



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**DESARROLLO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL REÚSO ÓPTIMO
DEL AGUA EN UNIDADES HABITACIONALES**

TESIS presentada por:

MARIANA GARCÍA MONTOYA

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

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor: **Doctor en Ciencias en Ingeniería Química Medardo Serna González**

Co-asesor: **Doctor en Ciencias en Ingeniería Química Fabricio Nápoles Rivera**

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR OPTIMAL REUSING WATER INTO HOUSING UNITS

Mariana García Montoya

February 2015

Master in Science in Chemical Engineering

Directed by: Dr. Medardo Serna González

Co-advised by: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

Excessive demand for water worldwide has promoted the development of strategies for their efficient use. Particularly in the case of industry, have been proposed strategies for reuse and optimal regeneration of water in industrial processes, which has significantly reduced the cost of fresh water required and of wastewater discharged, with consequent financial savings and reduction environmental impact. Based on the success of the industrial area, in this research project a developing optimization models for optimal integration of water in a dwelling unit is proposed, considering strategies segregation, reuse, regeneration and optimal planning of the distribution and storage of this important natural resource. To demonstrate the feasibility and application of the developed mathematical model, a case study of Morelia, Michoacán, Mexico is presented. The results indicate that there are significant savings of fresh water and, therefore, cost savings and reduced environmental impact.

Keywords: Reuse, Reclaimed water, Storage, Housing complex, Optimization.

RESUMEN

DESARROLLO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL REÚSO ÓPTIMO DEL AGUA EN UNIDADES HABITACIONALES

Mariana García Montoya

Febrero 2015

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. Medardo Serna González

Co-asesorada por: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

La demanda excesiva de agua a nivel mundial ha promovido el desarrollo de estrategias para su uso eficiente. Particularmente, en el caso de la industria, se han propuesto estrategias para el reúso y regeneración óptima del agua en los procesos industriales, lo que ha reducido significativamente los gastos de agua fresca requerida y del agua residual descargada, con los consiguientes ahorros económicos y reducción del impacto ambiental. En base al éxito obtenido en el área industrial, en este proyecto de investigación se propone el desarrollo de modelos de optimización para la integración óptima del agua en una unidad habitacional, considerando estrategias de segregación, reúso, regeneración y planeación óptima de la distribución y almacenamiento de este importante recurso natural. Para demostrar la viabilidad y aplicación del modelo matemático desarrollado, se presenta un caso de estudio de Morelia, Michoacán, México. Los resultados indican que existen ahorros significativos de agua fresca y, por consiguiente, ahorros económicos y un menor impacto ambiental.

Palabras clave: Reúso, Agua regenerada, Almacenamiento, Complejo habitacional, Optimización.

Dedico este trabajo a:

A mi mamá, Sara, por tu amor, apoyo y motivación constante, el logro de éste y anteriores trabajos es el reflejo de tu esfuerzo y de las mayores lecciones de mi vida. Mi gran admiración para ti.

A mi amor, David, por hacer cada instante indescriptible, por tu apoyo y por ser una gran compañía, sobre todo de corazón. Te amo.

A mis hermanas, Alondra y Paola, por su cariño, su compañía y confianza. Son mis grandes amigas.

ÍNDICE

Resumen.....	iii
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.....	viii
Nomenclatura.....	x
Agradecimientos.....	xvi
CAPÍTULO 1	1
Generalidades.....	2
Introducción.....	3
Antecedentes.....	6
Estado del arte.....	8
Marco teórico.....	10
Aguas residuales domésticas.....	10
Tratamientos de aguas residuales.....	12
1. Tratamientos fisicoquímicos.....	12
2. Tratamientos biológicos.....	15
3. Software GAMS®.....	20
4. Problema mixto entero no lineal.....	20
Planteamiento del problema.....	20
Hipótesis.....	22
Objetivos.....	22
Metodología.....	23
CAPÍTULO 2	24
Reúso de agua.....	25
Modelo matemático.....	26
Caso de estudio.....	34
CAPÍTULO 3	45
Implementación simultánea del reúso de agua y captación de agua de lluvia...	46

Modelo matemático.....	47
Caso de estudio	54
CAPÍTULO 4	78
Conclusiones y recomendaciones.....	79
Referencias	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Reúso de agua en a) Industria y b) Unidad habitacional.	4
Figura 1.2. Uso de agua para diferentes actividades domésticas (ver EPA, 2008).	10
Figura 1.3. Representación esquemática de un humedal artificial.	12
Figura 1.4. Procesos aerobios: a) lodos activados y b) bioreactor de membrana sumergida.....	17
Figura 1.5. Sistema de reactor anaerobio de flujo ascendente.....	19
Figura 2.1. Representación esquemática del reúso de agua en dos unidades habitacionales.....	26
Figura 2.2. Representación de las unidades en el caso de estudio de Morelia.	35
Figura 2.3. Diagrama de flujo con la minimización del Costo Total Anual (Escenario G)	38
Figura 2.4. Diagrama de flujo con la minimización de agua fresca (Escenario A).	39
Figura 2.5. Diagrama de flujo para Escenario B.	40
Figura 2.6. Soluciones óptimas para el reúso del agua.	42
Figura 3.1. Representación esquemática del reúso de agua y captación de agua de lluvia en un complejo habitacional.	47
Figura 3.2. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio.....	71
Figura 3.3. Costos incluidos en el costo total anual para los escenarios X, Y, Z.....	72
Figura 3.4. Costos incluidos en el costo total anual para los escenarios A, D, E.	72
Figura 3.5. Porcentaje de fuentes de agua para los diferentes escenarios.	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características de las aguas residuales domésticas para diferentes poblaciones.	13
Tabla 2.1. Resultados de costos para el caso de estudio.	37
Tabla 2.2. Flujos de agua para el caso de estudio.	41
Tabla 2.3. Capacidad de los tanques de almacenamiento de Escenario G (minimización del Costo Total Anual).	42
Tabla 2.4. Capacidad de los tanques de almacenamiento de Escenario A (minimización de agua fresca).	43
Tabla 2.5. Capacidad de los tanques de almacenamiento de Escenario B.	44
Tabla 3.1. Precipitación promedio en la ciudad de Morelia.	54
Tabla 3.2. Áreas de captación disponibles para el complejo residencial “Villas del Pedregal”	55
Tabla 3.3. Comparación de costos para los escenarios X, Y, Z y A.	57
Tabla 3.4. Comparación de flujos para los escenarios X, Y, Z y A.	59
Tabla 3.5. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario A.	61
Tabla 3.6. Agua de lluvia recolectada en cada tanque por mes para el escenario A.	62
Tabla 3.7. Capacidad de las unidades de tratamiento para diferentes escenarios (m ³).	63
Tabla 3.8. Capacidad de los sistemas de almacenamiento para el agua regenerada para diferentes escenarios (m ³).	64
Tabla 3.9. Área de captación utilizada para los diferentes escenarios.	65
Tabla 3.10. Agua de lluvia recolectada en cada tanque por mes para el escenario E.	66
Tabla 3.11a. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario E.	67
Tabla 3.11b. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario E (continuación).	68
Tabla 3.12. Comparación de costos para diferentes escenarios de la curva Pareto	

caso de estudio.	69
Tabla 3.13. Comparación de flujos para diferentes escenarios de la curva Pareto del caso de estudio.	70
Tabla 3.14. Agua de lluvia recolectada en cada tanque por mes para el escenario D...	74
Tabla 3.15a. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario D.....	76
Tabla 3.15b. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario D (continuación).....	77

NOMENCLATURA

Acrónimos

<i>cap</i>	Capacidad
<i>capPg</i>	Capital para tuberías de recirculación
<i>capPW</i>	Capital para tuberías de salida de los usos
<i>Capt</i>	Captación de agua de lluvia
<i>capTanks</i>	Capital para tanques de almacenamiento
<i>capTU</i>	Capital para unidades de tratamiento
<i>ElevStorage</i>	Dispositivo de almacenamiento elevado
<i>in</i>	Entrada
<i>max</i>	Máximo
<i>opTU</i>	Operación de unidades de tratamiento
<i>out</i>	Salida
<i>Treat</i>	Tratamiento de agua
<i>Stg</i>	Almacenamiento

Índices

<i>h</i>	Horas de un día
<i>i</i>	Usos de agua; inodoro, ducha, lavavajillas, lavandería y jardinería (sink)
<i>j</i>	Unidad de vivienda o áreas de captación
<i>k</i>	Unidad de tratamiento de agua

l Número de unidades de almacenamiento para agua de lluvia

m Meses del año

Variables

A_j Área usada de captación de aguas pluviales, m²

$C_{k,i,j,i}^{capPg}$ Costo de capital para tuberías de recirculación, US\$

$C_{k,i,j,i}^{cappump}$ Costo de capital para bombas para recirculación, US\$

$C_{j,i}^{capPW}$ Costo de capital para tuberías de salida de los usos, US\$

$C_{k,i}^{capTanks}$ Costo de capital para tanques de almacenamiento, US\$

$C_{k,i}^{capTU}$ Costo de capital para unidades de tratamiento, US\$

C^{FW} Costo de agua fresca, US\$

$C_{k,i}^{opTreat}$ Costo de operación para unidades de tratamiento, US\$

C^{PFW} Costo de bombeo del agua fresca, US\$

$C_{k,i,j,i}^{pumpg}$ Costo de bombeo para flujo de recirculación, US\$

$CapCost$ Costo de capital para áreas de captación, US\$

$E_{l,m}$ Flujo distribuido de agua de lluvia para cada almacenamiento, m³/mes

E_l^{cap} Flujo máximo de dispositivos de almacenamiento para el depósito elevado,
m³

$ElevStorageCost$	Costo de capital para el tanque elevado, US\$
$F_{h,m}$	Agua fresca consumida durante cada periodo de tiempo, m ³ /día
$f_{j,i,h,m}$	Flujo de agua de entrada para cada uso, m ³ / día
$f_{j,i,t}$	Flujo de entrada de agua para cada uso, m ³ /día
F_t	Flujo de agua fresca, m ³ / día
$g_{k,i,j,i',h,m}$	Flujo de agua reciclada, m ³ / día
$g_{k,i,j,i',t}$	Flujo de agua reciclada, m ³ / día
$g_{k,i,i,j}^{cap}$	Capacidad para tuberías para flujo de recirculación, m ³ / día
$h_{k,i,h+hh,m}^{in}$	Flujo de agua de entrada a las unidades de tratamiento, m ³ / día
$h_{k,i,t+tt}^{in}$	Flujo de agua de entrada a las unidades de tratamiento, m ³ / día
$h_{k,i,h,m}^{out}$	Flujo de agua de salida a las unidades de tratamiento, m ³ / día
$h_{k,i,t}^{out}$	Flujo de agua de salida a las unidades de tratamiento, m ³ / día
$l_{k,i,t}$	Flujo de agua mezclado hacia cada unidad de tratamiento, m ³ / día
$L_{k,i}^{cap}$	Límite superior para la capacidad de las unidades de tratamiento, m ³ / día
$o_{j,l,m}$	Flujo de alimentación de agua de lluvia a cada almacenamiento, m ³ /mes
$O_{j,m}$	Agua de lluvia captada para cada locación, m ³ /mes

$U_{k,i,h,m}$	Flujo de agua después de la mezcla para cada tratamiento, m ³ /día
CF_1^{Storage}	Costo fijo unitario para tanques de almacenamiento, US\$
$Cost_{j,l}^{\text{pump}}$	Costo unitario de bombeo del área de captación de agua de lluvia a tanques de almacenamiento, US\$
$Cost_1^{\text{pump}}$	Costo unitario de bombeo de tanques de almacenamiento a tanque elevado, US\$
$Cost^{\text{treat}}$	Costo unitario para tratamiento de agua de lluvia, US\$
CV_j^{caption}	Costo variable unitario para el área de captación de agua de lluvia, US\$
$CV^{\text{ElevStorage}}$	Costo variable unitario para el tanque elevado, US\$
$CV_{j,l}^{\text{pipe}}$	Costo variable unitario para tuberías desde el área de captación hacia los tanques de almacenamiento, US\$
CV_1^{pipe}	Costo variable unitario para tuberías desde los tanques de almacenamiento hacia el tanque elevado, US\$
D_m	Días por mes
E^{max}	Flujo máximo permitido en una tubería para agua de lluvia, m ³
$FC_{k,i,j,i}^{\text{capPg}}$	Costo fijo unitario para tuberías para flujo de recirculación, US\$
$FC_{k,i,j,i}^{\text{cappump}}$	Costo fijo unitario para bombas para flujo de recirculación, US\$
$FC_{j,i}^{\text{capPW}}$	Costo fijo unitario para tubería para flujo de salida de usos, US\$

$FC_{k,i}^{capTU}$	Costo fijo unitario para unidades de tratamiento, US\$
H_y	Tiempo de operación anual
K_F	Factor para la anualización de los costos capitales, año ⁻¹
L_i^{max}	Límite máximo para las unidades de tratamiento, m ³
$m_{j,i,h,m}$	Demandas de agua para cada uso en las unidades, m ³ /día
$m_{j,i,t}$	Demanda de agua para cada uso, m ³ / día
O^{max}	Flujo máximo permitido en una tubería, m ³
P_m	Precipitación pluvial por mes, m
S^{max}	Límite superior para tanques de almacenamiento, m ³
STG_1^{max}	Capacidad máxima de almacenamiento para tanques, m ³
$VC_{k,i,j,i}^{capPg}$	Costo variable unitario para tubería para flujo de recirculación, US\$/m ³
$VC_{k,i,j,i}^{cappump}$	Costo variable unitario para bombas para flujo de recirculación, US\$/m ³
$VC_{j,i}^{capPW}$	Costo variable unitario para tubería para flujo de salida de usos, US\$/m ³
$VC_{k,i}^{capTU}$	Costo variable unitario para unidades de tratamiento, US\$/m ³
$VC_{k,i}^{Tanks}$	Costo variable unitario para tanques, US\$/m ³

Variables binarias

$V_{k,i}$	Variable binaria para la existencia de tanques de almacenamiento
$x_{k,i,j,i}$	Variable binaria para la existencia de nuevas tuberías para flujo de recirculación xiv
X_l	Variable binaria para la existencia de tuberías los tanques de almacenamiento al tanque elevado
$y_{k,i}$	Variable binaria para la existencia de unidades de tratamiento
y_j^{capt}	Variable binaria para la existencia de las áreas de captación de agua de lluvia
y_l^{stg}	Variable binaria para la existencia de dispositivos de almacenamiento para el agua de lluvia
$z_{j,i}$	Variable binaria para la existencia de nuevas tuberías para flujo de salida de los usos
$Z_{j,l}$	Variable binaria para la existencia de tuberías desde las áreas de captación hacia los tanques de almacenamiento

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores, Dr. José María Ponce Ortega, Dr. Fabricio Nápoles Rivera y Dr. Medardo Serna González por el apoyo, la transmisión de conocimientos y experiencias. Mi admiración y respeto para el excelente grupo de trabajo, donde además de observar la gran capacidad intelectual, he visto la gran empatía y calidad humana. Ha sido una experiencia sumamente gratificante y una gran elección formar parte del grupo.

Al Dr. Mahmoud El-Halwagi por su colaboración y la oportunidad de trabajar en su grupo de investigación. De igual manera, a la *Texas A&M University* por permitirme realizar la estancia de investigación.

A la Dra. Carmen Chávez Parga y al Dr. Agustín Castro Montoya por el seguimiento, revisiones y las aportaciones para la mejora del trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para realizar el grado de maestría.

A mis grandes amigos, Olimpia e Iván, por ser parte de este logro y compartir grandes momentos y conocimientos.

CAPÍTULO 1.

GENERALIDADES

El agua es un recurso vital para la supervivencia de los seres vivos y juega un papel preponderante en todas sus actividades. Del total de agua que hay en la tierra, el 97% se encuentra en océanos y sólo el 3% es agua dulce; de este 3%, el 2% está atrapado en forma de casquetes polares y tan sólo el 1 % del resto del agua dulce es subterránea, agua de lagos, aguas corrientes, manantiales y ríos (CONAGUA, 2011). Este pequeño porcentaje es el que corresponde al agua disponible para el uso humano.

Entonces, menos del 1% del agua que hay en el mundo debe satisfacer todas las necesidades del ser humano incluyendo los requerimientos de diversos sectores como la agricultura, la industria y las demandas domésticas (Ahmad y EL-Dessouky, 2008). Del total de agua destinada a diversas actividades directa o indirectamente relacionadas con el consumo humano, el 70 % se emplea para la agricultura, el 22 % es utilizado para la industria y sólo el 8% es el disponible para uso doméstico (Baroni *et al.*, 2007).

