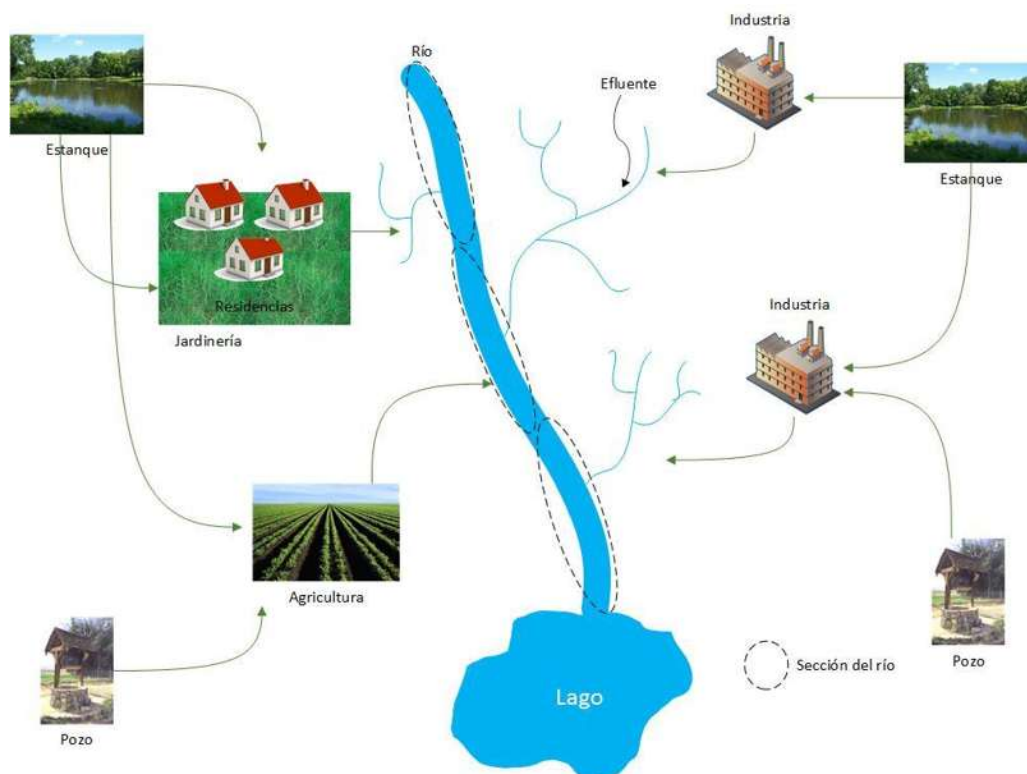


Figura 2. Planteamiento del problema.

3. Justificación

Es importante destacar, que las metodologías anteriormente reportadas no han considerado la interacción simultánea de los cuerpos de agua en la optimización del uso del agua a nivel macroscópico. Esta interacción es muy importante porque existen diversos usos de agua y descargas de agua contaminada hacia los cuerpos de agua que rodean una ciudad; además, la implementación del reciclaje, reúso y regeneración de agua, así como el almacenaje e incorporación de opciones de captación pluvial afectan las cuencas que la rodean. Dichos aspectos también interactúan con otros usos y descargas así como los fenómenos naturales afectan drásticamente un cuerpo de agua y la disposición final para esta agua. Además, este trabajo propone un modelo de programación matemática para proporcionar un manejo sustentable del agua a nivel macroscópico, el cual considera los diferentes usos (industria, agricultura, residencial y jardinería) así como las incorporaciones del reúso, reciclaje, regeneración y captación de agua pluvial para determinar el efecto de los cuerpos de agua que rodean una ciudad así como la disposición final del agua.

4. Planteamiento del problema

El problema que se aborda en este trabajo se describe a continuación. Para el uso apropiado del agua en un sistema macroscópico, con diferentes fuentes de agua fresca, las cuales incluyen estanques y pozos con diferentes cantidades de agua disponible y cambios de disponibilidad a lo largo del año. Además se consideran usuarios específicos con requerimientos de calidad y demanda de agua (por ejemplo, residencial, jardinería, industrial y agricultura), también se toman en cuenta los usos del agua y las descargas alrededor de las cuencas de agua, lo cual afecta puntos específicos en el río. Igualmente se consideran los fenómenos naturales como precipitación, evapotranspiración, filtración y las reacciones químicas y bioquímicas que se llevan a cabo en cada sección del río. Con toda esta información, el problema consiste en determinar la forma óptima de satisfacer las demandas residenciales, jardinería, agricultura e industriales considerando restricciones de sustentabilidad para los cuerpos de agua así como las cuencas. De esta forma, son consideradas muchas opciones para el reciclo, el reúso y la regeneración, adicionalmente se incorpora la opción de la recolección de agua de lluvia. Entonces, el problema consiste en determinar la red de agua óptima para un sistema macroscópico con el fin de satisfacer las demandas de agua a un costo mínimo y con el menor impacto ambiental. En la optimización son determinadas las unidades necesarias (tratamientos, almacenamientos y tubería) así como los flujos involucrados. El modelo de programación matemática propuesto es general, el cual está basado en la superestructura propuesta de la **Figura 3**, y esto se puede aplicar a diferentes casos de estudio con los datos correspondientes. Los principales beneficios para el enfoque que se presenta son que incluye la interacción entre los diferentes usos del agua y descargas que se llevan a cabo en los alrededores de la cuenca de agua y el modelo permite determinar la cantidad de agua necesaria antes del diseño detallado. Los mayores inconvenientes del modelo que se presenta es que es un enfoque en estado estable y que no tiene en cuenta la incertidumbre para las diferentes fuentes de agua (es decir, lluvia) y los usuarios. Para un trabajo futuro, se recomienda proponer una optimización con un enfoque estocástico adecuado para el manejo de la incertidumbre involucrada en el problema. La siguiente sección presenta el modelo matemático, y la aplicación de un caso de estudio es presentada en la sección de Caso de Estudio, donde los datos utilizados son reportados o referenciados.

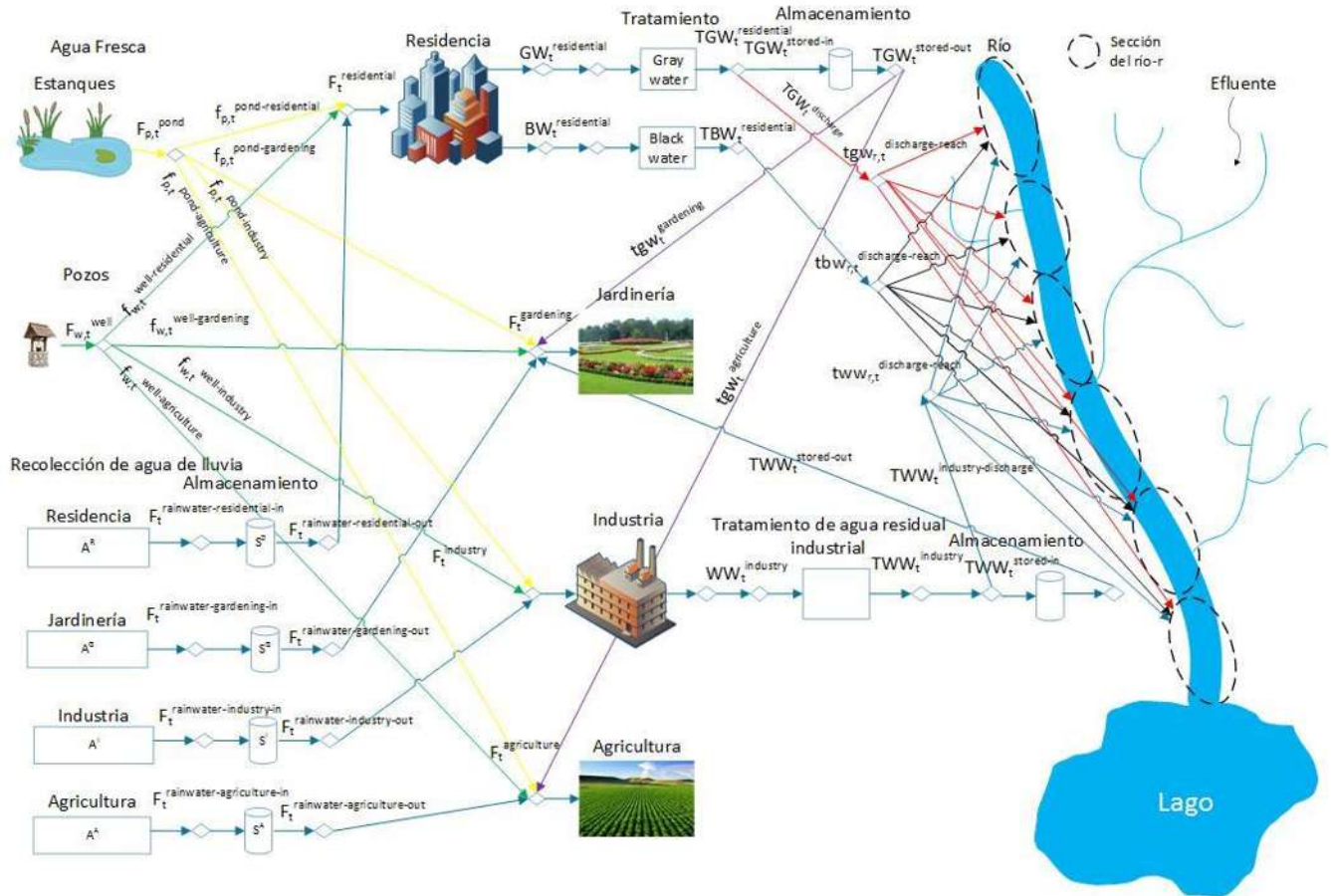


Figura 3. Superestructura propuesta

5. Objetivos e Hipótesis

Objetivo general

Desarrollar y aplicar un modelo de optimización multi-objetivo a nivel macroscópico que realice un reúso óptimo de las diferentes corrientes que están implicadas (aguas grises, negras e industriales tratadas), así como de todos los usuarios involucrados en el sistema incluyendo la consideración de la trayectoria de algunos contaminantes dentro del río en el que se descargan los flujos de agua negra, gris y proveniente de la industria, las cuales son previamente tratadas.

Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo de optimización multi-objetivo considerando la minimización del costo total anual y la minimización del uso de agua fresca.

- Aplicación del modelo propuesto a un caso de estudio en una de las ciudades por las que pasa el río Balsas en el estado de Michoacán para observar el comportamiento del mismo dirigido a la toma de decisiones.

Hipótesis

Con un modelo matemático para el manejo adecuado del agua a nivel macroscópico se podrán tomar mejores decisiones para la correcta planificación y distribución del agua a nivel macroscópico de acuerdo a las necesidades de los usuarios involucrados y tomando en cuenta los efectos en la cuenca hidrológica circundante.

6. Metodología

6.1 Modelo

Esta sección presenta el modelo propuesto, el cual es general y puede ser aplicado a diferentes casos de estudio. Primeramente es descrito el uso de índices, donde t representa los periodos de tiempo en años, p es cualquier estanque disponible, w es cualquier pozo disponible, r representa las secciones en las que se divide el río, c representa los contaminantes del río, $trib$ representa los efluentes hacia el río. La descripción completa de los símbolos utilizados es presentada en la sección de nomenclatura. El modelo que a continuación se muestra es una representación similar a las típicas redes industriales fuente-sumidero; las principales restricciones son asociadas al uso de los datos que caracterizan las diferentes fuentes de agua y sumideros, también en este caso hay diversas fuentes de agua (agua de lluvia recolectada y agua recirculada) y varias opciones de reciclaje que están limitadas debido a la calidad del agua necesaria en los sumideros, otro punto importante es el de caracterizar la cuenca de agua y modelarlo a través de un conjunto de secciones en las cuales se dividirá la cuenca. Finalmente, los fenómenos naturales deben ser incluidos en el modelo. La **Figura 4** muestra una descripción general para llevar a cabo la formulación matemática que se requiere para abordar el problema. Esa figura indica que primero es necesario identificar las principales fuentes de agua y sumideros. Después, deben ser establecidas las tecnologías de tratamiento disponibles. Y los alrededores de la cuenca deben ser identificados y caracterizados para determinar las secciones del río que son necesarias. Luego, se requieren balances de agua para las fuentes de agua, los sumideros, las tecnologías de tratamiento así como para cada una de las secciones de la cuenca. Con esta información, las

unidades potenciales se colocan en la superestructura para determinar su existencia a través de variables binarias. Después, la función objetivo es determinada y el problema es codificado y resuelto. A continuación, la propuesta de la formulación del modelo es indicado como sigue.