En general, el agua doméstica después de usarse da lugar a aguas residuales provenientes de viviendas y del sector de servicios. Las aguas residuales domésticas pueden ser de dos tipos: aguas grises y aguas negras; las primeras se refieren a las aguas de los baños, duchas, lavabos, lavadoras y fregaderos de cocina, las cuales son las menos contaminadas. Mientras que las aguas negras provienen del inodoro, por lo que contienen una gran cantidad de materia orgánica y organismos patógenos.

Las aguas grises representan cerca del 70% de las aguas residuales doméstica y tienen un gran potencial para su reutilización (EPA, 2014). El mayor porcentaje de agua gris es la que se emplea en el lavado de ropa, baño, cocina y el inodoro. A partir del conocimiento de la fuente de agua residual es posible aplicar un método de tratamiento que reduzca los contaminantes.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el enorme crecimiento de la población mundial, aunado a la disminución del agua debido a problemáticas globales como el cambio climático, así como al mal uso de este recurso ha propiciado que se tenga una enorme escasez del mismo. Por tal motivo, el uso adecuado del agua a nivel habitacional es un problema de importancia, siendo necesario desarrollar e implementar soluciones para satisfacer las demandas de este vital líquido.

Por otro lado, debido al problema de la disponibilidad del agua fresca o potable y a su alto costo, a nivel industrial recientemente se han propuesto una gran cantidad de metodologías para el reúso óptimo de este recurso (ver Dakwala *et al.*, 2009; Foo, 2009; Lovelady y El-Halwagi, 2009; Aviso *et al.*, 2010; Rubio-Castro *et al.*, 2012; Burgara-Montero *et al.*, 2013). En estas estrategias se han identificado sumideros de agua llamados en inglés “sinks”, los cuales representan unidades de procesos con diferentes requerimientos de agua fresca tanto en cantidad como calidad, representada esta última por especificaciones de composición o de otras propiedades. Después de procesar el agua que se les suministra, los *sinks* desechan enormes cantidades de este recurso que tiene diversos componentes o propiedades. De hecho, dicha agua comúnmente es considerada como agua residual, que es tratada para poder ser descargada en cuerpos de agua externos a plantas industriales. Para reusar esta agua en la industria química y de proceso se han propuesto redes de reciclaje, donde se reusa el agua proveniente de equipos de proceso en otros equipos que requieran agua considerando previamente el tratamiento de las diferentes aguas residuales a fin de reducir al máximo la cantidad de agua fresca usada y, al mismo tiempo, la cantidad de agua contaminada descargada al ambiente (ver **Figura 1.1a**). Nótese que existe un enorme número de posibilidades para satisfacer estos requerimientos; en este sentido, el uso de estrategias de optimización ha sido una metodología recurrente para resolver este problema (ver Ponce-Ortega *et al.*, 2009), dando lugar a soluciones basadas en el uso eficiente del agua con el menor costo posible (ver Lira-Barragán *et al.*, 2013; Rubio-

Castro *et al.*, 2011) o que cumplan algún otro criterio como la minimización del impacto ambiental global (Ponce-Ortega *et al.*, 2010; Vázquez-Castillo *et al.*, 2013).

A nivel habitacional sucede algo similar que en las plantas industriales. En las casas existen diferentes dispositivos que usan agua con diferentes especificaciones (ducha, lavamanos, lavaplatos, lavandería, jardinería e inodoro); así mismo, tales dispositivos generan aguas residuales con diferentes características, por ejemplo, aguas grises y aguas negras (Eriksson *et al.*, 2002).

Existen algunos trabajos que han propuesto la reutilización de las aguas grises para suministrar las demandas del inodoro y el riego de jardín, lo cual presenta beneficios en términos de la reducción de la demanda de agua en zonas urbanas (Penn *et al.*, 2013). El agua del inodoro, cuando no se trata antes de descargarse a los drenajes, contamina los ríos con la consiguiente pérdida de las funciones río abajo de este recurso hídrico (Fan *et al.*, 2006). A medida que la escasez y contaminación del agua es mayor en las ciudades, se hace indispensable contar con métodos más eficientes para el tratamiento y reúso de aguas residuales.

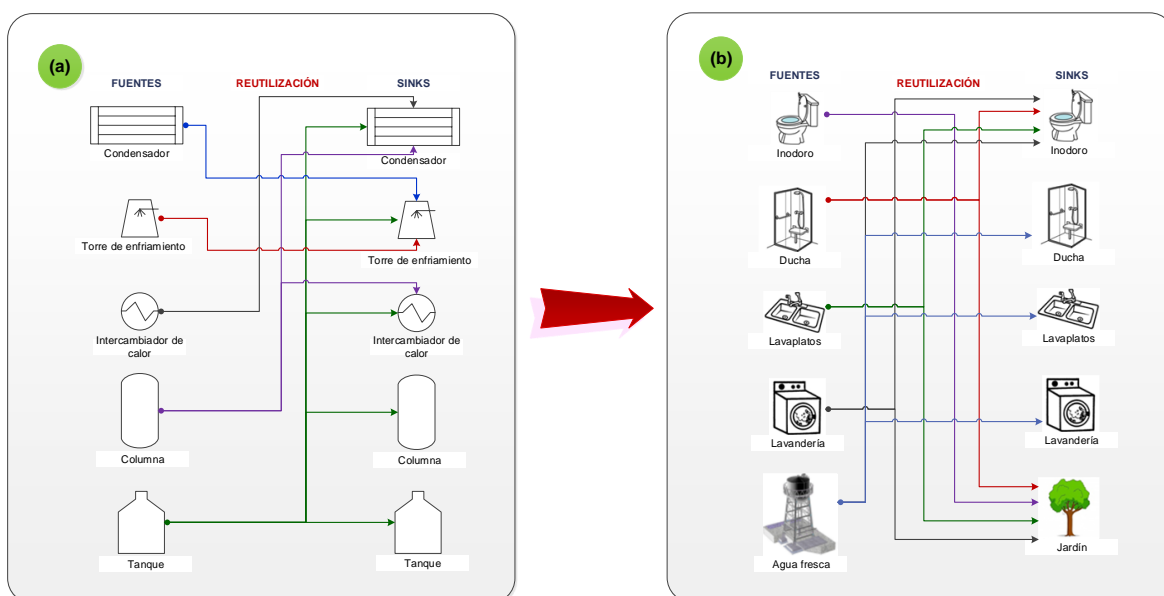


Figura 1.1. Reúso de agua en a) Industria y b) Unidad habitacional.

Es importante hacer notar que los procedimientos de reúso del agua antes mencionados no consideran una estrategia sistemática para el diseño óptimo de sistemas de reutilización de este recurso en las unidades habitacionales. Es decir, al mezclar todas las aguas residuales provenientes de las diferentes dispositivos consumidores de este recurso en una unidad habitacional, se combinan corrientes con diferentes propiedades, lo cual hace más complicado su tratamiento (lo cual no se hace en las industrias que operan de manera óptima). El no mezclar las diferentes corrientes de agua contaminada procedentes de las unidades habitacionales tiene la ventaja de reducir el costo de tratamiento, pero tiene la desventaja de que se requiere un mayor número de tuberías así como dispositivos de almacenamiento y control. Adicionalmente, para poder implementar un esquema de reúso óptimo del agua en las unidades habitacionales se debe considerar el almacenamiento y distribución óptimo del agua, debido a que el tiempo en el que se dispone el agua tratada y en el que se requiere el agua fresca para los diferentes usos no es el mismo.

En este sentido surgen diferentes preguntas como las siguientes:

- ¿Es posible implementar un sistema de reúso óptimo de agua en una unidad habitacional?
- ¿Será económicamente atractivo?
- ¿Cuál es su impacto ambiental global?
- ¿Qué tratamientos son requeridos?
- ¿Cuál es el efecto de los costos de las tuberías?
- ¿Qué almacenamiento se requiere?
- ¿Cuál es la planeación de la distribución óptima del agua almacenada?

Por lo tanto, en el presente proyecto de investigación se propone un modelo de optimización para el reúso óptimo del agua en unidades habitacionales (ver **Figura 1.1b**). En el modelo se deberá de considerar la minimización simultánea del costo total, así como del consumo de agua fresca. Para determinar el impacto económico se considerará el costo de agua fresca requerido por la unidad habitacional, el costo de tratamiento de las aguas residuales, el costo de tuberías nuevas y de bombeo, así

como el costo de almacenamiento del agua tratada. El impacto ambiental considerará el impacto por la descarga de agua residual al ambiente y el uso de agua fresca. Para resolver este problema se propone un modelo de programación matemática formal, el cual es general y permitirá dar respuesta a todas las interrogantes anteriormente mencionadas.

ANTECEDENTES

El manejo sustentable del agua representa un problema en la mayor parte del mundo por el crecimiento de la población, la creciente urbanización, el alto consumo de agua y el cambio climático. Aproximadamente, la extracción de agua en todo el mundo es de 4000 a 5000 km³ por año y el consumo anual de agua es de 2500 a 3000 km³ (Chaillou *et al.*, 2011), por lo que se deben aplicar estrategias que minimicen el consumo de agua fresca y que satisfagan las necesidades humanas. En México, el consumo de agua es de 100 a 400 L/habitante/día (CONAGUA, 2012).

El uso eficiente del agua es un elemento clave en los procesos industriales, porque es indispensable y está motivado por factores como la competitividad global y las regulaciones ambientales (Ponce-Ortega *et al.*, 2010). Las estrategias de uso eficiente y sustentable del agua que se han implementado con éxito en la industria pueden ser aplicadas en unidades habitacionales, a fin de desarrollar soluciones que resuelvan el problema ocasionado por el aumento en la demanda de agua y la menor disponibilidad de este recurso (Rubio-Castro *et al.*, 2012; Burgara-Montero *et al.*, 2013), tomando en consideración criterios económicos y ambientales (Rubio-Castro *et al.*, 2010).

Wang y Smith (1994) propusieron estrategias de optimización para minimizar el uso de agua antes de centrarse en el tratamiento de las aguas residuales a nivel industrial, reduciendo de esta manera los costos de tratamiento y el consumo de agua dulce. Los autores indican que hay tres posibilidades para reducir el volumen de aguas residuales: a) *reúso* de agua en otras operaciones, mezclando corrientes de aguas residuales de varias operaciones y/o agua dulce, b) *regeneración para reúso*, lo que se

refiere al tratamiento parcial de corrientes de agua previamente usada para eliminar los contaminantes que de otra forma impediría su reutilización en otras operaciones, mezclándola con otras corrientes; sin embargo, ésta no se reutiliza en procesos donde fue usada previamente y c) *regeneración para reciclaje*, que es el caso cuando el agua usada se regenera para eliminar los contaminantes acumulados y el agua así obtenida puede retornar a procesos en los que se ha utilizado previamente. Este método para minimizar el consumo de agua fresca puede ser aplicado en unidades habitacionales para reducir los costos y las descargas de agua contaminada a cuerpos de agua, reduciendo hasta en un 30% la demanda de agua en las viviendas (Jefferson *et al.*, 2004).

Chin *et al.* (2009) propusieron una forma de reducir el consumo de agua fresca reciclando el agua residual; tal agua regenerada puede ser utilizada en el riego o en la descarga de inodoros, con el fin de utilizar el agua potable sólo para la cocina y la higiene personal.

La reutilización de aguas grises se ha investigado intensamente en la última década, especialmente en Australia, la Unión Europea, Israel, Japón, Jordania y EE.UU. (Mandal *et al.*, 2011). Para la reutilización de las aguas grises es necesario aplicar tecnologías de tratamiento para eliminar sus contaminantes, las cuales varían desde simples dispositivos de desviación de almacenamiento hasta sofisticados sistemas, que se basan por lo general en procedimientos biológicos, separación física y procesos de oxidación avanzada entre los que se encuentran los procesos de filtración, la coagulación/floculación (Pidou *et al.*, 2008) y el tratamiento biológico (Elmitwalli y Otterpohl, 2007; Li *et al.*, 2007; Gross *et al.*, 2007; Merz *et al.*, 2007) asociado con un paso de desinfección (Friedler y Gilboa, 2010).

Cabe señalar que ninguna de las estrategias propuestas hasta el momento ha considerado modelos de optimización formales para determinar la mejor solución entre las posibles opciones; lo cual hace atractivo el desarrollo del presente proyecto de investigación.

ESTADO DEL ARTE

Actualmente, el reúso de agua es una estrategia que desea implementarse por la problemática de la menor disponibilidad de este recurso y la preservación del ambiente que se ha convertido en un imperativo a tomar en consideración en todas las actividades humanas. La industria es un sector que consume grandes cantidades de agua, razón por la cual se han aplicado estrategias para el uso eficiente y sustentable del agua, esto con diversos fines como la reducción de costos, del consumo de agua y la disminución de descarga de agua contaminada. A nivel habitacional también pueden aplicarse estas estrategias, ya que ambos tipos de sistemas comparten elementos de procesamiento con la misma función: usuarios de agua y fuentes de agua. Revitt *et al.* (2011) analizaron con datos empíricos el destino de micro-contaminantes en sistemas de tratamiento para reciclaje de aguas grises y obtuvieron un ahorro de hasta el 43% del agua dulce. Santos *et al.* (2012) presentaron un estudio para la reutilización de aguas grises en lavabos y duchas. Otra estrategia para mejorar el uso del agua es la recolección de aguas pluviales. En este contexto, Abdulla y Al-Shareef (2009) informaron del ahorro de agua dulce de hasta 19.7% a través de la utilización del agua de lluvia recolectada. Helmreich y Hom (2009) propusieron el uso de agua de lluvia tratada con filtros lentos de arena y la tecnología solar para aplicaciones en la agricultura y los hogares. Sturm *et al.* (2009) analizaron técnica y económicamente el uso de agua de lluvia recolectada. Farreny *et al.* (2011) sugirieron el tipo de techo para maximizar la disponibilidad y la calidad del agua de lluvia colectada.

Davies y Simonovic (2011) implementaron modelos de simulación para el uso de agua en una casa, con la incorporación de aspectos económicos, ambientales y sociales. Penn *et al.* (2013) presentaron un modelo de optimización multi-objetivo para la distribución de las aguas grises en un sistema municipal de alcantarillado existente para la reutilización en inodoros y riego de jardines. Chen y Chen (2014) presentaron un modelo de optimización para el reciclaje de los efluentes de las aguas residuales municipales para el uso industrial. García-Montoya *et al.* (2014) propusieron una formulación de programación matemática para la síntesis de redes de agua en

complejos de viviendas, donde se observaron reducciones de hasta el 38% del agua dulce. Zhang *et al.* (2014) propusieron un diseño sostenible para la reutilización de aguas residuales en China.

En la actualidad, la recolección de agua de lluvia es una de las alternativas para reducir el consumo de agua potable, junto con la aplicación de un tratamiento moderado de filtración, el cual remueve partículas suspendidas. De esta manera, Hashim *et al.* (2013) implementaron una simulación de un sistema de recolección de agua de lluvia a gran escala para obtener una reducción significativa del consumo de agua dulce a bajo costo. Rashidi *et al.* (2013) presentaron un modelo para evaluar el rendimiento de la colecta de agua de lluvia. Bocanegra-Martínez *et al.* (2014) propusieron un modelo de optimización para el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico. Sample y Liu (2014) implementaron una simulación para la recolección de agua de lluvia con un análisis económico.

Los estudios reportados por Furumai (2008), Ryan *et al.* (2009), Li *et al.* (2010) han demostrado que la consideración simultánea de captación de aguas pluviales con las estrategias de reutilización representa reducciones adicionales de agua fresca. En este marco, se han implementado modelos de simulación y optimización para el desarrollo simultáneo de captación de agua de lluvia y reúso de agua.

En los estudios anteriores no se han considerado la captación de aguas pluviales simultáneamente al reúso de agua residual en la formulación y aplicación de modelos matemáticos. Esta es una opción alterna para disminuir el consumo de agua fresca y los resultados así obtenidos se espera que sean mejores que los generados por métodos que consideran solamente una de estas dos opciones.

MARCO TEÓRICO

Aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas son generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas. Las aguas residuales que se producen en las unidades habitacionales pueden ser de dos tipos: aguas grises y aguas negras; las primeras se refieren a las aguas de los baños, duchas, lavabos, lavadoras y fregaderos de cocina, y son las menos contaminadas. Mientras que las aguas negras son las del inodoro; contienen una gran cantidad de materia orgánica y organismos patógenos y es necesario someterla a un tratamiento adecuado.

Las aguas grises representan cerca del 70% de las aguas residuales domésticas, por lo que tienen un gran potencial para su reutilización (Paulo *et al.*, 2013). La **Figura 1.2** muestra el porcentaje de agua que se utiliza para algunas actividades del hogar; el mayor porcentaje de agua es la que se emplea en el inodoro y lavado de ropa.

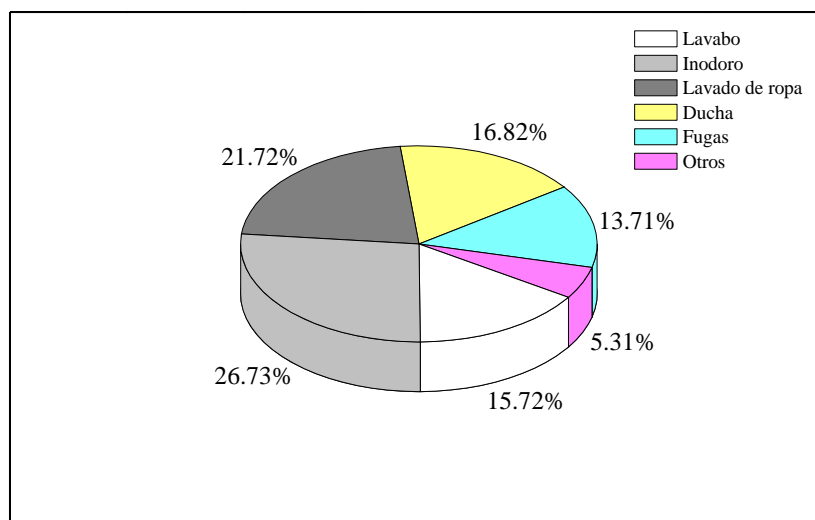


Figura 1.2. *Uso de agua para diferentes actividades domésticas (ver EPA, 2008).*

La calidad del agua residual doméstica depende del tamaño de la población. La **Tabla 1.1** muestra valores promedio de las características físicas, químicas y biológicas del agua residual doméstica para poblaciones de 2,500 a 100,000 habitantes en México (CONAGUA, 2012).

Las aguas grises pueden tratarse para convertirlas en agua limpia pero no potable. Existen numerosos sistemas basados en procesos *suaves*, tales como:

- Sistemas mecánicos: filtración de arena, sistemas de filtro de lava y los sistemas basados en radiación ultravioleta (Friedler y Gilboa, 2010).
- Sistemas biológicos: incluyen tratamientos en estanques, humedales artificiales (Osnaya, 2012) y bioreactores o sistemas compactos como sistemas de lodos activados, biofiltros y filtros sumergidos aireados.

Por otro lado, procesos directos o "duros", tales como destilación (evaporación) o procesos mecánicos tales como filtración por membranas, típicamente: ultrafiltración y ósmosis inversa, microfiltración (Hong y Guen, 1999), las cuales son capaces de tratar grandes volúmenes de aguas grises para obtener agua potable o muy cerca de la potabilidad.

La mayoría de las aguas grises son más fáciles de tratar y reciclar que las aguas negras debido a los bajos niveles de contaminantes. Si se recolectan las aguas grises domésticas mediante un sistema de tuberías separadas, pueden ser recicladas directamente dentro de la casa o jardín y pueden utilizarse inmediatamente y/o ser almacenadas. El reciclado de aguas grises de este tipo nunca es apto para el consumo humano, pero en base a una serie de etapas de filtración y digestión microbiana se puede utilizar para proporcionar agua para el lavado o inodoros.

Hay otras alternativas de uso de aguas residuales domésticas que incluyen su empleo para el riego de plantas y parques. Las plantas utilizan los contaminantes de las aguas grises, tales como partículas de los alimentos o el fosfato de los detergentes, como nutrientes en su crecimiento. Sin embargo, los residuos de sal y jabón pueden ser tóxicos para la vida microbiana y las plantas; dichos residuos pueden ser absorbidos y degradados por medio de humedales artificiales (ver **Figura 1.3**) y plantas acuáticas.

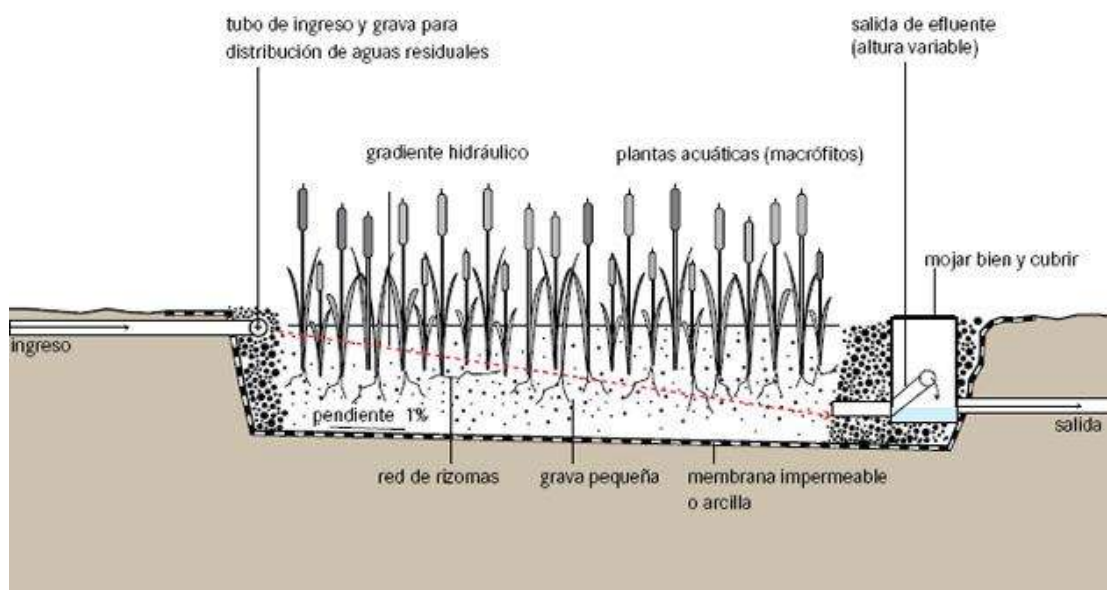


Figura 1.3. Representación esquemática de un humedal artificial.

Tratamientos de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua previamente usada (Metcalf y Eddy, 2003).

1. Tratamientos fisicoquímicos

El tratamiento fisicoquímico se usa para eliminar partículas en suspensión en el agua, principalmente inorgánicas. La eliminación de esta materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones mecánicas. Sin embargo, en muchos casos y para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándose en este caso como tratamientos fisicoquímicos (Metcalf y Eddy, 2003).

Tabla 1.1. Características de las aguas residuales domésticas para diferentes poblaciones.

Parámetro	Tamaño de Población (No. de Habitantes)				
	2,500 a 10,000	10,000 a 20,000	20,000 a 50,000	50,000 a 100,000	Promedio
pH	7.4	6.9	6.9	7.3	7.1
Temperatura (°C)	25	20	23	22	23
DBO (mg/L)	264	299	254	301	280
DQO (mg/L)	698	719	609	430	614
SS (mg/L)	9	5	8	3	6
Grasas y Aceites (mg/L)	56	44	65	96	65
N-NH ₃ (mg/L)	24	28	14	12	20
N-Orgánico (mg/L)	18	23	23	9	18
N-Total (mg/L)	37	44	30	24	34
Fosfatos Totales (mg/L)	20	24	16	29	22
SAAM (mg/L)	14	11	17	17	15
Coliformes Totales (NPM/100 mL)	7	773	14	107	225
Sólidos (mg/L):					
Totales	1552	1141	1391	932	1254
Totales Suspendidos	286	309	233	167	249
Totales Disueltos	1266	832	1158	765	1005
Totales Volátiles	737	871	449	349	602
Volátiles Suspendidos	223	192	151	139	176
Volátiles Disueltos	514	379	298	210	350
Totales Fijos	815	570	942	583	728
Fijos Suspendidos	116	145	183	58	126
Fijos Disueltos	699	425	759	525	602

1.1. Sedimentación

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación. Para sólidos poco densos, es necesario llevar a cabo una coagulación-floculación previa, la cual consiste en la adición de ciertos reactivos químicos para favorecer el aumento del tamaño y densidad de las partículas. Existen diferentes tipos de sedimentadores según la forma: rectangulares, circulares, lamelares.

Las partículas depositadas en el fondo de los equipos (denominados lodos) se arrastran mediante rasquetas desde el fondo donde se “empujan” hacia la salida.

1.2. Filtración

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña, de entre 0.15 y 0.3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de agua potable, así como en el tratamiento de agua para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en operaciones anteriores (sedimentación). Hay muchas maneras de clasificar los sistemas de filtración: Por gravedad o a presión, lenta o rápida, de torta o en profundidad (Shimizu *et al.*, 1996).

1.3. Coagulación-Floculación

En muchos casos, parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño (10^{-6} – 10^{-9} m), lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, en muchas ocasiones

debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por lo tanto, tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico. Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa (Fe^{3+} , Al^{3+}) junto con polielectrolitos orgánicos que favorecen la floculación (Sostar-Turk *et al.*, 2005).

1.4. Desinfección

La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que puedan causar enfermedades, dado que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. Los organismos causantes de enfermedades pueden ser bacterias, virus, protozoos y algunos otros. La desinfección se hace imprescindible para la protección de la salud pública si el agua a tratar tiene como finalidad el consumo humano. El objetivo puede ser no sólo desactivar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo, si lo que se pretende es reutilizar el agua (Liberti y Notarnicola, 1999).

Para llevar a cabo la desinfección se pueden utilizar distintos tratamientos: Tratamiento físico (calor, radiación), ácidos o bases, pero fundamentalmente se utilizan agentes oxidantes, entre los que cabe destacar el clásico Cl_2 y algunos de sus derivados, o bien procesos de oxidación avanzada (O_3 , fotocátalisis heterogénea).

2. Tratamientos biológicos

Los tratamientos biológicos constituyen una serie de procesos que tienen en común la utilización de microorganismos (como las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de contaminantes del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (nitrógeno y fósforo). En el metabolismo bacteriano el elemento aceptor de electrones juega un papel importante, sobre todo en la aplicación del tratamiento. Con base en esto se clasifican de la siguiente manera:

- **Sistemas aerobios:** La presencia de O_2 hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de lodos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua.
- **Sistemas anaerobios:** En este caso el aceptor de electrones puede ser el CO_2 o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido: CH_4 .
- **Sistemas anóxicos:** Se denominan así los sistemas en los que la ausencia de O_2 y la presencia de NO_3 hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en N_2 , molécula completamente inerte. Por tanto, es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (desnitrificación).

2.1. Procesos biológicos aerobios

Este proyecto hace referencia a dos tipos de procesos aerobios: lodos activados y bioreactor de membranas. El primer sistema es ampliamente empleado para el tratamiento de aguas residuales domésticas por alcanzar eficiencias de remoción de contaminantes mayores a 90% (Hernández-Sancho *et al.*, 2011) y el segundo sistema, es una nueva alternativa para el tratamiento de aguas residuales, en la cual no se introducen sustancias químicas durante el proceso, la remoción de contaminantes y de organismos patógenos es mayor al proceso de lodos activados; sin embargo, su costo es elevado (Chernicharo, 2006).

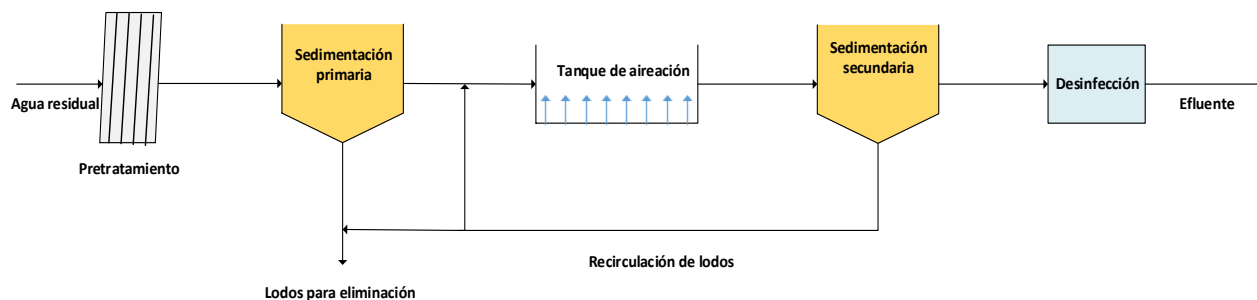
a) Lodos activados

Los lodos activados es un proceso que consiste en poner en contacto el agua residual en un medio aerobio, con un flóculo biológico previamente formado o recirculado del mismo proceso; la materia orgánica se absorbe y es degradada por los

microorganismos (**Figura 1.4a**). Posterior a este paso, debe llevarse a cabo una sedimentación para separar los lodos del agua y recircular una parte de los lodos recuperados al proceso para mantener la carga de microorganismos. Uno de los aspectos de diseño más importantes de este método es la aireación (Gernaey *et al.*, 2004).

Existen modificaciones al proceso de lodos activados: *aireación prolongada*, el cual consiste en trabajar con mayores tiempos de residencia, consiguiendo mayores rendimientos de degradación de materia orgánica; *contacto estabilización*, el cual se suele trabajar con menores tiempos de residencia (en base a una hora), es una buena opción cuando la materia orgánica a degradar se encuentra como materia en suspensión y *reactores discontinuos secuenciales*, la cual es una operación de aireación y sedimentación que se lleva a cabo en el mismo equipo. Este método es recomendable cuando no hay suficiente espacio para la instalación de los dispositivos asociados a los dos primeros métodos.

(a)



(b)

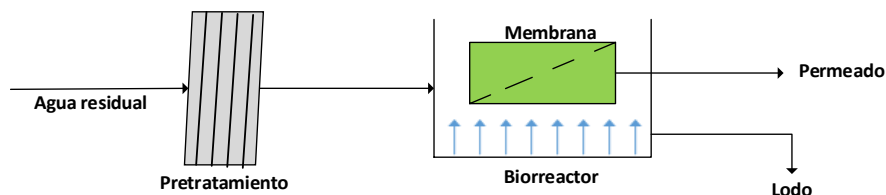


Figura 1.4. Procesos aerobios: a) lodos activados y b) bioreactor de membrana sumergida.

b) Bioreactor de membrana

Es una tecnología que consiste de un tratamiento biológico responsable de degradar los compuestos orgánicos y se combina con una membrana (ver **Figura 1.4b**) que realiza la separación del permeado o efluente de los lodos activados (Gander *et al.*, 2000). La membrana puede ser de diferentes materiales: polimérica o cerámica y tener diversas configuraciones: sumergida o externa (Judd, 2006). Las ventajas de estos sistemas son que eliminan el uso de otros dispositivos como clarificadores o sedimentadores; además, el bioreactor de membrana puede trabajar con altas cargas de lodos, lo que reduce la superficie de la planta. Las desventajas es que la membrana tiene un elevado costo, así como altos costos de aireación.

2.2. Procesos biológicos anaerobios

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado “biogás”, que se puede utilizar como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, sólo una pequeña parte de la DQO tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Una de las desventajas es que cuando se trabaja con exceso de lodo se conduce a un tiempo de retención menor que limita el crecimiento de los microorganismos formadores de metano (metanogénicos) y, por consiguiente, conduce a una pobre remoción de la demanda química de oxígeno (Mahmoud *et al.*, 2003).

a) Reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

Los reactores UASB solucionan el problema de recirculación de lodos al aumentar la concentración de biomasa en el reactor manteniéndola en su interior. Estos reactores suelen tener en su parte superior un sistema de separación gas-sólido-

líquido, puesto que se acumula biogás alrededor de las partículas que manifiestan una tendencia a ascender separándose con estos dispositivos (**Figura 1.5**). Se consigue una alta concentración de biomasa dentro del reactor, lo que conlleva a una elevada velocidad de eliminación de materia orgánica con rendimientos elevados de depuración. El agua residual se introduce por la parte inferior, homogéneamente repartida y ascendiendo lentamente a través del manto de lodos (gránulos). La principal característica de un reactor UASB, además del flujo ascendente, es la formación de un manto de lodo floculento o granular con buena capacidad de sedimentación, en donde se realiza la actividad biológica (Lorenzo y Obaya, 2006). El biogás es un subproducto valioso de estos reactores, que en promedio está constituido por 65% de metano, 35% de dióxido de carbono y pequeñas trazas de H_2S , H_2 y N_2 (Appels *et al.*, 2011). Los principales problemas que tiene este tipo de reactor son: que puesto en funcionamiento, se ha de conseguir que se desarrollen gránulos lo más estables posibles, la incidencia negativa que tiene es que el agua residual a tratar contenga una gran cantidad de sólidos en suspensión y la deficiente mezcla en la fase líquida.