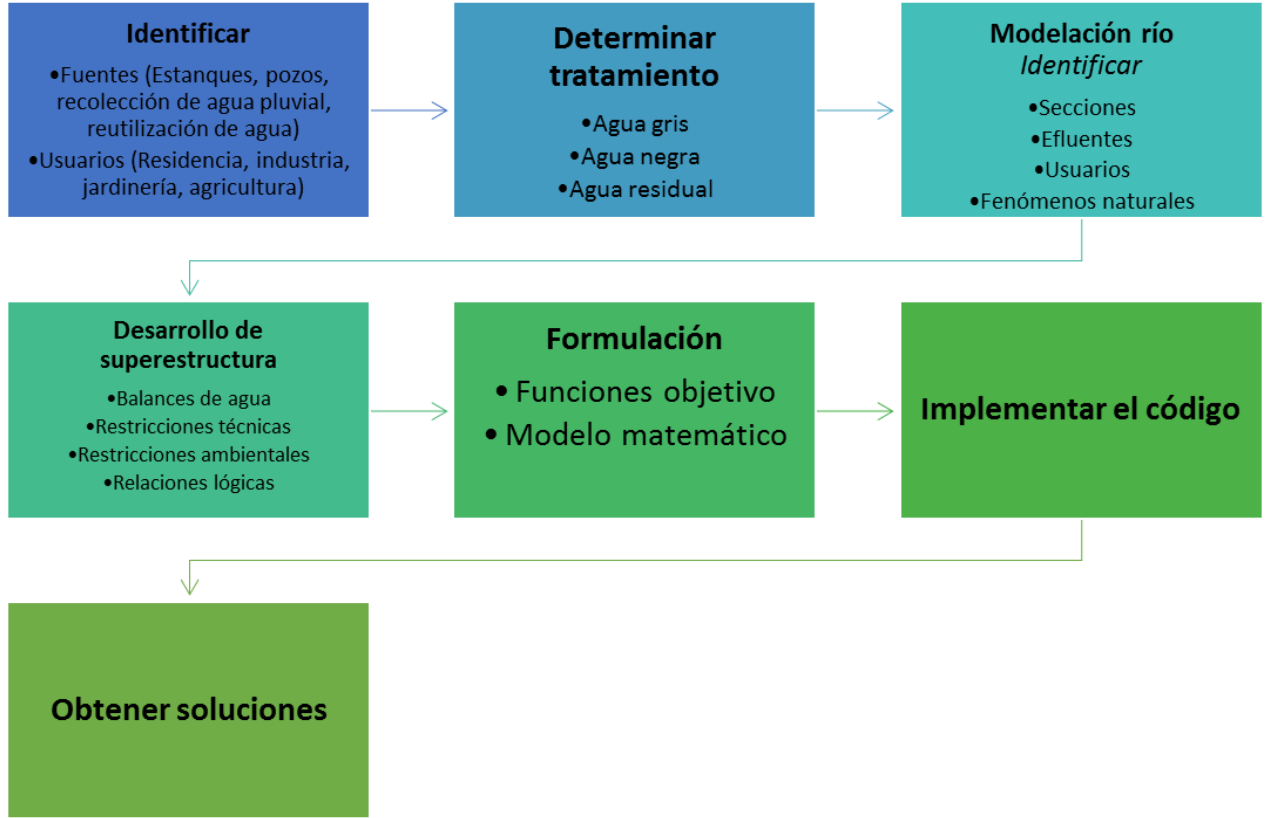


Figura 4. Enfoque para desarrollar un modelo matemático.

Balance de masa para los estanques

El agua usada desde cualquier estanque p en un periodo de tiempo t ($F_{p,t}^{pond}$) es igual al agua que se envía a usos residenciales ($f_{p,t}^{pond-residential}$), más los usos en jardinería ($f_{p,t}^{pond-gardening}$), más el uso industrial ($f_{p,t}^{pond-industry}$), más el uso en la agricultura ($f_{p,t}^{pond-agriculture}$):

$$F_{p,t}^{pond} = f_{p,t}^{pond-residential} + f_{p,t}^{pond-gardening} + f_{p,t}^{pond-industry} + f_{p,t}^{pond-agriculture}, \forall p, \forall t \quad (1)$$

Balance de masa en los pozos

El agua usada desde cualquier pozo w en un periodo de tiempo t ($F_{w,t}^{well}$) es igual al agua que se envía a las residencias ($f_{w,t}^{well-residential}$), más el uso en jardinería ($f_{w,t}^{well-gardening}$), uso industrial ($f_{w,t}^{well-industry}$) y uso en agricultura ($f_{w,t}^{well-agriculture}$):

$$F_{w,t}^{well} = f_{w,t}^{well-residential} + f_{w,t}^{well-gardening} + f_{w,t}^{well-industry} + f_{w,t}^{well-agriculture}, \forall w, \forall t \quad (2)$$

Recolección de agua de lluvia

Se considera la captación de agua pluvial para diferentes usos, incluyendo en residencias, jardinería, industrial y agricultura. El balance de masa para la recolección de agua de lluvia para las diferentes actividades es similar y solamente se presenta un ejemplo para el caso de la recolección de agua de lluvia para uso residencial como se indica a continuación. El agua de lluvia recolectada para las residencias en un periodo de tiempo t ($F_t^{rainwater-residential-in}$) es igual a la precipitación en ese periodo de tiempo (R_t) multiplicado por un área condicional en el sector residencial (A^R):

$$R_t \cdot A^R = F_t^{rainwater-residential-in}, \forall t \quad (3)$$

Se utilizan relaciones similares para jardinería (usando $F_t^{rainwater-gardening-in}$, R_t y A^G), industria ($F_t^{rainwater-industry-in}$, R_t y A^I) y agricultura ($F_t^{rainwater-agriculture-in}$, R_t y A^A).

Almacenamiento de agua de lluvia recolectada

El agua de lluvia recolectada para diferentes usos puede ser almacenada. Por ejemplo, el almacenamiento para agua de lluvia para uso residencial en un periodo de tiempo t ($S_t^{rainwater-residential}$) es igual al agua de lluvia almacenada al final del periodo de tiempo previo ($S_{t-1}^{rainwater-residential}$), más el agua de lluvia recolectada en el periodo de tiempo actual ($F_t^{rainwater-residential-in}$), menos el agua que se usa con propósitos residenciales ($F_t^{rainwater-residential-out}$):

$$S_t^{rainwater-residential} = S_{t-1}^{rainwater-residential} + F_t^{rainwater-residential-in} - F_t^{rainwater-residential-out}, \forall t \quad (4)$$

Se utilizan relaciones similares para jardinería ($S_t^{rainwater-gardening}$, $F_t^{rainwater-gardening-in}$ y $F_t^{rainwater-gardening-out}$), industria ($S_t^{rainwater-industry}$, $F_t^{rainwater-industry-in}$ y $F_t^{rainwater-industry-out}$) y agricultura ($S_t^{rainwater-agriculture}$, $F_t^{rainwater-agriculture-in}$ y $F_t^{rainwater-agriculture-out}$).

Uso del agua

Se necesitan balances de agua para los diferentes usos; por ejemplo, el balance para el uso en residencia que se detalla como sigue. El agua necesaria para propósitos residenciales en el periodo de tiempo t ($F_t^{residential}$) se satisface con el agua enviada de cada estanque ($f_{p,t}^{pond-residential}$), más la obtenida de cada pozo ($f_{w,t}^{well-residential}$), más la que se obtiene de la recolección de agua de lluvia ($F_t^{rainwater-residential-out}$):

$$\sum_p f_{p,t}^{pond-residential} + \sum_w f_{w,t}^{well-residential} + F_t^{rainwater-residential-out} = F_t^{residential}, \forall t \quad (5)$$

Se expresan relaciones similares para usos en jardinería ($F_t^{gardening}$, $f_{p,t}^{pond-gardening}$, $f_{w,t}^{well-gardening}$, $tgw_t^{gardening}$, $TWW_t^{stored-out}$), industria ($F_t^{industry}$, $f_{p,t}^{pond-industry}$, $f_{w,t}^{well-industry}$, $F_t^{rainwater-industry-out}$) y agricultura ($F_t^{agriculture}$, $f_{p,t}^{pond-agriculture}$, $f_{w,t}^{well-agriculture}$, $F_t^{rainwater-agriculture-out}$, $tgw_t^{agriculture}$).

Se debe hacer notar que las interacciones entre los sectores industrial y residencial no son permitidas debido a las diferencias de los contaminantes involucrados en cada caso y la calidad del agua que se requiere en cada sector.

Procesado de agua residencial

El agua que se usa para el sector residencial en el periodo de tiempo t ($F_t^{residential}$) es procesada en las residencias y una parte de esta agua se pierde (en este caso se usa el factor de conversión $\alpha^{residential}$, el cual puede ser determinado experimentalmente como lo indican García-Montoya et al. 2015a), después esta agua residencial usada es descargada luego de un tiempo de procesado rt como agua gris ($GW_{t+rt}^{residential}$) y agua negra ($BW_{t+rt}^{residential}$):

$$F_t^{\text{residential}} \cdot \alpha^{\text{residential}} = GW_{t+rt}^{\text{residential}} + BW_{t+rt}^{\text{residential}}, \forall t \quad (6)$$

$$BW_t^{\text{residential}} = \sigma^{\text{bw-residential}} \cdot GW_t^{\text{residential}}, \forall t \quad (7)$$

Tratamiento del agua gris residencial

El agua gris descargada de uso residencial en un periodo de tiempo t ($GW_t^{\text{residential}}$) es tratada y parte de esta agua estará disponible para un uso posterior luego de un tiempo de procesado del agua gris gwt ($TGW_{t+gwt}^{\text{residential}}$) considerando un factor de conversión ($\beta^{\text{residential-gw}}$) (ver García-Montoya et al. 2015b):

$$GW_t^{\text{residential}} \cdot \beta^{\text{residential-gw}} = TGW_{t+gwt}^{\text{residential}}, \forall t \quad (8)$$

Haciendo notar que el factor de conversión $\beta^{\text{residential-gw}}$ puede ser determinado de reportes experimentales (ver García-Montoya et al. 2015b).

Tratamiento de agua negra residencial

El agua negra descargada proveniente del uso residencial en un periodo de tiempo t ($BW_t^{\text{residential}}$) es tratada y se considera un factor de conversión ($\beta^{\text{residential-bw}}$), el agua negra es tratada ($TBW_{t+bwt}^{\text{residential}}$) y estará disponible después de un tiempo de procesado de dicha agua bwt :

$$BW_t^{\text{residential}} \cdot \beta^{\text{residential-bw}} = TBW_{t+bwt}^{\text{residential}}, \forall t \quad (9)$$

El factor de conversión para el tratamiento de agua negra $\beta^{\text{residential-bw}}$ se puede determinar experimentalmente (García-Montoya et al. 2015b).

Distribución de agua gris

El agua gris tratada de parte de la residencia en el periodo de tiempo t ($TGW_t^{\text{residential}}$) puede ser almacenada para uso futuro ($TGW_t^{\text{stored-in}}$) o ésta puede ser descargada al ambiente ($TGW_t^{\text{discharge}}$):

$$TGW_t^{residential} = TGW_t^{stored-in} + TGW_t^{discharge}, \forall t \quad (10)$$

Almacenamiento de agua gris

El agua gris almacenada al final del periodo de tiempo t (S_t^{GW}) es igual al agua gris almacenada al final del periodo de tiempo previo (S_{t-1}^{GW}), más el agua gris tratada que se envía a almacenaje en ese periodo de tiempo ($TGW_t^{stored-in}$), menos el agua gris tratada que se distribuye para diferentes usos en el mismo periodo de tiempo ($TGW_t^{stored-out}$):

$$S_t^{GW} = S_{t-1}^{GW} + TGW_t^{stored-in} - TGW_t^{stored-out}, \forall t \quad (11)$$

Distribución de agua gris tratada

El agua gris tratada en el periodo de tiempo t ($TGW_t^{stored-out}$) puede ser distribuida para jardinería ($tgw_t^{gardening}$) y para agricultura ($tgw_t^{agriculture}$) como se muestra a continuación:

$$TGW_t^{stored-out} = tgw_t^{gardening} + tgw_t^{agriculture}, \forall t \quad (12)$$

Se debe resaltar que el agua gris tratada debe satisfacer las normas ambientales para usarla en jardinería y agricultura y de esa manera evitar problemas de salud para los seres vivos. Esto se asegura a través de la utilización de tecnologías para el tratamiento del agua.