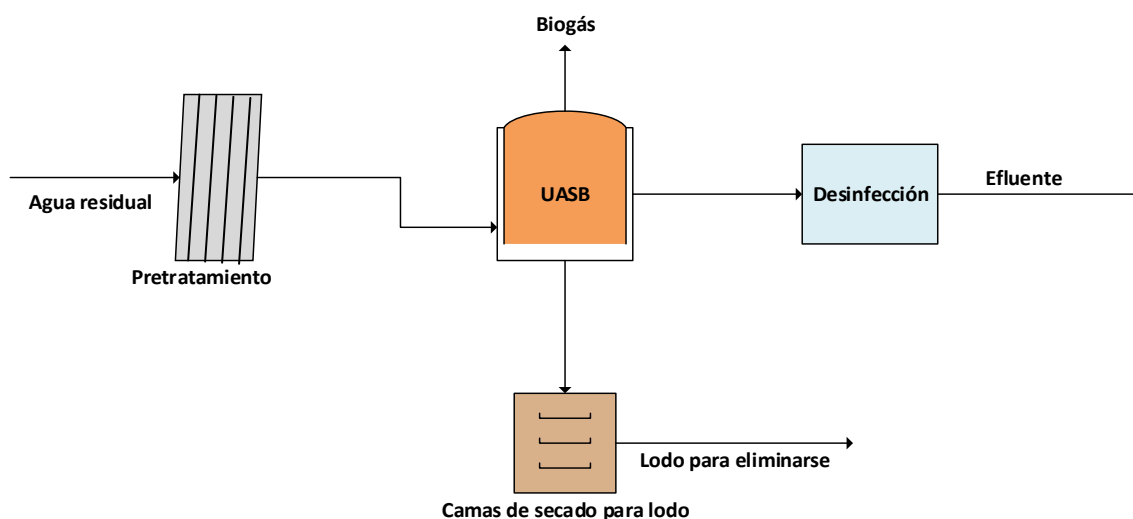


Figura 1.5. Sistema de reactor anaerobio de flujo ascendente.

3. Software GAMS®

Para la optimización de los modelos de reúso de agua de unidades habitacionales se empleará el programa GAMS® (*General Algebraic Modeling System*). A diferencia de otros paquetes computacionales que implementan diversos algoritmos matemáticos para resolver los problemas de optimización, el programa GAMS presenta la ventaja de contar con un lenguaje de modelización que permite escribir en un editor la formulación matemática del problema y, posteriormente, aplicarle una serie de “solvers” o programas de resolución.

4. Problema mixto entero no lineal

En el desarrollo de esta investigación se desarrollaron dos modelos matemáticos, los cuales son problemas mixtos enteros no lineales (MINLP siglas en inglés). Este tipo de problemas se refieren a una programación matemática con variables continuas y discretas, así como con no linealidades en la función objetivo y las restricciones (Bussieck y Pruessner, 2003). Los métodos para resolver los problemas MINLP incluyen las técnicas de Branch and Bound (B&B), así como la aproximación exterior y la función de penalización aumentada.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El tratamiento de aguas residuales es una opción favorable para disminuir la descarga de aguas contaminantes al ambiente y, al mismo tiempo, para reducir el consumo de agua fresca. En México hay estados en los que se da tratamiento a las aguas residuales con una cobertura del 100%, entre los que destacan Aguascalientes, Baja California y Nuevo León. Sin embargo, en un análisis de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) publicado en el 2012, se menciona que Michoacán forma parte de los estados con la menor cobertura de tratamiento de aguas residuales, con tan sólo un 31% del total del agua consumida (De La Peña, 2013). Aunque Michoacán no presenta la escasez del recurso hídrico como en los estados del norte de la República, es

necesario enfocar las estrategias al uso eficiente y a la prevención de la problemática de contaminación ambiental.

En las unidades habitacionales cada vez es mayor la demanda de agua fresca debido al aumento de la población, por lo que es necesario implementar una estrategia de reúso de agua similar a la desarrollada para plantas industriales debido a que estos dos sistemas comparten similitudes estructurales. En particular, en vez de utilizar únicamente agua fresca en ambos sistemas ciertas corrientes de agua residual pueden ser tratadas y reutilizadas en otras unidades consumidoras de agua dependiendo de la calidad y la cantidad que se desea satisfacer. De esta manera, se reduciría el consumo de agua fresca incrementando el beneficio económico del sistema y reduciendo su impacto ambiental.

Realizar este tipo de mecanismos a una escala menor (una casa) no es un problema significativo; sin embargo, a una escala mayor (sistemas complejos) donde se involucran varias casas y, por ende, más corrientes residuales provenientes de los dispositivos consumidores de agua y diferentes configuraciones de las corrientes de reúso, es necesario encontrar de manera sistemática la solución óptima que satisfaga los requerimientos pero que obtenga un menor costo y un menor consumo de agua fresca. Una parte importante del problema es que las corrientes residuales deben ser segregadas de acuerdo a su procedencia, ya que tienen una concentración de contaminantes diferentes y esto hace más fácil su tratamiento y disposición. Se debe considerar la cantidad de agua requerida para los usos del hogar, el costo, la calidad del agua de salida de cada dispositivo consumidor, el tratamiento que debe aplicarse para obtener una calidad aceptable para la recirculación, los tanques para el almacenamiento de agua que no sea utilizada en cierto tiempo. Además, se tendrán que instalar nuevos equipos como tubería, bombas y sistemas de operación para el tratamiento del agua, lo cual en conjunto eleva los costos, pero a largo plazo pueden obtenerse resultados satisfactorios.

HIPÓTESIS

Una estrategia de optimización para el reúso y regeneración del agua usada en unidades habitacionales permitirá obtener beneficios ambientales y económicos, al disminuir el consumo de agua fresca.

OBJETIVOS

Objetivo general

Proponer un modelo de optimización general para el reúso óptimo del agua en unidades habitacionales considerando simultáneamente diversos aspectos de sustentabilidad tanto para unidades nuevas como para el reajuste de unidades existentes.

Objetivos particulares

- Formular un modelo de optimización formal para el reúso óptimo del agua en las unidades habitacionales basado en una superestructura que incluya todas las opciones de interés (segregamiento del agua residual de acuerdo a su procedencia, tratamiento de agua previamente usada, recirculación y/o reúso del agua tratada, almacenamiento del agua tratada, así como la captación, almacenamiento y distribución de agua de lluvia) y las interacciones entre los componentes de la misma.
- Desarrollar una estrategia de solución del modelo propuesto empleando la plataforma de programación GAMS.
- Aplicar el modelo propuesto en una unidad habitacional con las características propias de la ciudad de Morelia.
- Analizar los resultados obtenidos para determinar la efectividad técnico-económica-ambiental y social por el reúso de agua en unidades habitacionales.

METODOLOGÍA

El desarrollo de este trabajo se realizó en tres etapas, las cuales se describen a continuación:

Etapa 1

Se realizó una revisión bibliográfica respecto de los métodos existentes para el tratamiento de aguas negras y grises. Así mismo, se incluye una revisión bibliográfica de los modelos de optimización para el reúso de agua a nivel industrial.

Etapa 2

En la segunda etapa del proyecto se desarrollaron superestructuras para representar, por un parte: a) el reúso óptimo del agua en unidades habitacionales y b) la implementación del reúso de agua y captación de agua de lluvia en las unidades habitacionales. Las superestructuras incluyen diferentes esquemas que han sido muy exitosos para el reúso de agua a nivel industrial. Para el inciso a, se considera el mezclado, segregado óptimo de corrientes para satisfacer diferentes demandas, selección de tecnologías de tratamiento de aguas, así como el uso distribuido de diferentes tanques de almacenamiento. Una tarea fundamental en este inciso es la optimización de la operación del sistema bajo consideración. Para el inciso b, se considera la captación, tratamiento, almacenamiento y distribución de agua de lluvia. Con base en estas superestructuras, se formularon modelos matemáticos para ambos casos.

Etapa 3

Se realizó la programación de los modelos de optimización propuestos en la etapa dos, en la plataforma de GAMS. Posteriormente, se aplicaron a un caso de estudio de una unidad habitacional de la ciudad de Morelia. Después se analizaron los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2.

REÚSO DE AGUA

El problema abordado en este capítulo puede enunciarse como sigue: Especificado un complejo de viviendas con un número conocido de casas y habitantes, cuyas demandas de agua para cada casa también se conocen, así como el momento en que tienen que ser satisfechas durante todos los días y durante todo el año, el problema de diseño consiste en determinar la estructura óptima de la red que permite reciclar las aguas residuales, su reutilización y regeneración. De esta manera, el modelo necesita determinar los tratamientos óptimos, tuberías, bombas y dispositivos de almacenamiento requeridos para el agua regenerada. La configuración de red debe tener en cuenta la segregación de aguas residuales y mezclado para satisfacer las demandas para los diversos usos considerados. La superestructura mostrada en la **Figura 2.1** incluye posibles configuraciones de interés para resolver este problema. El ejemplo que se muestra en la **Figura 2.1** es sólo para dos unidades residenciales y cinco usos específicos (es decir, inodoro, ducha, lavavajillas, lavandería y jardinería). No obstante, la superestructura propuesta se puede reproducir para incluir cualquier número de casas y usos. Las líneas discontinuas representan los caudales de aguas residuales de las casas a las unidades de tratamiento. Las líneas continuas representan el agua regenerada que puede ser reutilizada en las diferentes casas y para los diferentes usos. Por otra parte, las aguas residuales descargadas al ambiente también deben ser tratadas para satisfacer las regulaciones ambientales. Cabe señalar que evitar la mezcla de diferentes tipos de corrientes de aguas residuales puede aumentar los costos para tuberías, pero también puede reducir el costo del tratamiento. Por lo tanto, el modelo debe determinar la estructura óptima de la red, el tipo de unidades de tratamiento, el tamaño de las tuberías, bombas y unidades de almacenamiento, así como las condiciones de operación para satisfacer las demandas de agua en el complejo de viviendas con un costo total anual mínimo y consumo de agua fresca mínimo. La formulación matemática propuesta se describe en la siguiente sección.

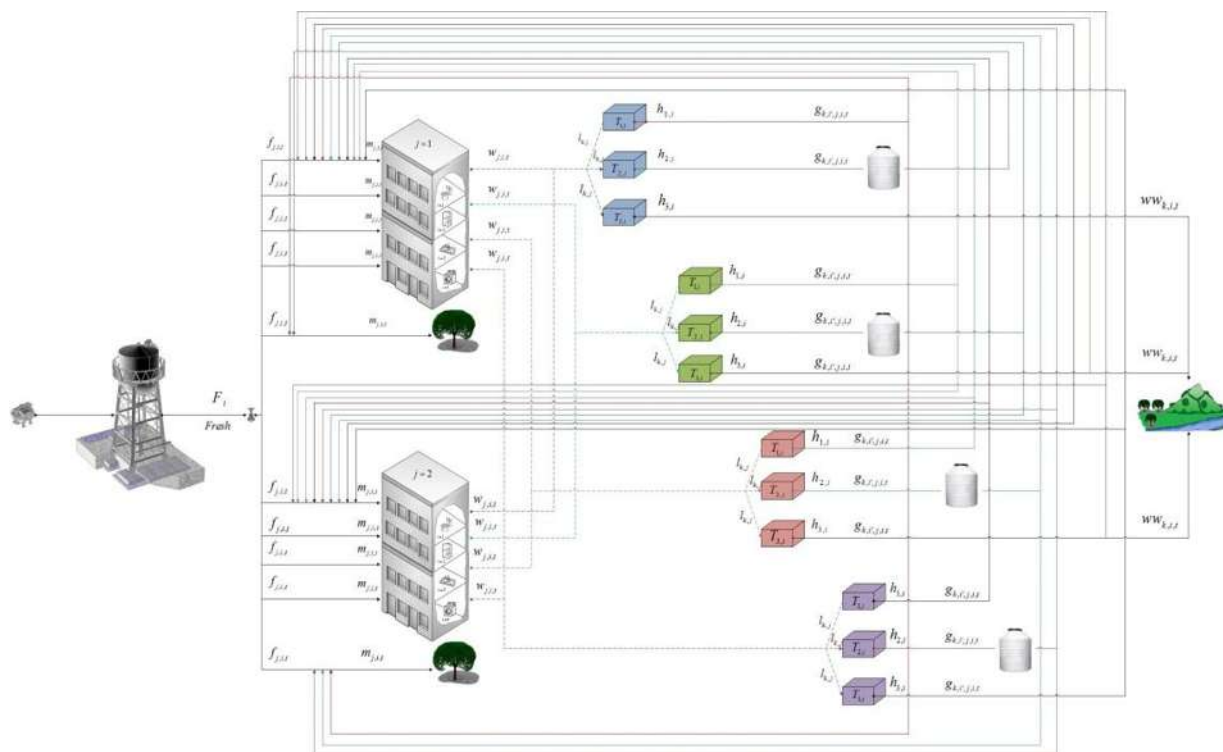


Figura 2.1. Representación esquemática del reuso de agua en dos unidades habitacionales.

MODELO MATEMÁTICO

En primer lugar, se definen los índices utilizados: i representa los diferentes usos o dispositivos consumidores de agua (es decir, baño, ducha, lavavajillas, lavandería y jardinería), j representa las unidades consideradas en el complejo de viviendas, k representa las diferentes unidades de tratamiento considerados, t representa los diferentes períodos durante un día (es decir, los períodos de una hora de duración para tener un horizonte de 24 horas por día) cuando se descarga el agua, se almacena y se reutiliza, tt es el tiempo de proceso de las diferentes actividades que se consideran. La formulación del modelo propuesto se establece de la siguiente manera:

a) Ecuaciones asociadas a la reutilización de agua residual doméstica

Balance de agua fresca. El flujo de agua fresca en el período de tiempo t (F_t) es igual a la del agua fresca segregada ($f_{j,i,t}$) enviada a las diferentes unidades j para los diferentes usos i a través del período t :

$$F_t = \sum_j \sum_i f_{j,i,t}; \quad \forall t \in T \quad (2.1)$$

Balance de los usos (Sinks). La demanda de agua para cada unidad j para cada uso i durante cada período t ($m_{j,i,t}$) debe satisfacerse con el agua fresca segregada ($f_{j,i,t}$) más la suma de las aguas residuales recicladas a partir de los diferentes tratamientos ($g_{k,i,j,i,t}$):

$$m_{j,i,t} = f_{j,i,t} + \sum_k \sum_{i'} g_{k,i',j,i,t}; \quad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.2)$$

Balance de agua residual. La suma de las aguas residuales generadas en las diferentes unidades j para los diferentes usos i en los distintos períodos de tiempo t ($w_{j,i,t}$) es igual a las aguas residuales segregadas de las diferentes unidades de tratamiento k ($l_{k,i,t}$):

$$\sum_j w_{j,i,t} = \sum_k l_{k,i,t}; \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.3)$$

Balance para unidades de tratamiento. La variable ($h_{k,i,t+tt}^{in}$) se define como la corriente de entrada al tratamiento en función del tiempo y es igual a las aguas residuales segregadas ($l_{k,i,t}$) por uno menos la eficiencia de tratamiento ($\alpha_{k,i}$):

$$h_{k,i,t+tt}^{in} = (1 - \alpha_{k,i}) l_{k,i,t}, \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.4)$$

$$0 \leq \alpha_{k,i} \leq 1$$

Debe tenerse en cuenta que las entradas de aguas residuales a la unidad de tratamiento está en un período de tiempo t y sale en un período de tiempo $t+tt$; donde tt es el tiempo de procesamiento del agua residual. También, la eficiencia depende del tipo de

tratamiento y éste debe estar entre cero y uno; este valor puede determinarse a partir de simulación o el uso de los datos experimentales.

Balance de agua regenerada. El agua regenerada ($h_{k,i,t}^{out}$) es segregada y una parte puede ser reciclada para los diferentes usos i' a las diferentes unidades j ($g_{k,i,j,i',t}$) y otra parte, se descarga al ambiente ($ww_{k,i,t}$).

$$h_{k,i,t}^{out} = \sum_j \sum_{i'} g_{k,i,j,i',t} + ww_{k,i,t}; \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.5)$$

Pérdidas de agua en los diferentes usos. Las aguas residuales de salida desde los diferentes usos ($w_{j,i,t}$) son igual al agua de entrada ($m_{j,i,t}$) por el producto de uno menos la eficiencia para el uso de agua ($\beta_{j,i}$).

$$w_{j,i,t} = (1 - \beta_{j,i})m_{j,i,t}; \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.6)$$

$$0 \leq \beta_{j,i} \leq 1$$

La eficiencia $\beta_{j,i}$ es un parámetro y está en función del tipo de uso i y la unidad j considerada, tiene un valor entre cero y uno, y se determina experimentalmente (para el contexto de este trabajo, dicho valor es de 0.01 para el inodoro, 0.15 para la ducha, 0.12 para lavavajillas, 0.2 para el lavadero y 1 para la jardinería).