Uso de agua industrial

El agua industrial que es usada en el periodo de tiempo t ($F_t^{industry}$) es descargada como agua residual ($WW_{t+it}^{industry}$) después de un tiempo de procesado it considerando un factor de conversión ($\alpha^{industry}$) como sigue:

$$F_t^{industry} \cdot \alpha^{industry} = WW_{t+it}^{industry}, \forall t \quad (13)$$

Tratamiento de agua residual de la industria

El agua residual industrial que es descargada en el periodo de tiempo t ($WW_t^{industry}$) debe ser tratada considerando un factor de conversión ($\beta^{industry}$) y con el correspondiente

tratamiento para el agua residual industrial ($TWW_{t+wwt}^{industry}$) está disponible después de un periodo de tiempo de procesado wwt :

$$WW_t^{industry} \cdot \beta^{industry} = TWW_{t+wwt}^{industry}, \forall t \quad (14)$$

Distribución de agua residual industrial tratada

El agua residual industrial tratada puede ser distribuida en el periodo de tiempo t ($TWW_t^{industry}$) a las unidades de almacenamiento ($TWW_t^{stored-in}$) y descargada al ambiente ($TWW_t^{industry-discharge}$):

$$TWW_t^{industry} = TWW_t^{stored-in} + TWW_t^{industry-discharge}, \forall t \quad (15)$$

Almacenamiento de agua residual industrial tratada

El agua residual industrial almacenada al final del periodo de tiempo t ($S_t^{industry}$) es igual a la que está al final del periodo previo ($S_{t-1}^{industry}$), más la entrada de agua residual tratada de la industria ($TWW_t^{stored-in}$) menos la que se distribuye ($TWW_t^{stored-out}$):

$$S_t^{industry} = S_{t-1}^{industry} + TWW_t^{stored-in} - TWW_t^{stored-out}, \forall t \quad (16)$$

Distribución de agua gris tratada

El total de agua gris tratada que es descargada al ambiente en el periodo de tiempo t ($TGW_t^{discharge}$) puede ser distribuida a cualquier sección del río r ($\sum_r tgw_{r,t}^{discharge-reach}$):

$$TGW_t^{discharge} = \sum_r tgw_{r,t}^{discharge-reach}, \forall t \quad (17)$$

Destacando que las fugas de agua debido a la distribución no son consideradas.

Distribución de agua negra tratada

El agua negra tratada que es descargada al ambiente en el periodo de tiempo t ($TBW_t^{discharge}$) puede ser distribuida a cualquier sección del río r ($\sum_r tbw_{r,t}^{discharge-reach}$):

$$TBW^{residential} = \sum_r tbw_{r,t}^{discharge-reach}, \forall t \quad (18)$$

Distribución de agua residual industrial tratada

El agua residual proveniente de la industria que es tratada y descargada al ambiente en el periodo de tiempo t ($TWW_t^{industry-discharge}$) puede ser distribuida a cualquier sección del río

($\sum_r tww_{r,t}^{discharge-reach}$):

$$TWW_t^{industry-discharge} = \sum_r tww_{r,t}^{discharge-reach}, \forall t \quad (19)$$

Balance general para cada sección del río

La cuenca de agua es dividida en varias secciones, de acuerdo a las diferentes entradas y salidas del agua. El agua de salida de la sección del río r en el periodo de tiempo t ($Q_{r,t}$) es igual al agua que entra a esa sección del río ($Q_{r-1,t}$), más la precipitación ($P_{r,t}$), descargas de los efluentes ($FT_{r,trib,t}$), descargas directas ($D_{r,t}$), descargas residenciales ($H_{r,t}$), descargas adicionales de agua gris tratada ($tgw_{r,t}^{discharge-reach}$), agua negra tratada ($tbw_{r,t}^{discharge-reach}$), descargas industriales tratadas ($tww_{r,t}^{discharge-reach}$), menos pérdidas ($L_{r,t}$) y usos ($V_{r,t}$):

$$Q_{r,t} = Q_{r-1,t} + P_{r,t} + \sum_{trib} FT_{r,trib,t} + D_{r,t} + H_{r,t} + tgw_{r,t}^{discharge-reach} + tbw_{r,t}^{discharge-reach} + tww_{r,t}^{discharge-reach} - L_{r,t} - V_{r,t}, \forall r, \forall t \quad (20)$$

Balance por componente de cada sección del río

El balance de componente para cada sección del río es determinado multiplicando los flujos de la ecuación (20) por sus correspondientes composiciones, e incluyendo el término reactivo ($k_c(X_{c,r,t}^{reach})^{\sigma_c}$) para considerar las reacciones químicas y bioquímicas que se llevan a cabo en la sección del río:

$$\begin{aligned}
Q_{r,t} \cdot X_{c,r,t}^{reach} &= Q_{r-1,t} \cdot X_{c,r-1,t}^{reach} + P_{r,t} \cdot X_{c,r,t}^p + \sum_{trib} FT_{r,trib,t} \cdot X_{c,r,trib,t}^{trib} \\
&+ D_{r,t} \cdot X_{c,r,t}^D + H_{r,t} \cdot X_{c,r,t}^H + tgw_{r,t}^{discharge-reach} \cdot X_{c,r,t}^{tgw} + tbw_{r,t}^{discharge-reach} \cdot X_{c,r,t}^{tbw} \\
&+ tww_{r,t}^{discharge-reach} \cdot X_{c,r,t}^{tww} - L_{r,t} \cdot X_{c,r,t}^L - V_{r,t} \cdot X_{c,r,t}^V - k_c (X_{c,r,t}^{reach})^{\sigma_c}, \forall c, \forall r, \forall t
\end{aligned} \quad (21)$$

Balance general para cada efluente

El balance para cada efluente establece que el flujo de descarga de cada efluente a la sección del río r ($FT_{r,trib,t}$) es igual al agua que es descargada sin tratamiento ($S_{r,trib,t}^{untreated}$), a la que es tratada ($S_{r,trib,t}^{treated}$), a la industrial ($I_{r,trib,t}$), a la precipitación ($P_{r,trib,t}$) y a las descargas directas ($D_{r,trib,t}$), menos pérdidas ($L_{r,trib,t}$) y usos ($U_{r,trib,t}$) en un periodo de tiempo:

$$FT_{r,trib,t} = S_{r,trib,t}^{untreated} + S_{r,trib,t}^{treated} + I_{r,trib,t} + P_{r,trib,t} + D_{r,trib,t} - L_{r,trib,t} - U_{r,trib,t}, \forall r, \forall trib, \forall t \quad (22)$$

Balance por componente para cada efluente

El balance de componente para cada efluente corresponde a cada término de la relación previa multiplicada por su correspondiente composición y el término reactivo para las reacciones químicas y bioquímicas ($k_c (X_{c,r,trib,t}^T)^{\sigma_c}$) como sigue:

$$\begin{aligned}
FT_{r,trib,t} \cdot X_{c,r,trib,t}^T &= S_{r,trib,t}^{untreated} \cdot X_{c,r,trib,t}^{Su} + S_{r,trib,t}^{treated} \cdot X_{c,r,trib,t}^t + I_{r,trib,t} \cdot X_{c,r,trib,t}^I + P_{r,trib,t} \cdot X_{c,r,trib,t}^P \\
&+ D_{r,trib,t} \cdot X_{c,r,trib,t}^D - L_{r,trib,t} \cdot X_{c,r,trib,t}^L - U_{r,trib,t} \cdot X_{c,r,trib,t}^U - k_c (X_{c,r,trib,t}^T)^{\sigma_c}, \forall c, \forall trib, \forall r, \forall t
\end{aligned} \quad (23)$$

Restricciones ambientales

La concentración de los contaminantes debe ser restringida dependiendo de cada sección del río como se muestra a continuación:

$$X_{c,r,t}^{reach} \leq X_c^{reach-mx}, \forall c, \forall r, \forall t \quad (24)$$

Costo de agua fresca

El costo de agua fresca ($Cost^{Freshwater}$) es igual a la suma de agua fresca de cada estanque ($UC_{p,t}^{Fresh-pond} F_{p,t}$) más la suma de agua fresca de cada pozo ($UC_{w,t}^{Fresh-well} F_{w,t}$):

$$Cost^{Freshwater} = \sum_p \sum_t UC_{p,t}^{Fresh-pond} \cdot F_{p,t} + \sum_w \sum_t UC_{w,t}^{Fresh-well} \cdot F_{w,t} \quad (25)$$

Costo de la recolección de agua de lluvia

El costo de la recolección de agua de lluvia ($Cost^{Rainwater-harvesting}$) se lleva a cabo considerando un factor para la anualización de la inversión (k_F), el cual multiplica los costos de capital de las áreas que son condicionadas para la recolección de agua de lluvia asociados a los usos de residencia ($a^{AR} \cdot y^{AR} + b^{AR} \cdot (A^R)^{C^{AR}}$), jardinería ($a^{AG} \cdot y^{AG} + b^{AG} \cdot (A^G)^{C^{AG}}$), industria ($a^{AI} \cdot y^{AI} + b^{AI} \cdot (A^I)^{C^{AI}}$) y agricultura ($a^{AA} \cdot y^{AA} + b^{AA} \cdot (A^A)^{C^{AA}}$):

$$Cost^{Rainwater-harvesting} = k_F \cdot [a^{AR} \cdot y^{AR} + b^{AR} \cdot (A^R)^{C^{AR}}] + k_F \cdot [a^{AG} \cdot y^{AG} + b^{AG} \cdot (A^G)^{C^{AG}}] + k_F \cdot [a^{AI} \cdot y^{AI} + b^{AI} \cdot (A^I)^{C^{AI}}] + k_F \cdot [a^{AA} \cdot y^{AA} + b^{AA} \cdot (A^A)^{C^{AA}}] \quad (26)$$

En la relación previa, y corresponde a la variable binaria asociada a la existencia del área requerida, donde a , b y c son factores de unidad que se usan para considerar los costos de capital.

Activación de variables binarias asociadas a las áreas de recolección de agua de lluvia

Es necesaria una restricción para activar las variables binarias (y) para las áreas que son condicionadas para la recolección de agua de lluvia (A), cuando ésta es requerida se usan los valores máximos de área (A^{MAX}) para los diferentes tipos de usos. Por ejemplo, para el sector residencial la relación es como se indica a continuación:

$$A^R \leq A^{R-MAX} \cdot y^{AR} \quad (27)$$

Restricciones similares son necesarias para jardinería, industria y agricultura. Destacando que estos usos son los recomendados por las normas para el uso directo del agua pluvial recolectada para evitar problemas de salud (SEMARNAT 2014).

Costo de almacenamiento para agua de recolección de lluvia

El costo de capital para el almacenamiento del agua de lluvia considera el factor utilizado para la anualización de la inversión (k_F) multiplicado por el costo de almacenamiento del agua de lluvia para uso residencial ($a^{SR} \cdot y^{SR} + b^{SR} \cdot (S^{SR})^{C^{SR}}$), de jardinería

$(a^{SG} \cdot y^{SG} + b^{SG} \cdot (S^{SG})^{C^{SG}})$, industrial $(a^{SI} \cdot y^{SI} + b^{SI} \cdot (S^{SI})^{C^{SI}})$ y para agricultura $(a^{SA} \cdot y^{SA} + b^{SA} \cdot (S^{SA})^{C^{SA}})$:

$$Cost^{Rainwater-storing} = k_F \cdot [a^{SR} \cdot y^{SR} + b^{SR} \cdot (S^{SR})^{C^{SR}}] + k_F \cdot [a^{SG} \cdot y^{SG} + b^{SG} \cdot (S^{SG})^{C^{SG}}] + k_F \cdot [a^{SI} \cdot y^{SI} + b^{SI} \cdot (S^{SI})^{C^{SI}}] + k_F \cdot [a^{SA} \cdot y^{SA} + b^{SA} \cdot (S^{SA})^{C^{SA}}] \quad (28)$$

En la ecuación anterior, las constantes a, b y c son parámetros que se usan en las correspondientes funciones de los costos de capital (ver Bocanegra-Martínez et al. 2014).

Capacidad de los tanques de almacenamiento de agua de lluvia

Es necesario determinar la capacidad para los tanques de almacenamiento para el agua de lluvia recolectada. Por ejemplo, para los dispositivos de almacenamiento del agua pluvial para el uso en la residencia (S^{SR}) debe ser más grande que el requerido a cualquier periodo de tiempo ($S_t^{rainwater-residential}$):

$$S^{SR} \geq S_t^{rainwater-residential}, \forall t \quad (29)$$

De la misma forma, son necesarios dispositivos de almacenamiento para el agua pluvial recolectada para usos en jardinería, industria y agricultura.

Activación de las variables binarias para los dispositivos de almacenamiento para el agua de lluvia recolectada

Cuando la capacidad de los dispositivos de almacenamiento para el agua de lluvia recolectada para uso residencial (S^{SR}) es mayor que cero, la variable binaria asociada (y^{SR}) debe ser uno, de lo contrario la variable binaria deberá ser cero. Esto es modelado a través de la capacidad máxima disponible para cada dispositivo de almacenamiento (S^{SR-MAX}) como sigue:

$$S^{SR} \leq S^{SR-MAX} \cdot y^{SR} \quad (30)$$

De manera similar, son necesarias relaciones para las variables binarias asociadas a la existencia de dispositivos de almacenamiento para el agua recolectada con fines de uso en jardinería (y^{SG}), industria (y^{SI}) y agricultura (y^{SA}).