Balance en los tanques de almacenamiento. Se requieren tanques de almacenamiento para el agua regenerada que se recupera después del tratamiento porque las demandas de agua son requeridas en períodos específicos. Entonces, el agua almacenada en el período de tiempo t ($S_{k,i,t}$) debe ser igual al agua almacenada en el periodo anterior ($S_{k,i,t-1}$) más la entrada de agua durante este período ($h_{k,i,t}^{in}$) menos la salida de agua durante el período ($h_{k,i,t}^{out}$):

$$S_{k,i,t} = S_{k,i,t-1} + h_{k,i,t}^{in} - h_{k,i,t}^{out}; \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.7)$$

Restricción para el agua almacenada en los tanques en el período inicial y final. El agua almacenada al principio es igual al agua almacenada al final del día:

$$S_{k,i,t=1} = S_{k,i,t=T}, \quad \forall k \in K, \forall i \in I \quad (2.7a)$$

Capacidad de los tanques de almacenamiento. La capacidad de los tanques ($S_{k,i}^{cap}$) debe ser mayor o igual al agua almacenada después de ser tratada ($S_{k,i,t}$) y está en función del tiempo t .

$$S_{k,i}^{cap} \geq S_{k,i,t}; \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.8)$$

Existencia de los tanques de almacenamiento. Se requieren relaciones lógicas para determinar la existencia de los tanques de almacenamiento; y de esta manera, cuando el tanque existe entonces la variable binaria ($V_{k,i}$) debe activarse:

$$S_{k,i}^{cap} \leq S^{\max} * V_{k,i}; \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (2.9)$$

donde S^{\max} es el límite superior de la capacidad de almacenamiento para cada tanque. Cabe señalar que cuando la capacidad es mayor que cero, entonces la variable binaria se activa y ésta debe ser uno.

Existencia de unidades de tratamiento. La existencia de las unidades de tratamiento de aguas residuales se modela a través de una variable binaria ($y_{k,i}$); cuando esta variable binaria es uno existe la unidad y cuando esta variable binaria es cero no existe la unidad. Entonces, la siguiente relación se utiliza para activar esa variable binaria:

$$l_{k,i,t} \leq L_i^{\max} * y_{k,i}; \quad \forall k \in K, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.10)$$

donde L_i^{\max} es el límite superior para la capacidad de las unidades de tratamiento.

Capacidad de las unidades de tratamiento. La capacidad de las unidades de tratamiento ($L_{k,i}^{cap}$) debe ser mayor o igual al flujo de agua que van a entrar a cada tratamiento ($l_{k,i,t}$).

$$L_{k,i}^{cap} \geq l_{k,i,t}; \quad \forall k \in K, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.11)$$

Existencia de segmentos de tubería. La variable binaria $z_{j,i}$ representa el segmento de tubería del uso i al tratamiento k y $x_{k,i',j,i}$ es la variable binaria que representa el tratamiento k al nuevo uso i' :

$$w_{j,i,t} \leq L_t^{\max} * z_{j,i} \quad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.12)$$

$$g_{k,i',j,i,t} \leq L_t^{\max} * x_{k,i',j,i} \quad \forall k \in K, \forall i' \in I', \forall j \in J, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.13)$$

Capacidad máxima de flujo de salida de los usos. La capacidad de los segmentos de tubería ($W_{j,i}^{cap}$ y $g_{k,i',j,i,t}^{cap}$) se determina por el caudal máximo manipulado durante todos los períodos de tiempo:

$$W_{j,i}^{cap} \geq w_{j,i,t} \quad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.14)$$

$$g_{k,i',j,i,t}^{cap} \geq g_{k,i',j,i,t} \quad \forall k \in K, \forall i' \in I', \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.15)$$

b) Costos asociados a la reutilización de agua residual doméstica

Costo de agua fresca. El costo de agua fresca (c^{fw}) se calcula multiplicando el costo unitario de agua fresca (c^{fw}) por la suma del agua fresca consumida durante todos los períodos de tiempo (F_t):

$$C^{FW} = c^{fw} \sum_t F_t \quad (2.16)$$

Costo del bombeo de agua fresca. El costo de bombeo de agua fresca (C^{PFW}) es igual a la suma del costo unitario de bombeo del agua (c^{pfw}) por el flujo de entrada de agua fresca durante todos los periodos de tiempo (F_t):

$$C^{PFW} = c^{pfw} \sum_t F_t \quad (2.17)$$

Costo de capital de los tanques. El costo de capital de los tanques ($C_{k,i}^{capTanks}$) se determina con el costo fijo ($FC_{k,i}^{Tanks}$) y se multiplica por una variable binaria para la existencia de tanques ($V_{k,i}$), más el costo variable ($VC_{k,i}^{Tanks}$) multiplicado por la capacidad de los tanques ($S_{k,i}^{cap}$).

$$C_{k,i}^{capTanks} = FC_{k,i}^{Tanks} * V_{k,i} + VC_{k,i}^{Tanks} (S_{k,i}^{cap})^{\gamma_{k,i}}; \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (2.18)$$

Costo de capital para las unidades de tratamiento. El costo de capital de las unidades de tratamiento es la suma del costo fijo ($FC_{k,i}^{capTU}$) por una variable binaria ($y_{k,i}$) más el costo variable ($VC_{k,i}^{capTU}$) por la capacidad de tratamiento ($L_{k,i}^{cap}$) elevado a exponente ($\gamma_{k,i}$) menor que uno para representar las economías de escala:

$$C_{k,i}^{capTU} = FC_{k,i}^{capTU} * y_{k,i} + VC_{k,i}^{capTU} (L_{k,i}^{cap})^{\gamma_{k,i}} \quad \forall k \in K, \forall i \in I \quad (2.19)$$

Costo de capital de tuberías para los flujos de salida de los usos. El costo de capital de las tuberías para los flujos de salida de los usos ($C_{j,i}^{capPW}$) es igual a la suma de los costos fijos ($FC_{j,i}^{capPW}$) por la variable binaria ($Z_{j,i}$), más el producto del costo variable ($VC_{j,i}^{capPW}$) por la máxima capacidad de salida de los usos ($w_{j,i}^{cap}$) elevado a un exponente para los costos capitales ($\gamma_{j,i}$):

$$C_{j,i}^{capPW} = FC_{j,i}^{capPW} * Z_{j,i} + VC_{j,i}^{capPW} (w_{j,i}^{cap})^{\gamma_{j,i}} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2.20)$$

Costo de capital de tuberías para los flujos de recirculación a usos. El costo de capital de las tuberías para los flujos de recirculación a los usos ($C_{k,i',j,i}^{capPg}$) es igual a la suma de los costos fijos ($FC_{k,i',j,i}^{capPg}$), más el producto del costo variable ($VC_{k,i',j,i}^{capPg}$) por la máxima capacidad de recirculación a cada uso doméstico ($g_{k,i',j,i}^{cap}$) elevado a un exponente para los costos de capital ($\gamma_{k,i',j,i}$):

$$C_{k,i',j,i}^{capPg} = FC_{k,i',j,i}^{capPg} * x_{k,i',j,i} + VC_{k,i',j,i}^{capPg} \left(g_{k,i',j,i}^{cap} \right)^{\gamma_{k,i',j,i}} \quad \forall k \in K, \forall i' \in I', \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2.21)$$

Costo de bombeo del flujo de recirculación. El costo de bombeo para los flujos de recirculación ($C_{k,i',j,i}^{pumpg}$) es la suma del costo unitario de bombeo por el flujo de agua reciclada a los usos ($g_{k,i',j,i,t}$):

$$C_{k,i',j,i}^{pumpg} = \sum_t \left(C_{k,i',j,i}^{Pump} * g_{k,i',j,i,t} \right) \quad \forall k \in K, \forall i' \in I', \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2.22)$$

Costo de operación de las unidades de tratamiento. El costo de operación de las unidades de tratamiento ($C_{k,i}^{opTreat}$) es la suma del producto de los costos unitarios de operación del tratamiento por el flujo de entrada al tratamiento ($l_{k,i,t}$):

$$C_{k,i}^{opTreat} = \sum_t C_{k,i}^{op} * l_{k,i,t} \quad \forall k \in K, \forall i \in I \quad (2.23)$$

Costo de capital de bombas para flujo de recirculación. El costo de capital para las bombas para los flujos de recirculación involucra el costo fijo de bombas ($FC_{k,i',j,i}^{cappump}$) por la variable binaria ($x_{k,i',j,i}$), más el costo variable de las bombas ($VC_{k,i',j,i}^{cappump}$) por la máxima capacidad de recirculación de agua ($g_{k,i',j,i}^{cap}$), éste último elevado a un factor de costos ($\gamma_{k,i',j,i}$):

$$C_{k,i',j,i}^{cappump} = FC_{k,i',j,i}^{cappump} * x_{k,i',j,i} + VC_{k,i',j,i}^{cappump} \left(g_{k,i',j,i}^{cap} \right)^{\gamma_{k,i',j,i}} \quad \forall k \in K, \forall i' \in I', \forall j \in J, \forall i \in I \quad (2.24)$$

Restricción de reciclaje de corrientes. Hay restricciones necesarias para evitar el reúso de flujos de algunos de los usos i a nuevos usos específicos i' después del tratamiento. Estas restricciones se establecen de la siguiente manera:

$$g_{k,i,j,i',t} = 0; \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall t \in T, \forall i' \in I' \setminus (k,i) \quad (2.25)$$

Costo Total Anual. La ecuación 26 representa el costo total anual que es igual a la suma de los costos de las unidades de tratamiento ($C_{k,i}^{capTU}$), el costo de la tubería de salida de cada uso ($C_{j,i}^{capPW}$), el costo de los tanques ($C_{k,i}^{capTanks}$), el costo de la tubería para flujo de recirculación ($C_{k,i',j,i}^{capPg}$) y el costo de capital de las bombas ($C_{k,i',j,i}^{cappump}$), el costo de bombeo de flujo de recirculación ($C_{k,i',j,i}^{pumpg}$), el costo de operación de cada unidad de tratamiento ($C_{k,i}^{opTU}$), el costo de agua fresca (C^{FW}) y el costo de bombeo de agua fresca (C^{PFW}):

$$TAC = K_F \left(\sum_k \sum_i C_{k,i}^{capTU} + \sum_j \sum_i C_{j,i}^{capPW} + \sum_k \sum_i C_{k,i}^{capTanks} + \sum_k \sum_{i'} \sum_j \sum_i C_{k,i',j,i}^{capPg} + \sum_k \sum_{i'} \sum_j \sum_i C_{k,i',j,i}^{cappump} \right) + Hy \left(\sum_k \sum_{i'} \sum_j \sum_i C_{k,i',j,i}^{pumpg} + \sum_k \sum_i C_{k,i}^{opTreat} + C^{FW} + C^{PFW} \right) \quad (2.26)$$

donde K_F es un factor para anualizar los costos de capital y Hy es el tiempo de operación anual.

Total de Agua Fresca. El consumo total de agua fresca para la unidad habitacional es la suma del agua consumida para todos los periodos (F_t) y se describe de la siguiente manera:

$$TOTFRESH = \sum_t F_t \quad (2.27)$$

Función objetivo. La función objetivo es la minimización simultánea del costo total anual (TAC) y del consumo de agua fresca (TOTFRESH):

$$O.F. = \text{Min}\{TAC; TOTFRESH\} \quad (2.28)$$

CASO DE ESTUDIO

Se presenta un ejemplo para mostrar la aplicación del modelo matemático propuesto. Se analizó una zona habitacional de Morelia “*Villas del Pedregal*”; se tomaron en cuenta dos zonas del fraccionamiento que representan las unidades en la superestructura: la unidad 1 contiene 894 hogares y la unidad 2, 835 hogares. En promedio se contemplaron 4 habitantes por hogar, dando un total de 6916 habitantes (ver **Figura 2.2**). Los tratamientos propuestos son: sistema anaerobio, aerobio y un bioreactor de membrana; los dos primeros son tratamientos comúnmente utilizados y el tercero es un tratamiento que ha sido propuesto recientemente como una alternativa para tratar el agua residual doméstica. Actualmente, el consumo global de agua dulce es de 1,504 m³/día, las aguas residuales vertidas al ambiente son 1,160 m³/día y el costo anual total para el consumo de agua fresca es de US\$655,275/año. Los costos unitarios en US\$ utilizados son 0.653 para el agua dulce, 0.0152 para el bombeo de agua dulce, 0.0652 para el bombeo de los flujos de recirculación, el costo fijo unitario fue de 100 para tuberías, 2,614 para bomba para flujos de recirculación, 1,000 para las unidades de tratamiento, 100 para tanques y el costo variable unitario fue de 60 para la tubería de recirculación de los flujos, 50 para tubería de flujos de salida de cada uso, 60 para las unidades de tratamiento y de 176 para los tanques.

Este problema se codificó en el software de GAMS, donde se utilizaron los solvers: SBB, CONOPT y CPLEX para resolver los problemas enteros mixto no lineales, los problemas no lineales y problemas lineales, respectivamente (Brooke *et al.*, 2014). El problema consiste de 6,792 variables continuas, 190 variables binarias, 10,987 restricciones. Se utilizó un procesador i7 a 2.10 GHz con 8 GB de memoria RAM en aproximadamente 0.78 s de tiempo de CPU para resolver este problema.



Figura 2.2. Representación de las unidades en el caso de estudio de Morelia.

Escenario G

En primer lugar, se obtuvo la solución para la minimización del Costo Total Anual (TAC de US\$554,422/año); esta solución representa un consumo total de agua fresca de 1,032 m³/día (escenario G). La representación esquemática de la solución de este escenario se presenta en la **Figura 2.3**. Cabe señalar que para esta solución sólo se requiere el sistema anaerobio para todos los tipos de aguas residuales; en este caso, las aguas residuales tratadas del inodoro, ducha, lavavajillas y lavado de ropa son 600 m³/día, 197 m³/día, 136 m³/día y 224 m³/día, respectivamente. Para este escenario G, se requieren 3 tanques de almacenamiento, cuya capacidad es de 25 m³ para cada uno (**Tabla 2.3**). Además, el total de agua residual descargada al ambiente es igual a 688 m³/día, que proviene del inodoro, ducha y lavado de ropa. El costo total anual está constituido por un 44.4% para el agua fresca, el 1.03% para el bombeo de agua fresca, el 2.02% para el bombeo de agua recirculada, 0.35 % para el costo de capital para las unidades de tratamiento, 0.37 % para el costo de capital de las tuberías (de salida y recirculación), 0.14 % para el costo de capital para las bombas, 0.25% para el costo de

capital para los tanques y 51.41 % para la operación de las unidades de tratamiento, por lo que éste último representa el impacto más grande en el costo anual total. La comparación de esta solución (escenario G) respecto a la situación actual (escenario 0), muestra una reducción del 31.38 % en el total de agua fresca consumida y el *TAC* disminuye 15.39 %, por lo que el escenario G es mejor que el escenario 0.

Escenario A

El segundo escenario (Escenario A) corresponde a la minimización del consumo total de agua dulce, en el que el *TAC* es US\$1,889,600/año, con un consumo total de agua fresca de 929 m³/día y el total de agua residual descargada al ambiente es 571 m³/día; este flujo proviene del inodoro y lavado de ropa. Esta solución requiere de un sistema anaerobio y un bioreactor con membrana para las aguas residuales de inodoro; para las aguas residuales de la ducha se requieren tratamientos aerobios y anaerobios, y se requieren los tres tratamientos de las aguas residuales para el lavado de ropa y de platos (véase la **Figura 2.4**). Se requieren nueve tanques para este escenario, cuyas capacidades son de 25 m³ para seis tanques, y los otros tanques con capacidades de 13.69 m³, 20.11 m³ y 21.52 m³ (**Tabla 2.4**). Por otra parte, el costo total anual constituye 11.72 % para el agua dulce, el 0.27% para el bombeo de agua fresca, el 0.72% para el bombeo de agua recirculada, 0.16 % para el costo capital de las unidades de tratamiento, 0.14 % para el costo de capital para tuberías de salida y recirculación, 0.08 % para el costo capital para las bombas, 0.2% del costo de capital para los tanques y el 86.7 % para la operación de las unidades de tratamiento. La comparación para este escenario A respecto a la situación actual (llamado escenario 0), muestra que ahora hay una reducción del 38.23 % en el total de agua fresca consumida y que el *TAC* aumenta 188.36 %.

Tabla 2.1. Resultados de costos para el caso de estudio.