Costos de tratamiento de agua residual

El costo anual de tratamiento del agua residual ($Cost^{Treatment}$) se considera como el costo de operación para el tratamiento de agua gris ($VC^{gwt} \cdot \sum_t GW_t^{residential}$), más el costo capital anual para el tratamiento por unidad de agua gris ($k_F \cdot [a^{gwt} \cdot y^{gwt} + b^{gwt} \cdot (GW^{res})^{C^{gwt}}]$), más los costos de operación por el tratamiento de agua negra ($VC^{bwt} \cdot \sum_t BW_t^{residential}$) así como el correspondiente costo capital ($k_F \cdot [a^{bwt} \cdot y^{bwt} + b^{bwt} \cdot (BW^{res})^{C^{bwt}}]$) y el costo de operación por el tratamiento de agua residual de la industria ($VC^{wwt} \cdot \sum_t WW_t^{industry}$) y su correspondiente costo capital para las unidades necesarias ($k_F \cdot [a^{wwt} \cdot y^{wwt} + b^{wwt} \cdot (WW^{ind})^{C^{wwt}}]$):

$$\begin{aligned}
 Cost^{Treatment} = & VC^{gwt} \cdot \sum_t GW_t^{residential} + k_F \cdot [a^{gwt} \cdot y^{gwt} + b^{gwt} \cdot (GW^{res})^{C^{gwt}}] \\
 & + VC^{bwt} \cdot \sum_t BW_t^{residential} + k_F \cdot [a^{bwt} \cdot y^{bwt} + b^{bwt} \cdot (BW^{res})^{C^{bwt}}] \\
 & + VC^{wwt} \cdot \sum_t WW_t^{industry} + k_F \cdot [a^{wwt} \cdot y^{wwt} + b^{wwt} \cdot (WW^{ind})^{C^{wwt}}]
 \end{aligned} \tag{31}$$

Es necesario hacer notar que en la ecuación anterior, VC corresponde a la unidad de costo de tratamiento y a, b y c corresponden a los factores que se usan para considerar los costos de capital (ver Lira-Barragán et al. 2011). Una limitación del enfoque propuesto es que no considera las propiedades tales como pH, DBO o toxicidad como variables de optimización; sin embargo, el modelo considera que las tecnologías de tratamiento que están involucradas son capaces de satisfacer las regulaciones ambientales para estas propiedades.

Capacidad de las unidades de tratamiento

La capacidad de las unidades de tratamiento para el agua gris (GW^{res}) debe ser mayor que el agua gris procesada en cualquier periodo de tiempo ($GW_t^{residential}$):

$$GW^{res} \geq GW_t^{residential}, \forall t \tag{32}$$

De manera similar es para la capacidad para las unidades de tratamiento de agua negra (BW^{res}) y agua residual proveniente de la industria (WW^{ind})

Activación de las variables binarias para las unidades de tratamiento

Cuando la capacidad usada para las unidades de tratamiento es mayor que la que está disponible, entonces la variable binaria correspondiente debe ser mayor que cero. De esta manera, la variable binaria para la existencia de las unidades de tratamiento de agua gris (y^{gwt}) es modelada como sigue:

$$GW^{res} \leq GW^{MAX} \cdot y^{gwt} \quad (33)$$

Se requieren relaciones similares para la existencia de unidades de tratamiento para los tratamientos de agua negra (y^{bwt}) y agua residual proveniente de la industria (y^{wwt}).

Costo para el almacenamiento de agua tratada

El costo total para el almacenamiento de agua tratada ($Cost^{Storing-treatedwater}$) corresponde al costo de capital para el almacenamiento del agua gris tratada ($a^{stgw} \cdot y^{stgw} + b^{stgw} (S^{stgw})^{C^{stgw}}$) y el agua residual tratada ($a^{stww} \cdot y^{stww} + b^{stww} (S^{stww})^{C^{stww}}$):

$$Cost^{Storing-treatedwater} = k_F \cdot [a^{stgw} \cdot y^{stgw} + b^{stgw} (S^{stgw})^{C^{stgw}}] + k_F \cdot [a^{stww} \cdot y^{stww} + b^{stww} (S^{stww})^{C^{stww}}] \quad (34)$$

Donde k_F corresponde al factor de anualización (ver Nápoles-Rivera et al. 2015).

Capacidad de almacenamiento de agua tratada

La capacidad para el almacenamiento de agua gris tratada (S^{stgw}) debe ser mayor que la que se necesita en cualquier periodo de tiempo (S_t^{GW}):

$$S^{stgw} \geq S_t^{GW}, \forall t \quad (35)$$

De manera similar se necesitan relaciones para la capacidad para el almacenamiento de agua residual proveniente de la industria (S^{stww}).

Activación de variables binarias para dispositivos de almacenamiento de agua tratada

La variable binaria asociada a la existencia de los dispositivos de almacenamiento para agua gris tratada (y^{stgw}) debe ser activada cuando la capacidad que se necesita (S^{stgw}) es mayor que cero:

$$S^{stgw} \leq S^{gwMAX} \cdot y^{stgw} \quad (36)$$

La activación para la variable binaria asociada a los dispositivos de almacenamiento para el agua residual industrial tratada (y^{stww}) se modela de manera similar.

Costos de tubería

El costo total de tubería ($Cost^{piping}$) es considerado por los costos de bombeo ($UPC \cdot f$) y los costos de capital ($ap \cdot y + bp \cdot (f^{cap})^C$) para las diferentes secciones de tubería que son consideradas, las cuales se modelan a continuación:

$$Cost^{piping} = \sum_{source} \sum_{sink} \sum_t UPC_t^{source-sink} \cdot f_t^{source-sink} + k_F \cdot \sum_{source} \sum_{sink} [ap^{source-sink} \cdot y^{source-sink} + bp^{source-sink} \cdot (f^{source-sink})^C] \quad (37)$$

Debe tenerse en cuenta que son considerados las diferentes tuberías para los diferentes tipos de flujos. Además, la red de tubería detallada se puede diseñar después de que los objetivos se identifiquen de acuerdo al enfoque propuesto.

Capacidad para la tubería

La capacidad para la tubería entre cualquier estanque para uso residencial ($f_p^{cap-pond-residential}$) debe ser mayor que la necesaria a cualquier periodo de tiempo ($f_{p,t}^{pond-residential}$), lo cual se establece a continuación:

$$f_p^{cap-pond-residential} \geq f_{p,t}^{pond-residential}, \forall p, \forall t \quad (38)$$

De forma similar se necesitan relaciones para los otros segmentos de tubería.

Activación de las variables binarias asociadas a los segmentos de tubería

La variable binaria asociada a la tubería para el segmento que corresponde del estanque para uso residencial ($y_p^{p-pond-residential}$) debe ser activado cuando la capacidad necesaria ($f_p^{cap-pond-residential}$) es mayor que cero y menor que la máxima disponible ($f_c^{pond-res-MAX}$):

$$f_p^{cap-pond-residential} \leq f_c^{pond-res-MAX} \cdot y_p^{p-pond-residential}, \forall p \quad (39)$$

Se necesitan relaciones similares para los otros segmentos de tubería.

Costo total anual

El costo total anual (TAC) es igual al costo de agua fresca ($Cost^{FreshWater}$), más el costo de recolección de agua pluvial ($Cost^{Rainwater-harvesting}$), más el costo de almacenamiento de agua de lluvia ($Cost^{Rainwater-storing}$), más el costo de tratamiento ($Cost^{Treatment}$), más el costo de tubería ($Cost^{Piping}$), el cual se establece a continuación:

$$TAC = Cost^{FreshWater} + Cost^{Rainwater-harvesting} + Cost^{Rainwater-storing} + Cost^{Treatment} + Cost^{Piping} \quad (40)$$

Consumo total de agua fresca

El consumo total de agua fresca ($TotFresh$) es igual a la sumatoria del agua que se usa de cualquier estanque p en el periodo de tiempo t ($F_{p,t}^{pond}$), más la sumatoria del agua que se usa de cualquier pozo w durante el periodo de tiempo t ($F_{w,t}^{well}$):

$$TotFresh = \sum_p \sum_t F_{p,t}^{pond} + \sum_w \sum_t F_{w,t}^{well} \quad (41)$$

Función objetivo

La formulación del programa de optimización es establecido como un problema multi-objetivo mixto-entero no lineal (mo-MINLP), donde uno de los objetivos es minimizar el costo total anual y el otro es minimizar el consumo total de agua fresca, sujeto a las restricciones (1-41), como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Objective Function} &= \text{Min } TAC; \text{Min } TotFresh \\ \text{Subject to} & (1 - 41) \end{aligned} \quad (42)$$

6.2 Caso de estudio

En este trabajo es considerado un caso de estudio de la parte central de México que corresponde al Río Balsas, el cual se muestra en la **Figura 5a**. Este río tiene 770 km de largo y 16,587 hm³/año (CONAGUA, 2012). La región considerada corresponde a Lázaro Cárdenas, el cual es uno de los municipios del estado de Michoacán que está localizado cerca del Océano Pacífico (ver **Figura 5b**). Para los datos de lluvia, se consideran reportes estadísticos de años previos de dicha región (CONAGUA 2012).

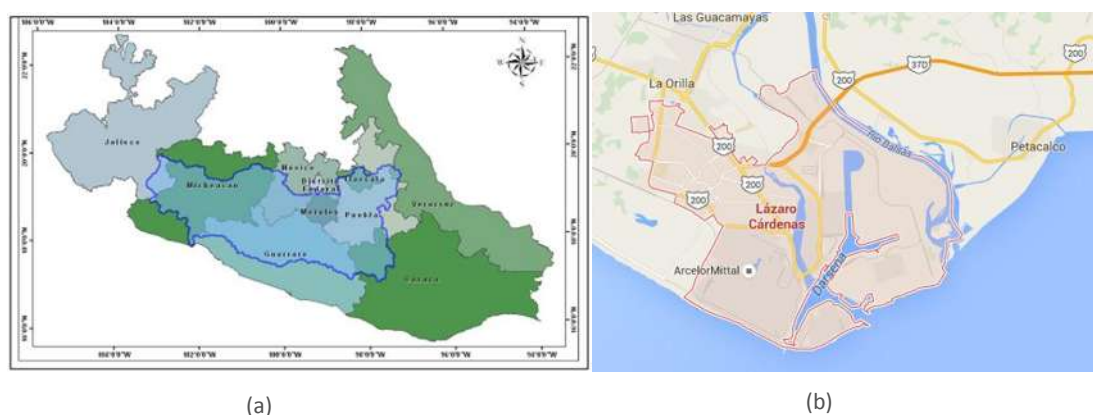


Figura 5. a) Localización de la región hidrológica, Río Balsas, b) Lázaro Cárdenas, el cual representa la descarga final del río Balsas

El problema consiste en encontrar la distribución óptima a nivel macroscópico del manejo del agua que satisfaga el consumo de agua de 5,000,000 m³/año y las demandas de agua para las diversas actividades, las cuales están generalmente distribuidos como 83% para el sector agrícola, 12% para las casas-habitación, 3% para el uso industrial y 2% para jardines. Para cubrir dichas demandas de agua fresca en el esquema mencionado se utilizan estanques y pozos; además también se utiliza la recolección de agua de lluvia, la cual es distribuida hacia diferentes destinos. La demanda de agua en el sector residencial es dividida en agua gris y agua negra, donde el agua gris es tratada y una parte de esa agua es reusada para agricultura y jardinería y la otra parte es descargada al río. Por otro lado, el agua negra es tratada y descargada al río ya que no se le puede dar uso. El agua residual proveniente de la industria es tratada y una parte es reusada para jardinería, el resto del agua es descargada al río. El factor

de conversión que se utiliza en el sector residencial para justificar las pérdidas del agua debido a la línea de tubería, a la evaporación, a fugas, etc. es $\alpha^{\text{residencial}}=0.6$, y la fracción del agua de la residencia que corresponde al agua negra es $\sigma^{\text{bw-residencial}}=0.3$. Lo que respecta al factor de recuperación para el tratamiento de agua gris y agua negra del sector residencial es $\beta^{\text{residencial-gw}}=0.7$ y $\beta^{\text{residencial-bw}}=0.4$, respectivamente. En el caso del agua residual proveniente de la industria, el factor de conversión es $\alpha^{\text{industry}}=0.8$ y para el tratamiento de esta agua el factor es $\beta^{\text{industry}}=0.9$. Para el agua de lluvia, es considerada un área disponible para la recolección. Además se analizaron las composiciones de los diferentes contaminantes del flujo del río Balsas como son arsénico, nitrógeno y azufre. El río Balsas se dividió en 23 secciones iguales para su estudio y de esta forma asegurar que las diferentes descargas de agua gris tratada, agua negra tratada y agua residual tratada de la industria se distribuyeran a lo largo del río y así poder evitar el acumulamiento de contaminantes en una sola sección del río; haciendo entonces la suposición de que la concentración de los contaminantes permanecerá constante en cada sección del río antes de pasar a la siguiente sección, esto se llevó a cabo de acuerdo a un análisis MFA que es una técnica que se encarga de la correcta distribución de las descargas de agua para el cumplimiento de las concentraciones de los contaminantes que el ambiente es capaz de procesar. En este caso, el periodo de tiempo está en años, y las fluctuaciones a través del año no son consideradas. Además, el horizonte de tiempo es de 20 años y esto es usado para la anualización de la inversión y para la predicción de demandas de agua y lluvia. El problema de utilizar periodos de tiempo discretos es asociado a la complejidad del modelo y la probabilidad de encontrar la solución óptima. Los datos adicionales que se utilizaron se presentan en el **Apéndice A**. La representación esquemática del problema se muestra en la **Figura 3**. La representación esquemática del problema se muestra en la **Figura 4**. Se utilizó el software GAMS (Brooke et al., 2016) para su solución y el modelo consiste de 129 variables binarias, 4165 variables continuas, 11940 restricciones, y cada punto de la curva Pareto fue resuelto en una computadora con un procesador i7 a 3.2 GHz y 12 GB de RAM in 600 segundos, donde el método de la épsilon fue implementado para la obtención de las soluciones Pareto. El modelo corresponde a un problema Mixto-Entero no lineal (mo-MINLP) y fueron usados los resolvers DICOPT en conjunto con CONOPT y CPLEX para su solución.