Concepto (US\$/año)	Sin Recirculación Escenario 0	Min TAC Escenario G	Min Fresh Escenario A	Escenario B
Costo Total Anual	655,275	554,422	1,889,600	662,124
Inversión Total	34,151	62,438	108,679	91,375
Costo del agua fresca	358,525	246,188	221,573	224,044
Costo de capital de tuberías para flujo de recirculación	0	676	1,238	1,002
Costo de capital de tuberías para flujo de salida de usos	1,381	1,381	1,381	1,381
Costo de capital de los tanques	0	1,404	3,762	3,067
Costo de capital de bombas para flujo de recirculación	0	799	1,463	1,184
Costo de bombeo de agua fresca	8,345	5,730	5,157	5,215
Costo de bombeo de flujo de recirculación	0	11,216	13,674	13,427
Costo de capital de tratamiento	1,981	1,981	3,023	2,501
Costo de operación de tratamiento	285,042	285,042	1,638,288	410,299

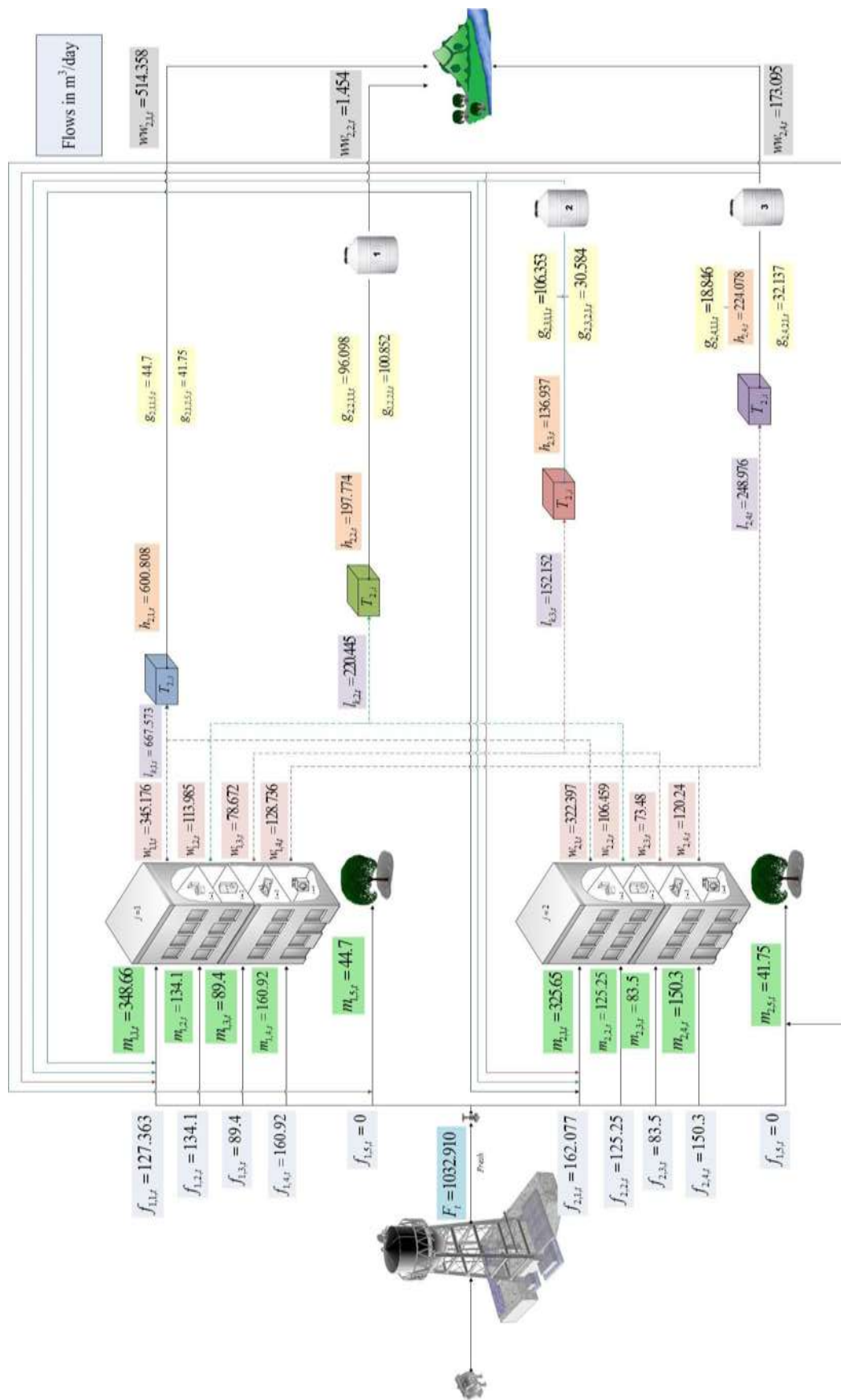


Figura 2.3. Diagrama de flujo con la minimización del Costo Total Anual (Escenario G).

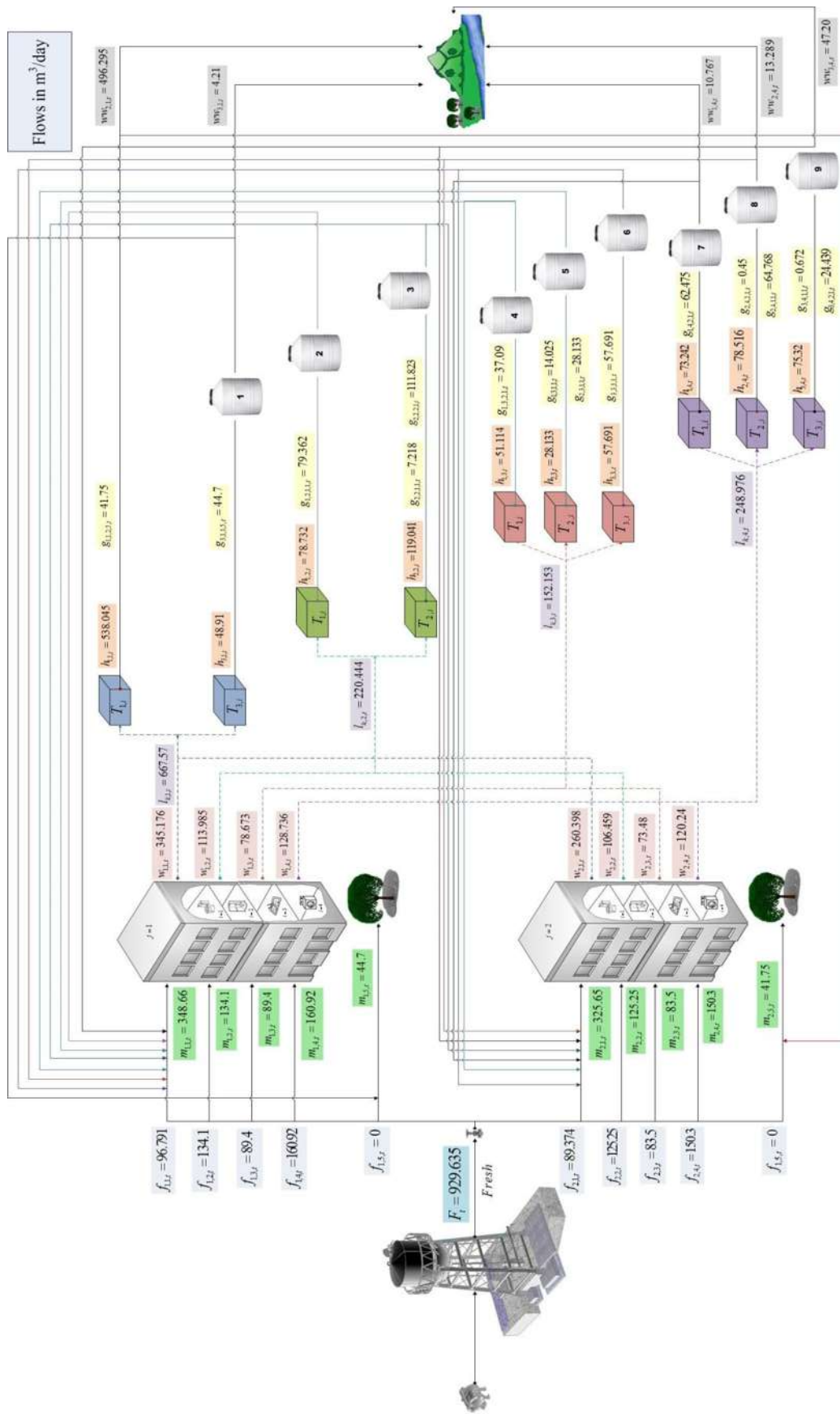


Figura 2.4. Diagrama de flujo con la minimización de agua fresca (Escenario A).

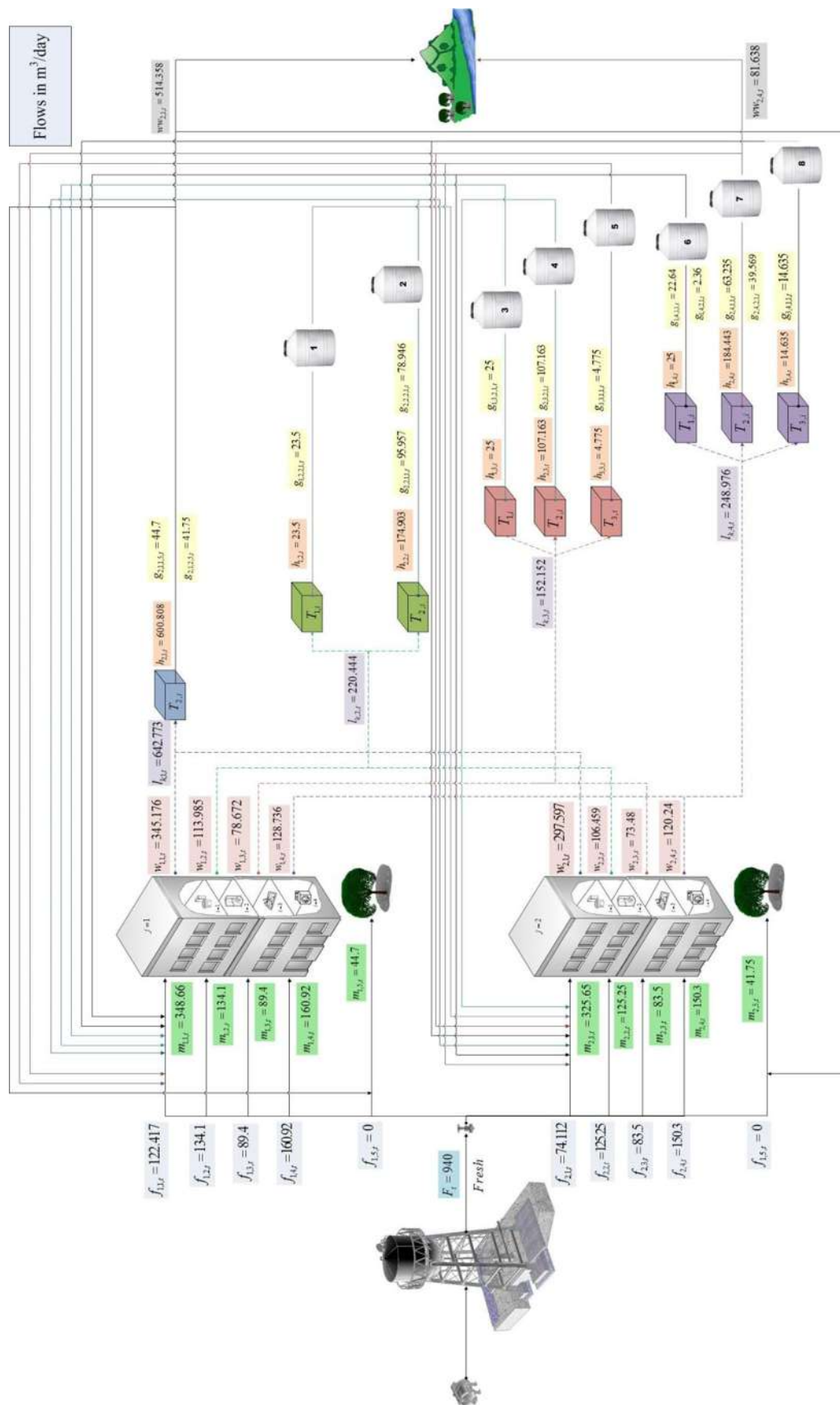


Figura 2.5. Diagrama de flujo para Escenario B.

Tabla 2.2. Flujos de agua para el caso de estudio.

Flujo (m ³ /día)	Sin Recirculación Escenario 0	Min TAC Escenario G	Min Fresh Escenario A	Escenario B
Flujo total de agua fresca	1 504	1 032	929	940
Flujo total de agua recirculada	0	471	574	564
Flujo total de agua de salida de usos	1 289	1 289	1 289	1289
Flujo total de agua de entrada al tratamiento	1 160	1 160	1 160	1,160
Flujo total de agua de salida del tratamiento	1 160	1 160	1 146	1,160
Flujo total de agua después de la mezcla	1 289	1 289	1 289	1,289
Agua tratada descargada al ambiente	1 160	688	571	595

La curva de Pareto (ver **Figura 2.6**) muestra los escenarios óptimos entre el mínimo *TAC* y el consumo de agua fresca. El escenario A muestra el consumo más bajo de agua fresca, pero con el más alto costo total anual, mientras que el escenario G muestra el consumo mayor de agua fresca pero con el costo total anual más bajo. Las otras opciones son soluciones que compensan estos dos objetivos contradictorios. A partir de esta curva de Pareto, las opciones B y C aparecen como soluciones atractivas, debido a que tienen costos (64.9% y 67.01%, respectivamente) más bajo que el escenario A, mientras que el agua fresca consumida es ligeramente mayor que el escenario A (es decir, 1.18% y 3.33% para los escenarios B y C, respectivamente). Por otra parte, el costo total anual para los escenarios B y C es ligeramente mayor que el del escenario G (19.42% y 12.43%

para los escenarios B y C, respectivamente), mientras que el agua fresca consumida es 8.91% y 6.97% menor que en el escenario G, respectivamente.

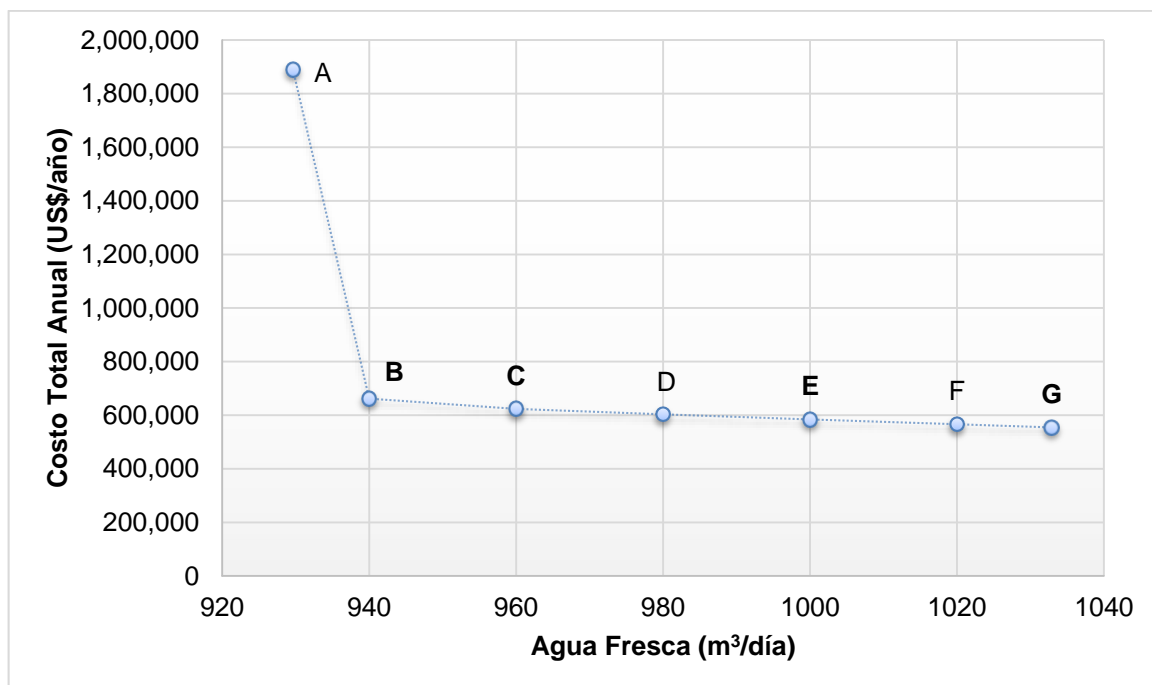


Figura 2.6. Soluciones óptimas para el reúso del agua.

Tabla 2.3. Capacidad de los tanques de almacenamiento de Escenario G (minimización del Costo Total Anual).

Tratamiento	Uso	Capacidad de Tanque (m ³)
Anaerobio	Ducha	25
Anaerobio	Lavaplatos	25
Anaerobio	Lavadora	25

No existen diferencias significativas en el costo total anual y el agua fresca consumida entre las soluciones de los escenarios B y C; sin embargo, sí existe diferencia en las condiciones de configuración y operación. Por lo tanto, se analiza en detalle la solución del escenario B, que es la mejor opción.

Tabla 2.4. Capacidad de los tanques de almacenamiento de Escenario A
(minimización de agua fresca).

Tratamiento	Uso	Capacidad de Tanque (m ³)
Aerobio	Ducha	25
	Lavaplatos	25
	Lavadora	25
Anaerobio	Ducha	25
	Lavaplatos	13.69
	Lavadora	25
Bioreactor con membrana	Inodoro	20.11
	Lavaplatos	21.52
	Lavadora	25

Escenario B

La solución del Escenario B tiene un TAC de US\$662,124/año, la demanda de agua fresca es de 940 m³/día y la cantidad total de agua residual descargada al ambiente es 596 m³/día, que proviene del inodoro y lavado de ropa. Esta solución requiere un tratamiento anaeróbico para las aguas residuales del inodoro, un aeróbico y anaeróbico para las aguas residuales de la ducha, y para las aguas residuales del lavavajillas y lavado de ropa son necesarios los tres tratamientos considerados (véase la **Figura 2.5**). Para el Escenario B se requieren ocho tanques, dos tanques para agua tratada de la ducha, tres tanques para agua tratada del lavavajillas y tres tanques de agua tratada de la lavandería (la **Tabla 2.5** muestra la capacidad de estos tanques). En este escenario B, el costo total anual se constituye por 33.83 % para el agua fresca, el 0.78% para el bombeo de agua fresca, el 2.02% para el bombeo de agua recirculada, 0.37% para el costo de capital de las unidades de tratamiento, 0.36 % para el costo de capital de tuberías para la salida y

recirculación, 0.18 % el costo de capital para las bombas, 0.46% para costo de capital para los tanques y 61.97 % para la operación de las unidades de tratamiento.

En la comparación de la solución para este escenario B respecto a la situación actual (Escenario 0), se observa una reducción del 37.5 % en el total de agua fresca consumida y el TAC aumenta 1.04 %. El agua regenerada principalmente se reutiliza en el inodoro y el jardín, y el agua regenerada corresponde principalmente a la utilizada en la ducha, lavavajillas y lavado de ropa.

De la comparación de los escenarios A, B y G, se determina que el costo total anual es de 185.38% y 240.82% mayor para el escenario A con respecto al escenario B y G, respectivamente, el consumo de agua fresca es de 1.17% y 9.98% más bajo que para el escenario B y G, respectivamente. Por otro lado, el escenario B es la solución más atractiva no obstante que se requiere un muy pequeño incremento en el consumo de agua fresca, pero con un ahorro significativo en el TAC.

Tabla 2.5. Capacidad de los tanques de almacenamiento de Escenario B.

Tratamiento	Uso	Capacidad de Tanque (m ³)
Aerobio	Ducha	22.05
	Lavaplatos	25
	Lavadora	25
Anaerobio	Ducha	25
	Lavaplatos	25
	Lavadora	25
Bioreactor con membrana	Lavaplatos	4.77
	Lavadora	14.63

CAPÍTULO 3.

IMPLEMENTACIÓN SIMULTÁNEA DEL REÚSO DE AGUA Y CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

En el problema abordado en este capítulo se considera un complejo habitacional, con un determinado número de casas y habitantes. También se conocen las demandas de agua para diferentes usos y el periodo de tiempo en que se requieren estas demandas, la precipitación pluvial mensual promedio, las posibles zonas de captación y lugares para acomodar los dispositivos de almacenamiento. El problema consiste entonces en la síntesis de la red de agua en el complejo residencial para satisfacer todas las demandas de agua en las distintas épocas a través de la instalación de sistemas de captación de agua de lluvia y sistemas de reúso de aguas grises, así como almacenamiento y reutilización de este recurso. La solución óptima debe tener en cuenta la configuración de la red y las condiciones de funcionamiento con el costo total anual mínimo y con el mínimo consumo de agua fresca. Para resolver este problema, se propone la superestructura mostrada en la **Figura 3.1**, donde a manera de ejemplo se representan sólo dos unidades de vivienda (que son también las potenciales zonas de captación de agua de lluvia) y cinco usos (inodoro, ducha, lavavajillas, lavandería y jardinería); sin embargo, la superestructura sin dificultad se puede extender a más unidades y usos. En esta figura, las líneas discontinuas representan el agua de salida de cada uso, las líneas continuas muestran el agua que puede ser reciclada para nuevos usos y las líneas gruesas indican el agua de lluvia captada. Diferentes tratamientos pueden ser considerados para la regeneración de aguas grises y agua de lluvia, de tal manera que la calidad del agua puede satisfacer las demandas de los diferentes usos. Hay que hacer notar que las aguas residuales se pueden mezclar con agua solamente de la misma calidad y toda el agua que se descarga al ambiente debe ser tratada para satisfacer las regulaciones ambientales. El agua de lluvia y las aguas regeneradas deben disponerse en diferentes sistemas de almacenamiento, ya que el agua de lluvia tiene mayor calidad. En base a la superestructura anterior, el modelo de optimización propuesta se presenta en la siguiente sección.

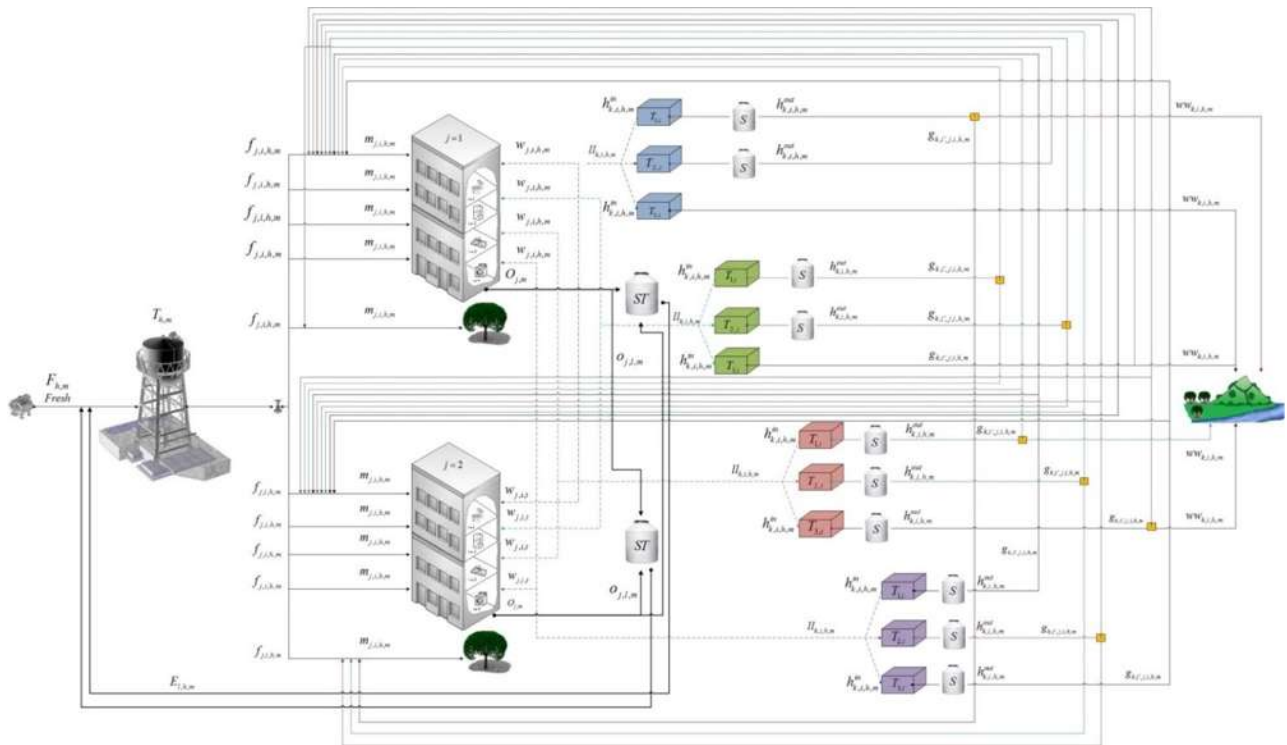


Figura 3.1. Representación esquemática del reúso de agua y captación de agua de lluvia en un complejo habitacional.

MODELO MATEMÁTICO

En esta sección se presenta el modelo de optimización propuesto para el diseño de sistemas de reutilización de agua y de recolección de agua de lluvia, el cual implica el tratamiento de agua, almacenamiento y distribución en un complejo residencial basado en la superestructura mostrada en la **Figura 3.1**. Donde i representa los usos (es decir, inodoro, ducha, lavavajillas, lavandería y jardinería), j representa las unidades o áreas de captación para el agua de lluvia, k las unidades de tratamiento de agua (es decir, tratamiento aerobio, tratamiento anaeróbico, bioreactor de membrana), l representa el número de unidades de almacenamiento para la captación de agua de lluvia. La formulación propuesta considera dos horizontes de tiempo, primero h que representa las horas del día y luego m representa los meses del año; esto debido a que las demandas de agua están en horas, mientras que la precipitación de agua de lluvia se representa por mes. El modelo propuesto se divide en dos secciones, la primera corresponde a las ecuaciones relacionadas con el reúso de agua que fue expuesta en el capítulo 2,

mientras que la segunda corresponde a la captación de aguas pluviales, la que se explica a continuación:

a) Ecuaciones asociadas a la captación de agua de lluvia

Balance en las áreas de captación. La precipitación media mensual (P_m) y la zona de captación acondicionada para cada unidad j (A_j) determinan el agua de lluvia recolectada para todos los periodos m ($O_{j,m}$):

$$O_{j,m} = P_m A_j, \quad \forall j \in J, \forall m \in M \quad (3.1)$$

Balance en los divisores después de las áreas de captación. El total de agua de lluvia capturada ($O_{j,m}$) puede ser distribuida a los sistemas de almacenamiento l ($O_{j,l,m}$), como sigue:

$$O_{j,m} = \sum_l O_{j,l,m}, \quad \forall j \in J, \forall m \in M \quad (3.2)$$

Balances para las unidades de almacenamiento. El balance para los tanques se describe por la siguiente ecuación:

$$ST_{l,m} = ST_{l,m-1} + \sum_j O_{j,l,m} - E_{l,m}, \quad \forall l \in L, \forall m \in M \quad (3.3)$$

donde $ST_{l,m}$ es el agua almacenada en el tanque l al final del periodo de tiempo m , $ST_{l,m-1}$ es el agua acumulada de periodos previos, $O_{j,l,m}$ es el agua captada y distribuida a cada sistema de almacenamiento, $E_{l,m}$ es el agua dirigida al tanque elevado. La ecuación (3.3a) representa el balance de agua almacenada en los tanques para asegurar que el agua disponible al final del primer período es igual a la del último período del año.

$$ST_{l,m=1} = ST_{l,m=13}, \quad \forall l \in L \quad (3.3a)$$

Balance en el tanque elevado. El tanque elevado almacena el agua fresca y agua de lluvia de cada unidad j , el cual se describe de la siguiente manera:

$$T_m = T_{m-1} + \sum_l E_{l,m} + \sum_h F_{h,m} D_m - \sum_j \sum_i \sum_h f_{j,i,h,m} D_m, \quad \forall m \in M \quad (3.4)$$

donde T_m es el agua acumulada al final del periodo de tiempo m , T_{m-1} es el agua disponible previo al final del periodo de tiempo, $F_{h,m}$ es el agua fresca de entrada al tanque and $f_{j,i,h,m}$ es el agua que se distribuye a los diferentes usos. El agua en el tanque elevado debe ser igual en el primer periodo y en el último periodo del año para asegurar continuidad.

$$T_{m=1} = T_{m=13} \quad (3.4a)$$

Área máxima disponible de recolección de agua de lluvia. La variable binaria y_j^{capt} determina la existencia del área de recolección de agua de lluvia para cada unidad j (A_j):

$$A_j \leq A_j^{\max} y_j^{capt}, \quad \forall j \in J \quad (3.5)$$

Donde el parámetro A_j^{\max} es el límite superior de cada área de captación.

Existencia de sistemas de almacenamiento para agua de lluvia. La variable binaria y_l^{stg} es usada para determinar la existencia de sistemas de almacenamiento para agua de lluvia, STG_l^{\max} es el límite superior para los sistemas de almacenamiento. De esta manera, cuando existen los sistemas de almacenamiento de agua de lluvia y_l^{stg} igual a 1, por lo tanto, el agua almacenada puede ser mayor o igual al límite superior (STG_l^{\max}), mientras que al no existir los sistemas de almacenamiento y_l^{stg} igual a cero y el agua almacenada debe ser cero. Esto se describe en la siguiente ecuación:

$$ST_l^{\max} \leq STG_l^{\max} y_l^{stg}, \quad \forall l \in L \quad (3.6)$$

Existencia de segmentos de tubería para el agua de lluvia. Para el agua de lluvia captada es necesario determinar la existencia de segmentos de tubería, las variables binarias $Z_{j,l}$ y X_l determinan la existencia de los segmentos de tubería del área de recolección j , a los sistemas de almacenamiento l y de los sistemas de almacenamiento l , al tanque elevado, respectivamente. Además, O^{\max} y E^{\max} son los flujos máximos permitidos en las tuberías. Lo anterior se modela con las siguientes ecuaciones:

$$o_{j,l}^{cap} \leq O^{\max} Z_{j,l}, \quad \forall j \in J, \forall l \in L \quad (3.7)$$

$$e_l^{cap} \leq E^{\max} X_l, \quad \forall l \in L \quad (3.8)$$

Capacidad máxima para los sistemas de almacenamiento de agua de lluvia. El agua acumulada en los sistemas de almacenamiento ($ST_{l,m}$) de todos los meses debe ser menor o igual a la capacidad máxima de los sistemas de almacenamiento (ST_l^{\max}).

$$ST_{l,m} \leq ST_l^{\max}, \quad \forall l \in L, \forall m \in M \quad (3.9)$$

Agua de lluvia distribuida desde los divisores. El agua de lluvia capturada y distribuida de los sistemas de almacenamiento ($o_{j,l,m}$) está limitada por la capacidad del depósito de almacenamiento (ST_l^{\max}), lo cual es modelado de la siguiente manera:

$$\sum_j o_{j,l,m} \leq ST_l^{\max}, \quad \forall l \in L, \forall m \in M \quad (3.10)$$

Capacidad del tanque elevado para el agua de lluvia. El agua de lluvia acumulada en el tanque elevado sobre todos los periodos de tiempo (T_m) debe ser menor o igual a la capacidad máxima del dispositivo (T^{\max}).

$$T_m \leq T^{\max}, \quad \forall m \in M \quad (3.11)$$

Capacidad del tanque elevado para el agua fresca. El agua fresca acumulada en el tanque de almacenamiento ($F_{h,m}$) debe ser menor o igual que la capacidad máxima asociada a todos los periodos de tiempo (T^{\max}).

$$F_{h,m} \leq T^{\max}, \quad \forall h \in H, \forall m \in M \quad (3.12)$$

Es importante señalar que sólo existe un tanque elevado; el agua de lluvia tratada es mezclada con el agua fresca, las ecuaciones (39) y (40) indican los límites para los distintos tipos de agua para el mismo sistema de almacenamiento.

Capacidad para los segmentos de tubería asociados con el agua de lluvia colectada. El agua de lluvia colectada de todos los periodos ($o_{j,l,m}$) debe ser menor o igual a la capacidad del segmento de tubería que va del área de captación a los tanques de almacenamiento ($o_{j,l}^{cap}$).

$$o_{j,l,m} \leq o_{j,l}^{cap}, \quad \forall j \in J, \forall l \in L, \forall m \in M \quad (3.13)$$

Capacidad para los segmentos de tubería asociada al tanque elevado. El flujo superior del agua colectada y distribuida al tanque elevado ($E_{l,m}$) debe ser menor o igual a la capacidad del segmento de tubería que va de los tanques de almacenamiento al tanque elevado (E_l^{cap}).

$$E_{l,m} \leq E_l^{cap}, \quad \forall l \in L, \forall m \in M \quad (3.14)$$

b) Costos asociados a la recolección de agua de lluvia

Costo de capital para las áreas de colección de agua de lluvia. El costo fijo unitario ($CF_j^{\text{captation}}$) es activado por la variable binaria y_j^{capt} y el costo variable unitario $CV_j^{\text{captation}}$ determina el costo de capital del área de recolección.

$$CapCost = \sum_j \left[CF_j^{\text{captation}} y_j^{\text{capt}} + CV_j^{\text{captation}} (A_j)^\delta \right] \quad (3.15)$$

Donde δ es el exponente asociado a las economías de escala.

Costo de capital para los sistemas de almacenamiento de agua de lluvia. El costo asociado a los sistemas de almacenamiento de agua de lluvia incluye el costo fijo unitario (CF_1^{storage}) que es activado cuando la variable binaria y_l^{stg} toma valor de uno, así como el costo variable unitario CV_1^{storage} que multiplica a la capacidad máxima de los sistemas de almacenamiento (ST_l^{max}):

$$\text{StorageCost} = \sum_l \left[CF_1^{\text{storage}} y_l^{\text{stg}} + CV_1^{\text{storage}} (ST_l^{\text{max}})^\alpha \right] \quad (3.16)$$

donde el parámetro α es el exponente de las economías de escala.