7. Resultados

Primeramente, se obtuvo la solución para el mínimo TAC (esta solución proporciona el mayor consumo de agua fresca en la curva Pareto); después se obtiene la solución para el consumo mínimo de agua fresca (esta solución proporciona el más alto TAC en la curva Pareto). Después se obtiene un conjunto de soluciones restringidas para diferentes consumos de agua fresca (entre los límites obtenidos anteriormente) y minimizando el TAC. Este enfoque permite la obtención de la curva Pareto que se muestra en la **Figura 6**. Se debe notar que las soluciones que están por encima de la curva Pareto corresponde a soluciones sub-óptimas, donde las soluciones debajo de esta curva Pareto corresponde a soluciones infactibles, y las soluciones de la curva Pareto son soluciones óptimas que compensan estos dos objetivos que se contradicen. Nótese en la **Figura 7** que la solución del escenario A corresponde al mínimo TAC, lo cual es US \$686,510,000/año y los costos son principalmente asociados al costo de bombeo y al costo de tratamiento de agua como se muestra en la **Tabla 1**. Como ejemplo, para este caso es presentado en detalle el análisis de la función objetivo. Primeramente, se consume $3,952.23 \times 10^3$ m³/año de agua fresca a un costo unitario de USD \$0.6530/m³ para estanques y \$0.7314/m³ para pozos lo tanto se requiere un costo de agua fresca de \$2,580,806/año. El total de agua pluvial recolectada es 754×10^3 m³/año, y el agua que se reutiliza son 294×10^3 m³/año. Se generan 276.923×10^3 m³/y de agua gris, 83.077×10^3 m³/y de agua negra y 120×10^3 m³/y de agua residual con un costo unitario de \$176/m³, \$180/m³ y \$3.5/m³, respectivamente.

La distribución de la red para la solución del escenario A se muestra en la **Figura 7**. Se debe destacar que en esta figura se utiliza agua fresca de sólo un estanque. El total de agua usada proviene de estanques (83.9 %) y de agua pluvial recolectada (16.1 %). Donde el total de agua recolectada de la lluvia para el escenario A es 753.92×10^3 m³/año (19.9 % debido al uso industrial, y 80.1 % en el uso agrícola). Además, el total de agua gris proveniente de la residencia es 193.846×10^3 m³/año, la cual es reutilizada principalmente con fines agrícolas. Adicionalmente, el agua residual de la industria que es tratada es 108×10^3 m³/año, y 92.6% de esta es reutilizada para jardinería. Un punto importante en este enfoque propuesto es que toma en cuenta la interacción con los alrededores de la cuenca de agua; es por ello que la solución determina la sección óptima en la cual se deben descargar los diferentes tipos de aguas

residuales para satisfacer las restricciones ambientales y no perturbar las interacciones con los fenómenos naturales como filtración, precipitación, reacciones químicas y bioquímicas que se llevan a cabo en dicho cuerpo de agua. En este caso, el agua gris tratada es segregada para descargarse en diferentes secciones del río y de manera similar para el agua negra tratada y el agua residual de la industria son descargados en diferentes secciones del río. Esto incrementa los costos de tubería y bombeo, pero permite una mayor interacción de las descargas con los fenómenos naturales que toman lugar en el río y de esta forma satisfacer las restricciones ambientales.

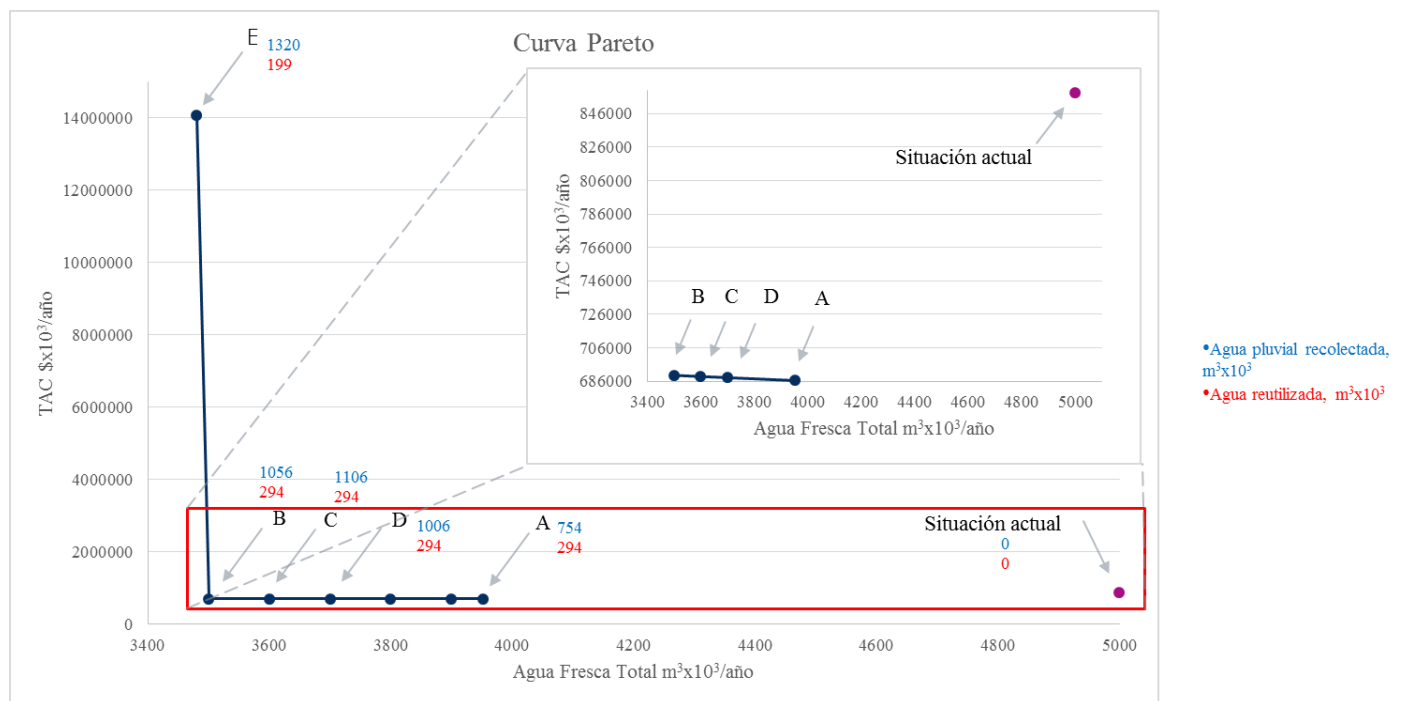


Figura 6. Soluciones óptimas Pareto para el caso de estudio.

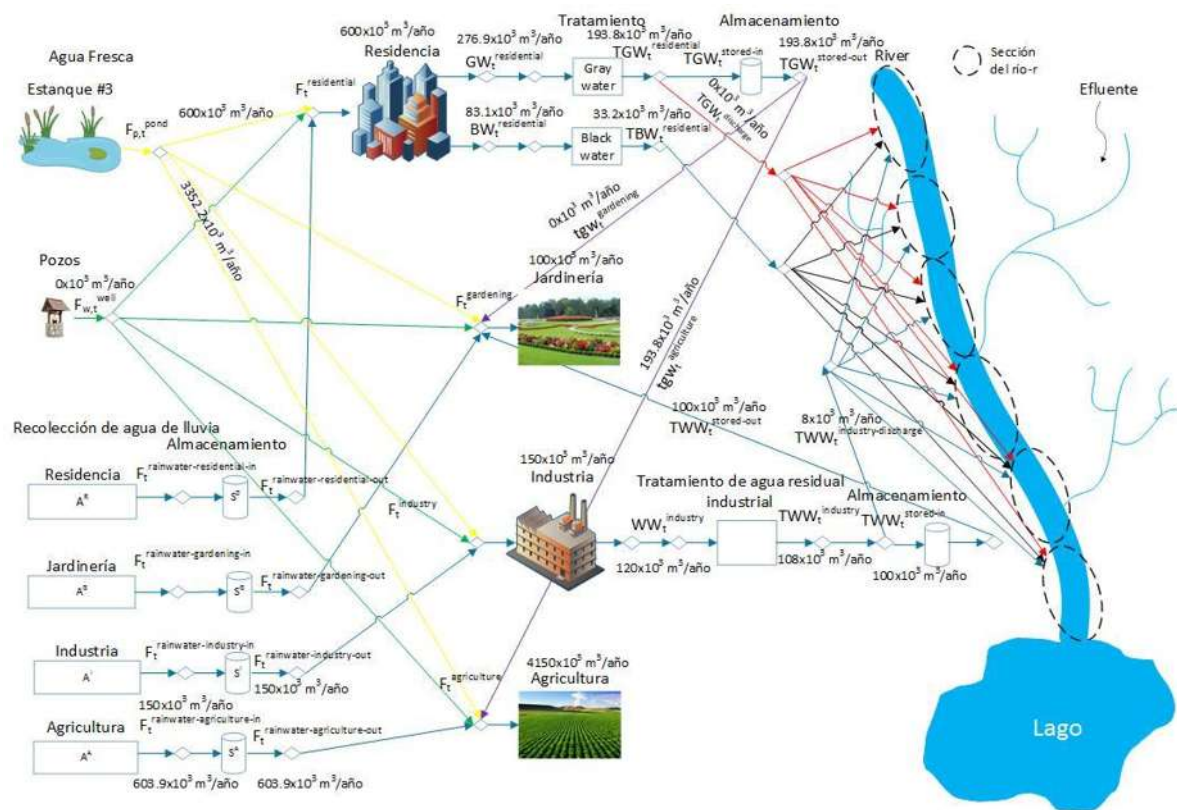


Figura 7. Solución del Escenario A

Tabla 1. Resultados de las diferentes soluciones Pareto para el caso de estudio.

Concepto	Situación actual sin integración	Escenario A (minimizando TAC)	Escenario B (minimizando TAC)	Escenario C (minimizando TAC)	Escenario D (minimizando TAC)	Escenario E (minimizando TFW)
TAC x 10 ³ \$/año	858,350	686,510	689,630	688,940	688,250	14,061,000
TWF x 10 ³ m ³ / año	5,000	3,952	3,500	3,600	3,700	3,480
Costo Agua Fresca x 10 ³ \$/ año	3,265	2,580	2,285	2,350	2,416	2,272
Costo Agua pluvial captada x 10 ³ \$/ año	0	4,224	7,650	6,893	6,135	8,515
Costo Tratamiento x 10 ³ \$/ año	64,969	64,969	64,969	64,969	64,969	65,969
Agua gris x 10 ³ m ³ / año	276	276	276	276	276	600
Agua negra x 10 ³ m ³ / año	83	83	83	83	83	600
Agua residual x 10 ³ m ³ / año	120	120	120	120	120	120
Costo tubería x 10 ³ \$/ año	790,120	614,730	614,730	614,730	614,730	13,984,000
Descarga agua gris tratada x 10 ³ m ³ / año	194	0	0	0	0	0
Descarga agua negra tratada x 10 ³ m ³ / año	33	33	33	33	33	33
Descarga agua residual tratada x 10 ³ m ³ / año	108	8	8	8	8	102

La solución para el mínimo consumo de agua fresca se muestra en la **Figura 8**, esta solución corresponde al escenario E de la **Figura 6**. Se debe hacer notar que en esta solución se presenta la totalidad de agua a utilizar proveniente solo de estanques (72.5%) y el resto es del agua pluvial recolectada (27.5%). Donde el agua de lluvia recolectada en este escenario es $1320.334 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$ (35.7% del uso residencial, 7.2% de uso en jardinería, 11.4% de uso industrial y 45.7% de uso agrícola). Además, el total de agua gris reusada es $193.846 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$ y es utilizada para usos agrícolas (100%). Adicionalmente, el agua residual proveniente de la industria es $108 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$, donde 4.9% es reutilizada para jardinería.