Costo de capital para el tanque elevado para el agua de lluvia. El tanque elevado siempre debe existir para almacenar el agua fresca y el agua de lluvia; por lo tanto, la parte fija del costo ($CF^{\text{ElevStorage}}$) no se multiplica por una variable binaria. La parte variable ($CV^{\text{ElevStorage}}$) se relaciona con la capacidad máxima del tanque elevado and α es un exponente asociado a las economías de escala.

$$\text{ElevstorageCost} = \left[CF^{\text{ElevStorage}} + CV^{\text{ElevStorage}} (T^{\text{max}})^\alpha \right] \quad (3.17)$$

Costo de capital para las tuberías para agua de lluvia. El costo de capital de las tuberías para transportar el agua de lluvia colectada considera el costo fijo de los segmentos de tubería de las áreas de captación a los sistemas de almacenamiento ($CF_{j,l}^{\text{pipe}}$) y el transporte de los sistemas de almacenamiento a el tanque elevado (CF_1^{pipe}), cada una es activada por las variables binarias $Z_{j,l}$ y X_l , respectivamente. Además, los costos variables $CV_{j,l}^{\text{pipe}}$ y CV_1^{pipe} están asociados con la máxima capacidad para cada tipo de tubería.

$$\text{PipeCost} = \sum_j \sum_l \left[CF_{j,l}^{\text{pipe}} Z_{j,l} + CV_{j,l}^{\text{pipe}} (o_{j,l}^{\text{cap}})^\beta \right] + \sum_l \left[CF_1^{\text{pipe}} X_l + CV_1^{\text{pipe}} (E_l^{\text{cap}})^\beta \right] \quad (3.18)$$

donde el parámetro β es el exponente de las economías de escala.

Costo del tratamiento de agua de lluvia. El costo de tratamiento para el agua colectada se calcula a través del costo unitario $Cost^{\text{treat}}$ y el agua capturada $o_{j,l,m}$ sobre todos los periodos de tiempo m .

$$TreatCost = \sum_j \sum_l \sum_m Cost^{treat} o_{j,l,m} \quad (3.19)$$

Cabe señalar que el tratamiento de agua de lluvia es más simple que el tratamiento de aguas residuales; por lo tanto, sólo considera un tratamiento que incluye la filtración y cloración.

Costo de bombeo de agua de lluvia. El costo del bombeo de agua de lluvia para el segmento de las áreas de captación a los sistemas de almacenamiento y de los sistemas de almacenamiento a el tanque elevado se contempla en los costos unitarios $Cost_{j,l}^{pump}$ y $Cost_l^{pump}$, respectivamente.

$$PumpingCost = \sum_j \sum_l \sum_m Cost_{j,l}^{pump} o_{j,l,m} + \sum_l \sum_m Cost_l^{pump} E_{l,m} \quad (3.20)$$

Costo total anual. Una función objetivo es la minimización del costo total anual, el cual incluye el costo de capital para las unidades de tratamiento del agua residual doméstica ($C_{k,i}^{capTU}$), costo de capital para tuberías que van desde los usos ($C_{j,i}^{capPW}$), costo de capital de los tanques para el agua regenerada ($C_{k,i}^{capTanks}$), costo de capital para las tuberías para agua regenerada ($C_{k,i',j,i}^{capPg}$), costo de capital de bombas para agua regenerada ($C_{k,i',j,i}^{cappump}$), costo de capital para el área de captación ($CapCost$), costo de capital para los sistemas de almacenamiento para agua de lluvia ($StorageCost$), costo de capital para el tanque elevado ($ElevstorageCost$), costo de capital de tuberías para la distribución de agua de lluvia ($PipeCost$), costo de bombeo de agua fresca (C^{PFW}), costo de agua fresca (C^{FW}), costo de bombeo para agua regenerada ($C_{k,i',j,i}^{pumpg}$), costo de operación de las unidades de tratamiento para agua residual ($C_{k,i}^{opTreat}$), costo del tratamiento para agua de lluvia ($TreatCost$) y costo de bombeo de agua de lluvia colectada ($PumpingCost$):

$$TAC = K_F \left(\sum_k \sum_i C_{k,i}^{capTU} + \sum_j \sum_i C_{j,i}^{capPW} + \sum_k \sum_i C_{k,i}^{capTanks} + \sum_k \sum_{i'} \sum_j \sum_i C_{k,i',j,i}^{capPg} \right. \\ \left. + \sum_k \sum_{i'} \sum_j \sum_i C_{k,i',j,i}^{cappump} + CapCost + StorageCost + ElevstorageCost + PipeCost \right) \quad (3.21) \\ + C^{PFW} + C^{FW} + \sum_k \sum_{i'} \sum_j \sum_i C_{k,i',j,i}^{pumpg} + \sum_k \sum_i C_{k,i}^{opTreat} + TreatCost + PumpingCost$$

donde K_F es un factor para anualizar los costos de capital y se considera la tasa de interés y la vida útil del proyecto en años.

Consumo total de agua fresca. Otra función objetivo es la minimización del total de agua fresca consumida y se representa como sigue:

$$TOTFRESH = \sum_h \sum_m F_{h,m} D_m \quad (3.22)$$

Función objetivo. La función objetivo es la minimización simultánea del costo total anual (TAC) y el total de agua fresca consumida ($TOTFRESH$):

$$Función\ objetivo = \{MinTAC; MinTOTFRESH\} \quad (3.23)$$

CASO DE ESTUDIO

Un caso de estudio de la ciudad de Morelia en México fue considerado para probar la aplicabilidad de la formulación matemática propuesta, la cual corresponde al mismo complejo habitacional llamado "Villas del Pedregal" (ver **Figura 2.2**). Recientemente, la ciudad de Morelia ha sido muy afectada por las consecuencias del cambio climático produciendo una disminución significativa en el agua fresca disponible para el consumo humano; además, debido a los problemas sociales, mucha gente ha emigrado de las zonas rurales, aumentando drásticamente la demanda de agua en la ciudad.

Tabla 3.1. Precipitación promedio en la ciudad de Morelia.

Mes	Precipitación (mm)	Mes	Precipitación (mm)
Enero	15	Julio	155
Febrero	7	Agosto	130
Marzo	23	Septiembre	75

Abril	60	Octubre	13
Mayo	140	Noviembre	12
Junio	165	Diciembre	19

Por otra parte, la cantidad total de precipitaciones en Morelia se ha modificado (véase la **Tabla 3.1**), lo que afecta la recarga del acuífero de la ciudad. El complejo residencial de Villas del Pedregal cuenta con un total de 6.916 habitantes, con un consumo total de 538,376 m³/año de agua fresca para satisfacer los requisitos para el inodoro, ducha, lavavajillas, lavandería y jardinería. La **Tabla 3.2** describe esquemáticamente el complejo residencial; se han tomado en cuenta dos unidades o zonas con 894 y 835 viviendas, respectivamente, y un promedio de cuatro habitantes por cada casa fue considerado. Por otra parte, la **Tabla 3.2** muestra la superficie disponible que puede ser acondicionada para captar el agua de lluvia.

Para satisfacer los requerimientos del complejo residencial, el modelo de optimización propuesto para la síntesis de una red de agua que implica simultáneamente la captación de agua de lluvia y la reutilización de aguas grises. Los costos unitarios asociados al reúso de agua residual son los siguientes: el costo unitario de agua fresca es de US\$0.653/m³, US\$0.0152/m³ para el bombeo de agua fresca, US\$0.0652/m³ para el bombeo de aguas grises recicladas; el costo fijo es de US\$100 para tuberías de recirculación de agua, US\$2,614 para bombas para recirculación, US\$1,000 para las unidades de tratamiento, US\$100 para tanques de almacenamiento y el costo variable es de US\$60/m³ para tuberías de recirculación, US\$50/m³ para tuberías de salida de los usos, US\$60/m³ para unidades de tratamiento y US\$176/m³ para los tanques de almacenamiento de agua regenerada.

Tabla 3.2. Áreas de captación disponibles para el complejo residencial “Villas del Pedregal”.

Unidad	Hogares	Habitantes	Área máxima disponible (m ²)
1	894	3,576	64,654
2	835	3,340	44,004

Los costos de operación para las unidades de tratamiento son los siguientes: US\$3.1 a 3.9/m³ para el tratamiento aeróbico, US\$0.4 to 0.7/m³ para el tratamiento anaeróbico y 5.2 a 6.5/m³ para el bioreactor de membrana. Mientras que los costos asociados a la captación de agua de lluvia se presentan a continuación: US\$0.1 para el tratamiento de agua de lluvia, US\$0.01-0.07 para el bombeo de agua de lluvia de los dispositivos de almacenamiento al tanque elevado y US\$0.03-0.09 para el bombeo de agua de lluvia de las áreas de captación a los dispositivos de almacenamiento; los costos fijos considerados son: US\$1,000 para el tanque elevado, US\$100 para las áreas de captación de agua de lluvia, US\$10-20 para los segmentos de tubería que van de los dispositivos de almacenamiento al tanque elevado, US\$4.5-7.8 para los segmentos de tubería que van de las áreas de captación a los dispositivos de almacenamiento, US\$150-200 para los sistemas de almacenamiento; y los costos variables asociados a la captación de agua de lluvia son: US\$100 para el tanque elevado, US\$0.8-0.9 para las áreas de captación, US\$0.25-0.60 para los segmentos de tubería que van de los dispositivos de almacenamiento al tanque elevado, US\$0.32-0.66 para los segmentos de tubería que van de las áreas de captación a los dispositivos de almacenamiento y US\$0.22-0.41 para los sistemas de almacenamiento para agua captada.

Luego, el problema fue codificado en el software GAMS (Brooke *et al.*, 2014); con la utilización de los solvers DICOPT, CONOPT y CPLEX para resolver los problemas mixto enteros no lineales, no lineales y lineales, respectivamente. El problema consiste de 81,054 variables continuas, 216 variables binarias, 142,802 ecuaciones, y fue resuelto en una computadora con un procesador i7 de 2.10 GHz con 8 GB de memoria RAM en aproximadamente 0.796s de tiempo. Se consideraron diferentes escenarios y la discusión se expresa en las siguientes secciones.

Escenarios analizados

Para mostrar las ventajas de la metodología propuesta se hizo un análisis de diferentes escenarios. El primero corresponde al caso cuando se implementó la metodología sin restricciones, el segundo corresponde al caso en que sólo la recolección de agua de lluvia se considera sin involucrar el reciclaje y reutilización de

aguas grises y, finalmente, el último corresponde al caso en que sólo el reciclaje y reutilización de aguas grises se considera, sin involucrar la captura de aguas pluviales. Además, la metodología propuesta fue aplicada para resolver el problema de optimización multi-objetivo y construir una curva Pareto para identificar los escenarios atractivos desde el punto de vista de los dos objetivos considerados.

Tabla 3.3. Comparación de costos para los escenarios X, Y, Z y A.

Concepto (US\$/año)	Área y flujo de recirculación =0 Escenario X	Flujo de recirculación =0 Escenario Y	Área =0 Escenario Z	Sistemas Integrados Escenario A
Costo de agua fresca	351,560	327,882	244,740	221,062
Costo de bombeo de agua fresca	8,183	7,632	5,696	5,145
Costo de bombeo de recirculación	0	0	10,665	10,665
Costo de capital para tubería de recirculación	0	0	708	708
Costo de capital para tubería de salida de usos	1,381	1,381	1,381	1,381
Costo de capital para tanques	0	0	1,352	1,352
Costo de capital para bombas para recirculación	0	0	2,335	2,335
Costo de capital para unidades de tratamiento	1,981	1,981	1,981	1,981
Costo de operación de unidades de tratamiento	280,348	280,348	280,348	280,348
Costo de capital para áreas de captación	0	3,573	0	3,573
Costo de capital para tuberías para agua de lluvia	0	522	0	523
Costo de capital para almacenamiento de agua de lluvia	0	365	0	365
Costo de capital para tanque elevado	690	683	510	504

Costo de bombeo de agua de lluvia	0	3,614	0	3,613
Costo de tratamiento de agua de lluvia	0	3,626	0	3,626
Inversión total	4,052	8,507	8,269	12,725
Costo total anual	644,144	631,610	549,720	537,190

De esta manera, las **Tablas 3.3** y **3.4** muestran los costos y flujos involucrados para cuatro escenarios que corresponden a la minimización del costo total anual, donde el escenario X corresponde al caso cuando no se permite el reúso de aguas grises y la captación de agua de lluvia, el escenario Y corresponde al caso cuando sólo se permite la captación de agua de lluvia, el escenario Z cuando sólo existe el reúso de aguas residuales domésticas y finalmente, el escenario A corresponde a la integración del sistema; tanto el reúso de agua como la captación de agua de lluvia. A continuación se discuten los escenarios individualmente.

Escenario X

El escenario X corresponde al caso cuando no es considerada la integración de reúso de aguas residuales y captación de agua de lluvia; en este caso, el costo total anual (*TAC*) es US\$644,144/año y está constituido de 54.57% para el agua fresca, 1.27% para bombeo de agua fresca, 0.21% para el costo de capital de tuberías, 0.30% para el costo de capital de las unidades de tratamiento, 43.52% para operación de unidades de tratamiento, 0.10% para el tanque elevado (ver **Figura 3.3**) y la inversión total representa el 0.62% del *TAC* (para más detalles ver la **Tabla 3.3**). En este caso, el consumo total de agua fresca es de 538,376 m³/año, el cual representa el 100% del total de agua requerida, y el flujo de agua descargada al ambiente es 415,034 m³/año (ver **Tabla 3.4**).

Escenario Y

El escenario Y considera la solución óptima desde el punto de vista económico para el caso cuando sólo se considera la captación de agua de lluvia y el reúso de aguas grises no se involucra. Para este caso, el *TAC* es US\$631,610/año, y está constituido por 51.91% para agua fresca, 1.20% para bombeo de agua fresca,

0.21% para el costo de capital de tuberías para reúso de agua residual, 0.31% para el costo de capital de unidades de tratamiento, 44.38% para el costo de operación de unidades de tratamiento, 0.56% costo de capital para áreas de captación, 0.08% para el costo de capital de tuberías para agua de lluvia captada, 0.05% para el costo de capital de almacenamiento de agua de lluvia, 0.10% para el costo de capital para el tanque elevado, 0.57% para bombeo de agua captada, 0.57% para el tratamiento de agua de lluvia (ver **Figura 3.3**), y la inversión total representa el 1.27% del TAC (ver **Tabla 3.3**). En este caso, el total de agua necesaria se satisface con 93.26% de agua fresca y un 6.73% con agua de lluvia (ver **Figura 3.5**); el agua fresca requerida es 502,116 m³/año, el agua de lluvia captada es 36,260 m³/año y el agua descargada al ambiente es 415,034 m³/año (ver **Tabla 3.4**). Al comparar el escenario Y con el escenario X se observó una disminución de 6.73% en el consumo de agua fresca y una reducción de 1.94% en el costo total anual.

Tabla 2. Comparación de flujos para los escenarios X, Y, Z y A.

Flujo (m ³ /año)	Área y flujo de recirculación=0 Escenario X	Flujo de recirculación=0 Escenario Y	Área =0 Escenario Z	Sistemas Integrados Escenario A
Agua fresca	538,376	502,116	374,793	338,533
Agua requerida	538,376	538,376	538,376	538,376
Agua captada	0	36,260	0	36,260
Agua recirculada	0	0	163,583	163,583
Agua de salida de los usos	461,149	461,149	461,149	461,149
Agua después de la mezcla de flujos	461,149	461,149	461,149	461,149
Agua de entrada a los tratamientos	415,034	415,034	415,034	415,034
Agua de salida de los tratamientos	415,034	415,034	415,034	415,034

Agua tratada descargada al ambiente	415,034	415,034	251,451	251,451
--	---------	---------	---------	---------

Escenario Z

El escenario Z corresponde a la solución económica óptima para el caso que incluye la recirculación y reúso de agua residual doméstica pero no se incluye la captación de agua de lluvia; en este caso el TAC es US\$549,720/año y está constituido por 44.52% para el agua fresca, 1.03% para el bombeo de agua fresca, 1.94% para el bombeo de agua reciclada, 0.12% para el costo de capital de tuberías para recirculación de agua, 0.25% para el costo de capital de las tuberías de salida de los usos, 0.24% para el costo de capital de tanques para el agua reciclada, 0.42% para el costo de capital de bombas para la recirculación de agua, 0.36% para el costo de capital de las unidades de tratamiento, 50.99% para el costo de operación de las unidades de tratamiento, 0.09% para el costo de capital del tanque elevado (ver **Figura 3.3**), y la inversión total representa un 1.50% del TAC (ver **Tabla 3.3**). En este caso, el agua necesaria se satisface con 69.61% de agua fresca y 30.38% de agua reciclada; el total de agua fresca requerida es 374,793 m³/año, el agua reusada es 163,583 m³/año y el agua descargada al ambiente es 251,451 m³/año (ver **Tabla 3.4**). Al comparar este escenario con respecto a los escenarios X y Y, el costo total anual es 14.65% y 12.96% menor que X and Y, respectivamente. Y el consumo de agua fresca es 30.38% y 25.