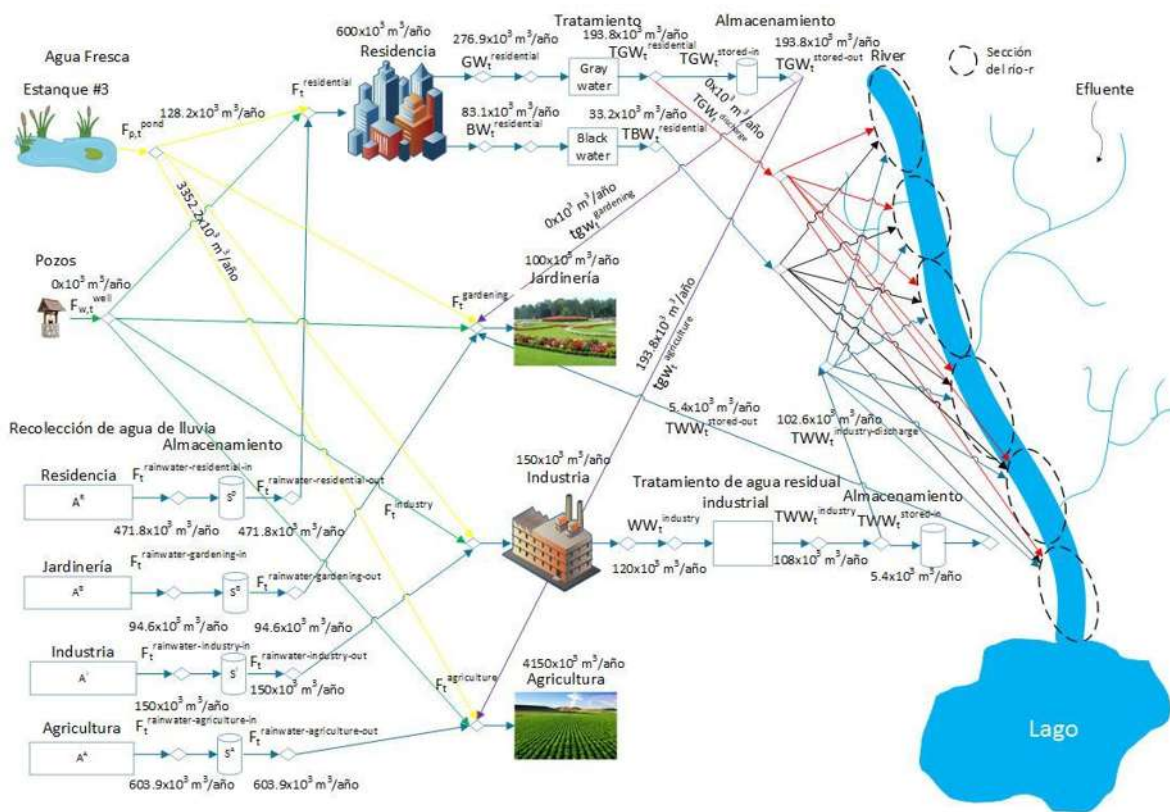


Figura 8. Solución de Escenario E.

Haciendo una comparación entre las soluciones de los escenarios A y E, la solución A consume 13.6% más de agua fresca que el escenario E; sin embargo, el costo se incrementa un 95.6% de la solución A a la solución E. Por otro lado, el agua pluvial recolectada en el

escenario A es 42.9% menor que la del escenario E, pero el agua residual proveniente de la industria reutilizada es 1752.54% mayor en el escenario A respecto al escenario E.

Además se han identificado soluciones atractivas que son los escenarios B, C y D (**Figuras 9, 10 y 11**, respectivamente). Estas soluciones presentan una pequeña diferencia en el TAC y son similares a la solución del escenario A. La principal diferencia respecto a la solución A es en el agua pluvial recolectada. Destacando que en todos los escenarios toda el agua gris es tratada y reutilizada. También es importante señalar que en los escenarios A, B, C y D, la concentración de los diferentes contaminantes (nitrógeno, azufre y arsénico) en el flujo que abandona la última sección del río (es decir, sección 23) la concentración es menor que en el escenario E.

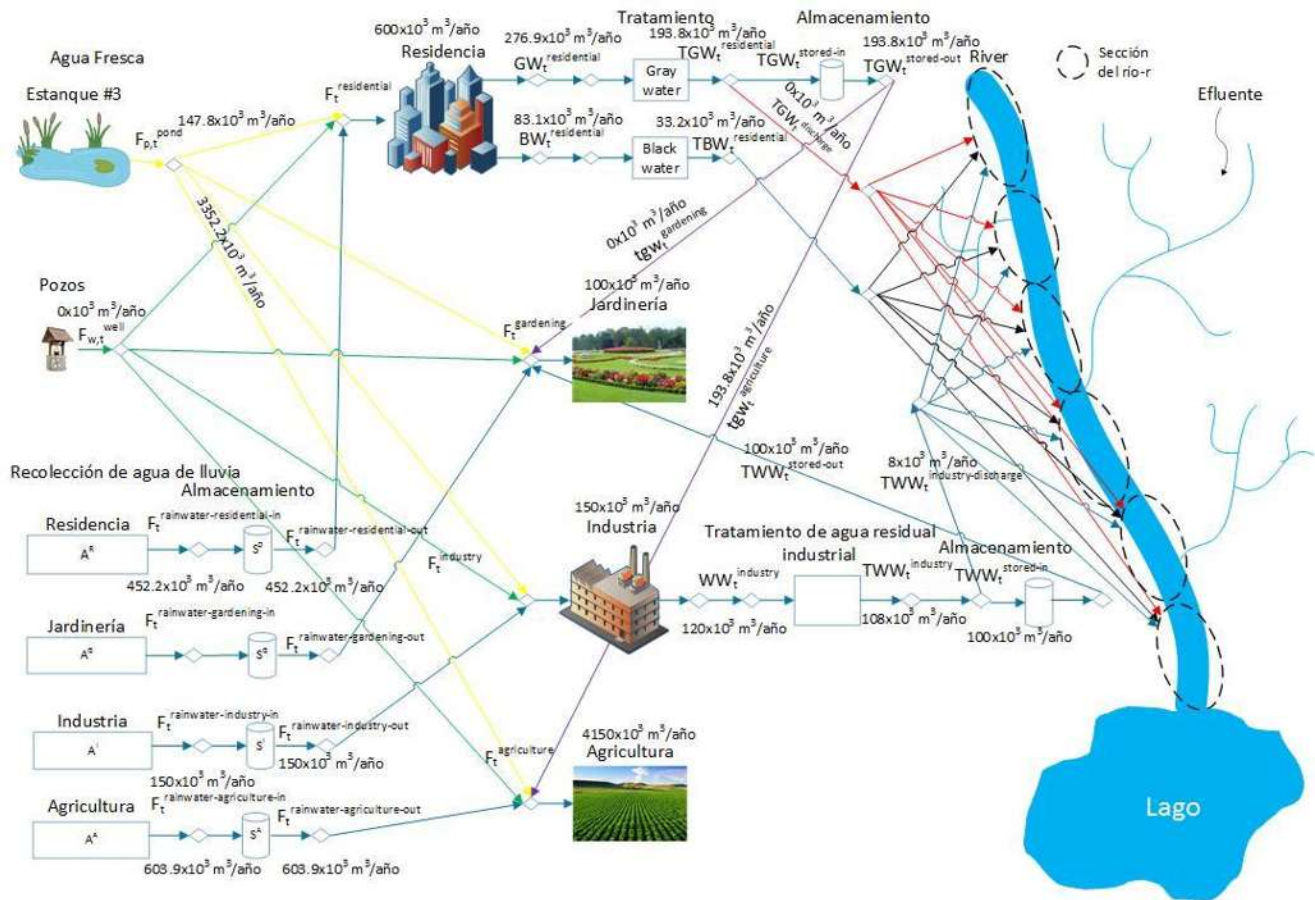


Figura 9. Solución de Escenario B.

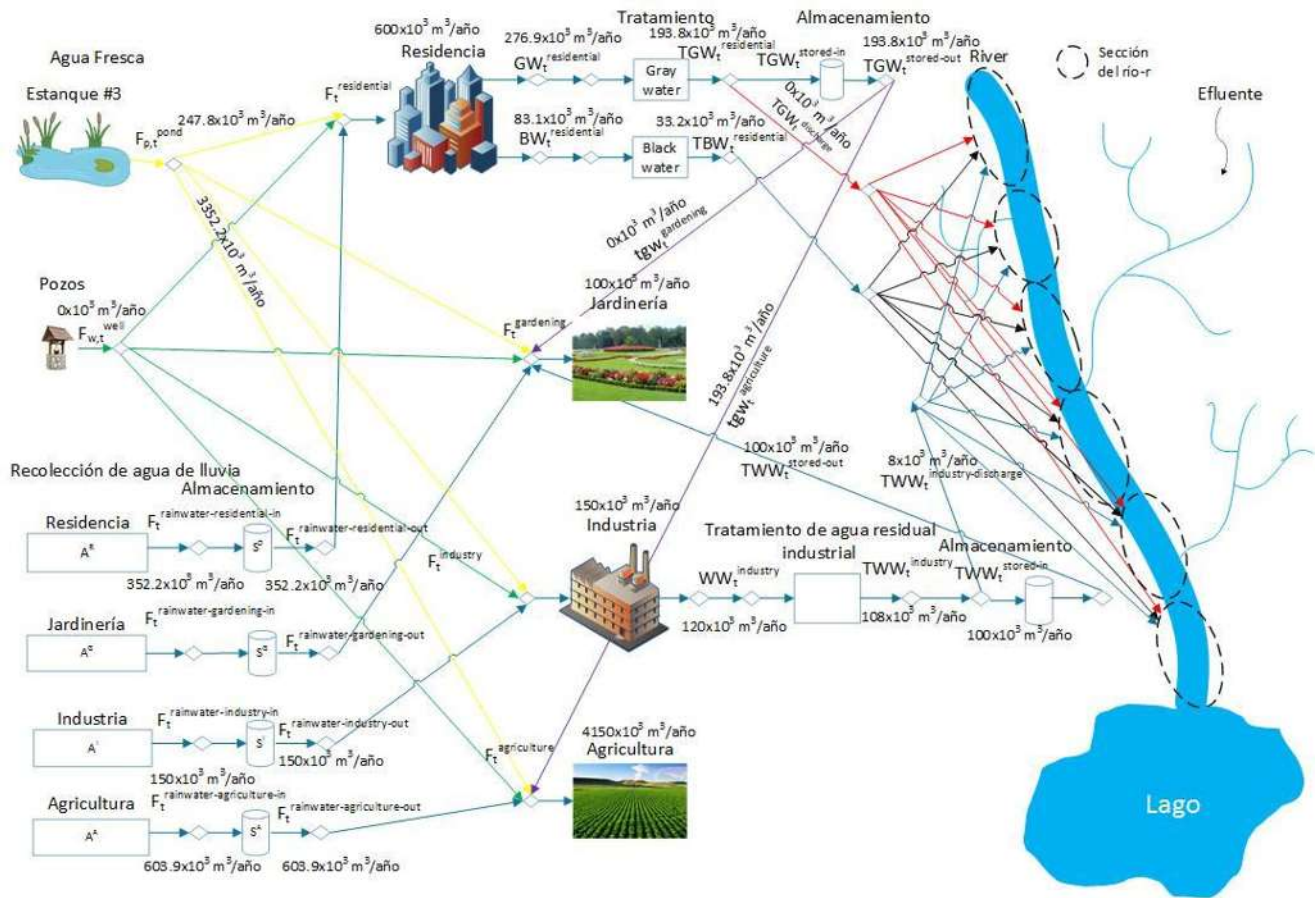


Figura 10. Solución de Escenario C.

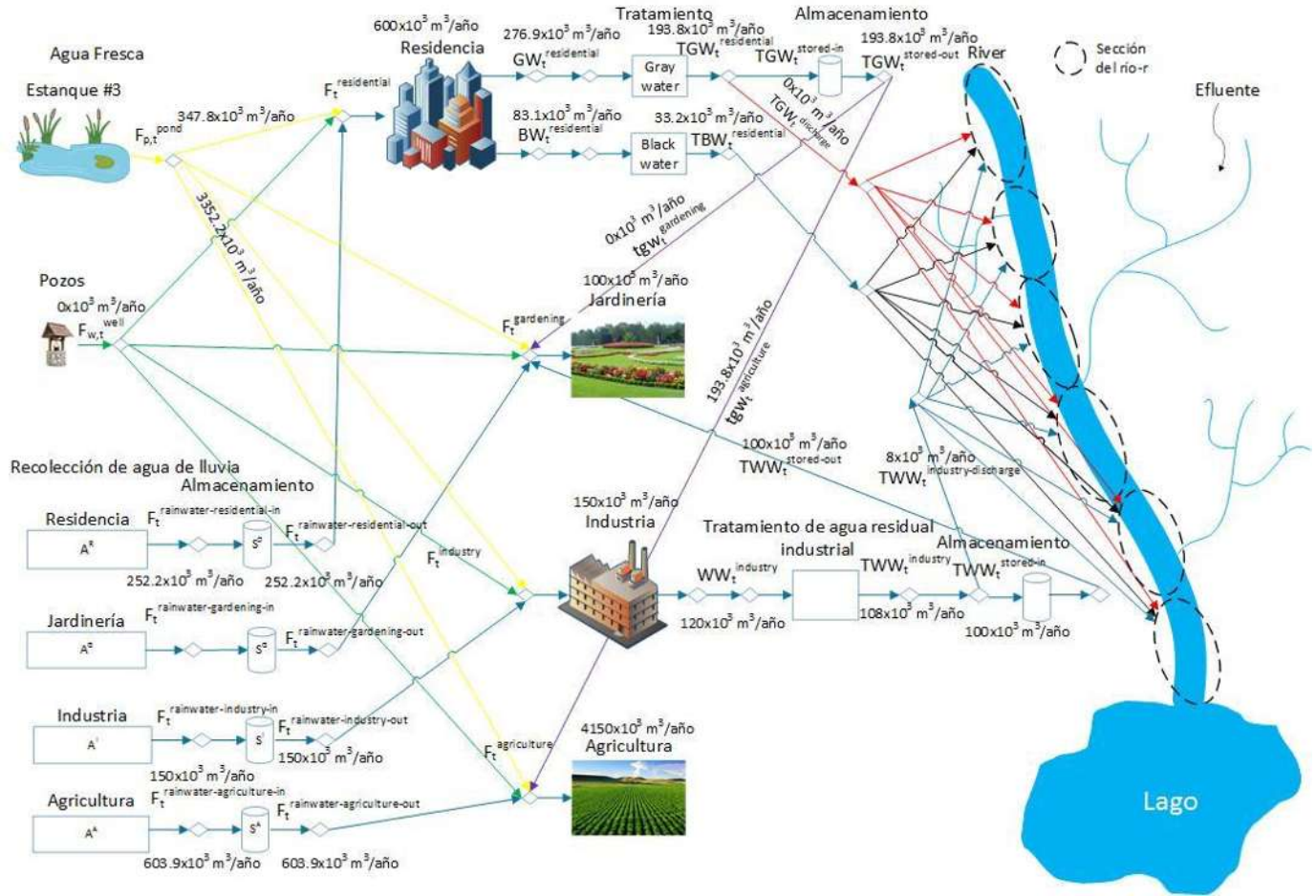


Figura 11. Solución de Escenario D.

Además el enfoque propuesto permite analizar la concentración de los contaminantes a través de las secciones del río. En este caso, al minimizar el TAC toda el agua gris tratada es reusada, sin embargo, el agua negra y el agua residual proveniente de la industria que son tratadas se descargan en secciones específicas del río para ahorrar de esta forma costos asociados a bombeo (ver **Tabla 2**). En el caso de minimizar TFW, toda el agua gris tratada es también reusada, en el caso del agua negra tratada, permanece el mismo flujo ($32.231 \text{ m}^3 \times 10^3/\text{año}$) pero la descarga es distribuida en diferentes secciones del río. Sin embargo, el flujo del agua residual industrial es mayor ($102.650 \text{ m}^3 \times 10^3/\text{año}$) y también es descargada en diferentes secciones del río (ver **Tabla 3**).

Los resultados muestran diferentes concentraciones de los contaminantes (nitrógeno, azufre y arsénico) en el flujo de la disposición final, el cual corresponde a la sección número 23 del río. Haciendo notar que los escenarios A-D tienen la misma concentración (1.362 ppm de nitrógeno, 0.808 ppm de azufre y 0.0360 de arsénico); la principal diferencia es entre el escenario A (minimizando TAC) y escenario E (minimizando TFW). En el escenario E, la concentración de los contaminantes al final del río son 1.472 ppm para nitrógeno, 0.880 ppm para azufre y 0.035 para arsénico. Para el caso cuando es minimizado el TAC, el consumo de agua es mayor y es por eso que la concentración de los contaminantes de nitrógeno y azufre es menor que al minimizar el agua fresca. Para el arsénico, es diferente, ya que en este caso la concentración al minimizar el TAC es mayor que al minimizar el TFW.

Tabla 2. Resultados de la distribución de los diferentes flujos de agua residual tratada para el caso de mínimo TAC.

Agua gris tratada		Agua negra tratada		Agua residual industrial tratada	
Sección	Flujo, $\text{m}^3 \times 10^3/\text{año}$	Sección	Flujo, $\text{m}^3 \times 10^3/\text{año}$	Sección	Flujo, $\text{m}^3 \times 10^3/\text{año}$
0	0	14	33.231	13	8

Tabla 3. Resultados de la distribución de los diferentes flujos de agua residual tratada para el caso del mínimo TFW.

Agua gris tratada		Agua negra tratada		Agua residual industrial tratada	
Sección	Flujo, x 10 ³ m ³ /y	Sección	Flujo, x 10 ³ m ³ /y	Sección	Flujo, x 10 ³ m ³ /y
0	0	9	0.743	5	1.755
		10	0.743	7	0.328
		11	26.543	9	5.426
		12	0.745	10	5.426
		13	0.744	11	41.134
		14	0.744	12	5.431
		15	0.743	13	5.429
		16	0.743	14	5.427
		17	0.742	15	5.425
		18	0.742	16	5.424
				17	5.423
			33.231	18	5.421
				19	3.814
				20	2.345
				21	2.249
				22	2.148

Finalmente, la situación actual no involucra agua de lluvia recolectada ni tampoco el reúso de agua, en este caso el costo es \$ 858,350,000/año; para el escenario A, el costo disminuye un 20.0% pero se requiere una inversión de \$686,510,000/año. De manera similar, para el escenario E, el agua fresca total decrece un 30.4% en la situación actual pero se necesita una inversión de \$14,061,000,000/y.

8. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un modelo de optimización para el apropiado uso del agua en sistemas macroscópicos involucrando las interacciones con los alrededores de la cuenca de agua. El modelo propuesto incorpora el manejo óptimo del agua de las fuentes existentes e involucra la incorporación de fuentes alternas como agua recirculada o agua pluvial recolectada. Una de las mayores contribuciones presentadas en el enfoque propuesto es que involucra la interacción con los alrededores de la cuenca hidrológica a través de los usos del agua y las descargas e incorpora restricciones ambientales a lo largo del río. De esta manera, para una interacción apropiada del sistema de manejo del agua, el modelo de optimización propuesto ha sido formulado con un enfoque multi-objetivo y se propone un método adecuado para mostrar los resultados a partir de una curva Pareto donde se muestran las soluciones óptimas y se busca compensar ambos objetivos, asegurando de esta forma, que la decisión que se toma es la que mejor satisface los requerimientos específicos.

Se considera un caso de estudio en México para la aplicación del enfoque propuesto. Los resultados mostrados en la curva Pareto permiten identificar soluciones interesantes desde los puntos de vista económicos y ambientales. También se ha destacado la importancia de considerar de manera simultánea las interacciones del sistema del manejo del agua junto con los alrededores de la cuenca de agua. Además de la importancia de incorporar los costos de tubería y bombeo para identificar el compromiso entre el impacto ambiental y el costo total anual.

Haciendo notar que para un trabajo futuro es necesario incluir un análisis estocástico que involucre la incertidumbre del sistema. Además la dinámica del sistema se debe mejorar en los estudios futuros. Así como la huella del agua y otras medidas ambientales se pueden incluir en el estudio.

9. Nomenclatura

Acrónimos (superíndices)

<i>A, agri</i>	Agricultura
<i>bw</i>	Agua negra
<i>cap</i>	Capacidad
<i>D</i>	Descargas directas
<i>G, gar</i>	Jardinería
<i>GW</i>	Agua gris
<i>H</i>	Descargas residenciales
<i>I</i>	Industrial
<i>In</i>	Entradas
<i>L</i>	Pérdidas
<i>Out</i>	Salidas
<i>p</i>	Precipitación
<i>R, res</i>	Residencial
<i>t</i>	Flujo tratado
<i>tbw</i>	Agua negra tratada
<i>tgw</i>	Agua gris tratada
<i>tww</i>	Agua residual tratada
<i>U</i>	Usos
<i>ww</i>	Agua residual

Variables

<i>A</i>	Área condicionada para recolección de agua pluvial
<i>BW^{res}</i>	Flujo de agua negra tratada proveniente del sector residencial

$Cost$	Costo
f^{cap}	Capacidad para bombeo
F, f	Flujo
GW	Flujo para el tratamiento de agua gris
$Q_{r,t}$	Salida de agua de la sección del río r en un periodo de tiempo t
TAC	Costo total anual
$TotFresh$	Flujo total de agua fresca
S	Flujo del agua almacenada
$TBW_t^{discharge}$	Flujo del agua negra tratada que es descargada en las diferentes secciones del rio en el periodo de tiempo t
$tbw_{r,t}^{discharge-reach}$	Flujo de agua negra tratada que es distribuida en alguna sección del río r durante el periodo de tiempo t
tgw	Flujo del agua gris tratada proveniente del sector residencial que es reutilizada
$TGW_t^{discharge}$	Flujo del agua gris tratada que es descargada en las diferentes secciones del rio en el periodo de tiempo t
$tww_{r,t}^{discharge-reach}$	Flujo de agua residual proveniente de la industria tratada que es distribuida en alguna sección del río r durante el periodo de tiempo t
$TWW_t^{industry}$	Flujo de agua residual tratada proveniente de la industria que está disponible para usos futuros durante el periodo de tiempo t
$V_{r,t}$	Usos por alguna sección del río r durante el periodo de tiempo t
$U_{r,trib,t}$	Flujo descargado desde cualquier efluente $trib$ hacia la sección del río r durante el periodo de tiempo t

WW^{ind}	Flujo del tratamiento de agua residual proveniente del sector industrial
$X_{c,r,t}^{reach}$	Composición de la salida de agua del contaminante c de cualquier sección del río r durante el periodo de tiempo t
$k_c(X_{c,r,t}^{reach})^{\sigma_c}$	Termino reactivo para considerar las reacciones químicas y bioquímicas que se llevan a cabo en la sección del río
Parámetros	
a^A	Costo fijo unitario para el área para la recolección de agua pluvial
A^{MAX}	Área máxima disponible
a^t	Costo fijo unitario para el tratamiento de agua
a^s	Costo fijo unitario para el almacenamiento de agua de lluvia captada
ap	Costo fijo unitario para tubería desde la fuente hasta el usuario
b^A	Costo variable unitario para el área para la recolección de agua pluvial
b^t	Costo variable unitario para el tratamiento de agua
b^s	Costo variable unitario para el almacenamiento de agua de lluvia captada
BW^{MAX}	Capacidad máxima disponible para las unidades de tratamiento de agua negra
b_p	Costo variable unitario para tubería desde la fuente hasta el usuario
C	Exponente para tener en cuenta las economías de escala
$D_{r,t}$	Descargas directas desde cualquier sección r durante un periodo de tiempo t
F	Flujo necesario para diferentes propósitos
f^{MAX}	Capacidad máxima disponible para el segmento de tubería desde la fuente hasta el usuario

$FT_{r,trib,t}$	Flujo de descargas de los efluentes <i>trib</i> a cualquier sección <i>r</i> durante el periodo de tiempo <i>t</i>
GW^{MAX}	Capacidad máxima disponible para las unidades de tratamiento para agua gris
$H_{r,t}$	Descargas residenciales a cualquier sección <i>r</i> durante el periodo de tiempo <i>t</i>
$I_{r,trib,t}$	Flujos de descargas de las industrias a cualquier efluente <i>trib</i> hacia alguna sección del río <i>r</i> durante el periodo de tiempo <i>t</i>
k_F	Factor utilizado para anualizar la inversión
$L_{r,t}$	Pérdidas de cualquier sección <i>r</i> durante el periodo de tiempo <i>t</i>
$P_{r,t}$	Precipitación de la sección del río <i>r</i> durante el periodo de tiempo <i>t</i>
R_t	Factor de precipitación durante el periodo de tiempo <i>t</i>
S^{S-MAX}	Capacidad máxima disponible para los dispositivos de almacenamiento
S	Flujo descargado
UC	Costo del agua de una fuente fresca
UPC	Costo de operación para la tubería desde un estanque hasta un usuario
URC	Costo de operación para la tubería desde el agua de lluvia captada hasta un usuario
$UTBWC_{r,t}^{discharge-reach}$	Costo de operación para la tubería desde el agua negra tratada hasta la descarga a cualquier sección del río <i>r</i> durante el periodo de tiempo <i>t</i>
$UTGWC$	Costo de operación para la tubería desde el agua gris tratada hasta un usuario
$UTWWC$	Costo de operación para la tubería desde el agua residencial tratada proveniente de la industria hasta un usuario

UWC	Costo de operación para la tubería desde un pozo w a un usuario
VC^t	Costo de operación para el tratamiento de agua
WW^{MAX}	Capacidad máxima disponible para las unidades de tratamiento de agua residual industrial
X	Composición del contaminante
$X_c^{reach-mx}$	Máxima composición de salida del agua de un contaminante c
$X_{c,r,trib,t}^{Su}$	Composición del contaminante c en flujos sin tratamiento para cualquier efluente $trib$, de cualquier sección r durante el periodo de tiempo t

Variables binarias

y^A	Variable binaria para activar el área de cada sector
y^t	Variable binaria para activar las unidades de tratamiento para el agua
y_p^p	Variable binaria para activar las tuberías de una fuente hacia un usuario
y^s	Variable binaria para activar el sector de almacenamiento

Símbolos griegos

α	Fracción que es asociada a las pérdidas de agua a través de un sector
β	Fracción de agua que puede ser tratada para uso futuro

Conjuntos

C	Conjunto para los diferentes contaminantes del río ($c c=1,\dots,C$)
P	Conjunto de los estanques disponibles ($p p=1,\dots,P$)
R	Conjunto de las secciones del río disponibles ($r r=1,\dots,R$)
T	Conjunto de los periodos de tiempo en años ($t t=1,\dots,T$)
$TRIB$	Conjunto para los efluentes en el río ($trib trib=1,\dots,TRIB$)
W	Conjunto de los pozos disponibles ($w w=1,\dots,W$)

10. Bibliografía

- Abdulla FA, Al-Shareef AW (2006) Assessment of rainwater roof harvesting systems for household water supply in Jordan. *Urban Water Management* 292-300
- Agrofoti E, Diamadopoulos E (2012) A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete. *Agricultural Water Management* 105: 57-64
- Alnouri SY, Linke P, El-Halwagi M (2014) Water integration in industrial zones: a spatial representation with direct recycle applications. *Clean Technologies and Environmental Policy* 16(8): 1637-1659
- Al Khamisi SA, Prathapar SA, Ahmed M (2013) Conjunctive use of reclaimed water and groundwater in crop rotations. *Agricultural Water Management* 116: 228-234
- Appan A (2000) A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses. *Urban Water Management* 4: 317-321
- Arredondo-Ramírez K, Rubio-Castro E, Nápoles-Rivera F, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi MM (2015) Optimal dosing of agricultural water systems with multiperiod collection, storage, and distribution. *Agricultural Water Management* 161-172
- Baccini P, Brunner P (1991) *Metabolism of the Anthroposphere*. Springer-Verlag, Berlín, Germany
- Bocanegra-Martínez A, Ponce-Ortega JM, Nápoles-Rivera F, Serna-González M, Castro-Montoya AJ, El-Halwagi MM (2014) Optimal design of rainwater collecting systems for domestic use into a residential development. *Resources, Conservation and Recycling* 84: 44-56
- Boix M, Montastruc L, Pibouleau L, Azzaro-Pantel C, Domenech S (2012) Industrial water management by multiobjective optimization: From individual to collective solution through eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production* 22: 85-97
- Brooke A, Kendrick D, Meeraus A, Raman R (2016) *GAMS. A user's guide*. Washington, DC, USA

- Burgara-Montero O, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi MM (2012) Optimal design of distributed treatment systems for the effluents discharged to the rivers. *Clean Technologies and Environmental Policy* 14: 925-942
- Cheng CL, Liao MC, Lee MC (2006) A quantitative evaluation method for rainwater use guideline. *Engineering Research and Technology* 27: 209-218
- Chilton JC, Maidment GG, Marriott D, Francis A, Tobias G (1999) Case study of a rainwater recovery system in a commercial building with a large roof. *Urban Water Management* 1: 345-354
- CONAGUA, 2012. National Water Council. Atlas of Water in Mexico, 2012. Available at. www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo20.html (Accesses February 2016)
- Domènech L, Heijnen H, Saurí D (2012) Rainwater harvesting for human consumption and livelihood improvement in rural Nepal: benefits and risks. *Water and Environmental Journal* 26: 465-472
- Domènech L, Saurí D (2011) A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the metropolitan area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production* 19: 598-608
- Eroksuz E, Rahman A (2010) Rainwater tanks in multi-unit buildings: a case study for three Australian cities. *Resources, Conservation and Recycling* 54: 1449-52
- Foo DCY (2008) Flowrate targeting for threshold problems and plant-wide integration for water network synthesis. *Journal of Environmental. Management* 88: 253-274
- Foo DCY (2009) State-of-the-art review of pinch analysis techniques for water network synthesis. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 45: 62-71
- Fu J, Cai T, Xu Q (2012) Coupling multiple water-reuse network designs for agile manufacturing. *Computers and Chemical Engineering* 45: 62-71
- García-Montoya M, Bocanegra-Martínez A, Nápoles-Rivera F, Serna-González M, Ponce-Ortega JM, El-Halwagi MM (2015) Simultaneous design of water reusing and

- rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers and Chemical Engineering* 76: 104-116
- García-Montoya M, Ponce-Ortega JM, Nápoles-Rivera F, Serna-González M, El-Halwagi MM (2015) Optimal design of reusing water systems in a housing complex. *Clean Technologies and Environmental Policy* 17: 343-357
- Gows JF, Majozi T, Foo DCY, Chen C-L, Lee J-Y (2010) Water minimization techniques for batch processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2010; 49: 8877-8893
- Hurimann A (2011) Household use of and satisfaction with alternative water sources in Victoria Australia. *Journal of Environmental. Management* 92: 2691-2697
- Jezowski J (2010) Review of water network design methods with literature annotations. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 49: 4475-4516
- Jhorar RK, Smit AAMFR, Roest CWJ (2009) Assessment of alternative water management options for irrigated agriculture. *Agricultural Water Management* 96: 975-981
- Lampert C, Brunner PH (1999) Material accounting as a policy tool for nutrient management in the Danube Basin. *Water Science and Technology* 40: 43-49
- Lira-Barragán LF, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi MM (2011) Synthesis of water networks considering the sustainability of the surrounding watershed. *Computers and Chemical Engineering* 35: 2837-2852
- López-Díaz DC, Lira-Barragán LF, Rubio-Castro E, Ponce-Ortega JM, El-Halwagi MM (2015) Synthesis of eco-industrial parks interacting with a surrounding watershed. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 3: 1564-1578
- López-Villarreal F, Lira-Barragán LF, Rico-Ramírez V, Ponce-Ortega JM, El-Halwagi MM (2014) An MFA optimization approach for pollution trading considering the sustainability of the surrounded watersheds. *Computers and Chemical Engineering* 63: 140-151.
- Lovelady EM, El-Baz AA, El-Monayeri D, El-Halwagi MM (2009) Reverse problem formulation for integrating process discharges with watersheds and drainage systems: Managing phosphorus in lake Mazala. *Journal of Industrial Ecology* 13: 914-927

- Martínez-Gómez J, Burgara-Montero O, Ponce-Ortega JM, Nápoles-Rivera F, Serna-González M, El-Halwagi MM (2013) On the environmental, economic and safety optimization of distributed treatment systems for industrial effluents discharged to watersheds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industry* 26: 908-923
- Nápoles-Rivera F, Rojas-Torres MG, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi MM (2015) Optimal design of macroscopic water networks under parametric uncertainty. *Journal of Cleaner Production* 88: 172-184
- Nápoles-Rivera F, Serna-González M, El-Halwagi MM, Ponce-Ortega JM (2013) Sustainable water management for macroscopic systems. *Journal of Cleaner Production* 47: 102-117
- Ng DKS, Foo DCY, Tan RR, El-Halwagi MM (2010) Automated targeting technique for concentration- and property- based total resource conservation network. *Computers and Chemical Engineering* 34: 825-45
- Oliveira-Esquerre KP, Kiperstol A, Mattos MC, Cohim E, Kalid R, Sales EA, Pires VM (2011) Taking advantage of storm and waste water retention basins as part of water use minimization in industrial sites. *Resources, Conservation and Recycling* 55: 316-324
- Rahman A, Keane J, Imteaz MA (2012) Rainwater harvesting in Greater Sydney: water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling* 61: 16-21
- Raul SK, Panda SN, Holländer H, Billib M (2011) Integrated water resource management in a major canal command in eastern India. *Journal of Hydrology* 25: 2551-2562
- Rojas-Torres MG, Nápoles-Rivera F, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi MM (2014) Optimal design of sustainable water systems for cities involving future projections. *Computers and Chemical Engineering* 69: 1-15
- Rubio-Castro E, Ponce-Ortega J M, Nápoles-Rivera F, El-Halwagi MM, Serna-González M, Jimenez-Gutiérrez A (2010) Water integration of eco-industrial parks using a global optimization approach. *AIChE Journal* 40: 994-9960
- Santos-Pereira L, Oweis T, Zairi A (2002) Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 57: 175-206

- SEMARNAT (2014) Mexican council for the environment and natural resources. Available at: www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/05_serie/yelmedioambiente/4_agua_v08.pdf. (Accessed February, 2016)
- Zaneti R, Etchepare R, Rubio J (2012) More environmentally friendly vehicle washes; water reclamation. *Journal of Cleaner Production* 37: 115-124
- Zhang W, Chung G, Pierre-Louis P, Bayraksan G, Lansey K (2013) Reclaimed water distribution network design under temporal and spatial growth and demand uncertainties. *Environmental Modelling & Software*. 49: 103-117

11. Apéndice A

Tabla A1. Parámetros usados para el caso de estudio.

Concepto	Valor
Fracción de agua negra proveniente de agua de uso residencial	0.3
Factor de conversión de uso residencial	0.6
Factor de conversión de agua gris proveniente de la residencia	0.7
Factor de conversión de agua negra proveniente de la residencia	0.4
Factor de conversión de la industria	0.8
Factor de conversión de agua residual proveniente de la industria	0.9
Precipitación (m)	0.7549
Área máxima de uso residencial, m ²	625
Área máxima de uso en jardinería, m ²	200
Área máxima de uso industrial, m ²	1000
Área máxima de uso en agricultura, m ²	800
Flujo para usos residenciales, m ³ /año	600x10 ³
Flujo para usos en jardinería, m ³ /año	100x10 ³
Flujo para usos en industria, m ³ /año	150x10 ³
Flujo para usos en agricultura, m ³ /año	4150x10 ³
Almacenamiento máximo en residencia, m ³ /año	2.5x10 ³
Almacenamiento máximo en jardinería, m ³ /año	1x10 ³
Almacenamiento máximo en industria, m ³ /año	1135.6x10 ³
Almacenamiento máximo en agricultura, m ³ /año	1000x10 ³
Costo de agua fresca proveniente de estanques, \$/m ³	0.653
Costo de agua fresca proveniente de pozos, \$/m ³	0.73136
Costo de tratamiento de agua gris, \$/m ³	176
Costo de tratamiento de agua negra, \$/m ³	180
Costo de tratamiento de agua residual proveniente de la industria, \$/m ³	3.5

Costo de bombeo, \$/m³				
Estanque/Pozo	Residencia	Jardinería	Industria	Agricultura
1	2.3	2.3	2.3	2.5
2	2.3	2.3	2.3	1
3	1	1	1	5
4	4.6	4.6	4.6	2.5
5	2.3	2.3	1	2.5
Agua de lluvia recolectada			Agua tratada reusada	
Residencia	2		Agua gris	3
Jardinería	2		Agua residual	3
Industria	2			
Agricultura	2.5			
Descargas				
Sección	Agua gris tratada	Agua negra tratada	Agua residual tratada	
1-5	7	7.5	7	
6-10	5	5.5	5	
11-15	3	3.5	3	
16-20	3	3.5	3	
21-23	5	5.5	5	

12. Apéndice B

An optimization approach for the sustainable water management at macroscopic level accounting for the surrounding watershed

Esbeydi Villacorta-García¹ · José María Ponce-Ortega¹ 

Received: 30 May 2016 / Accepted: 20 August 2016
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Abstract Water is one of the most important resources in the world because it is essential for the life. Recently, several strategies for the proper use of water in different sectors (industrial, agricultural and domestic) have been reported, which involve options such as recycling, reusing and regeneration. However, the overall water management in a macroscopic level has received lower attention. In the macroscopic level, numerous water uses are involved and several sources of freshwater can interact to satisfy the freshwater demands, where also recycling, reusing and regeneration strategies can be implemented. Therefore, in this paper is proposed a new optimization formulation for the proper use of water in a macroscopic level involving water recycling, reusing and regeneration as well as accounting for the impact in the surrounding watershed. A case study from the central-west part of Mexico was analyzed, and the results show that is possible to reduce the freshwater consumption by 21 % with an investment of US \$686,510,000/year.

Keywords Water management · Rainwater harvesting · Optimization · Recycling · Reuse

Abbreviations

Acronyms (superscripts)

A, agri Agriculture
bw Black water
cap Capacity

D Direct discharges
G, gar Gardening
GW Greywater
H Residential discharges
I Industrial
In Inlet
L Losses
Out Outlet
p Precipitation
R, res Residential
r Treated flowrate
tbw Treated black water
tgw Treated greywater
trw Treated wastewater
U Uses
ww Wastewater

Variables

A Conditioned area for rainwater harvesting
BW^{res} Flowrate for treated black water from the residential sector
Cost Cost
 f^{cp} Capacity for piping
F, f Flowrate
GW Flowrate for the treating greywater
 $Q_{i,t}$ Outlet water from the reach i over the time period t
TAC Total annual cost
TotFresh Total freshwater flowrate
S Flowrate for the stored water
TBW _{i} ^{discharge} Flowrate for treated black water that is sent to discharge into different reaches of a river over the time period t

 José María Ponce-Ortega
jponceo@umich.mx

¹ Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico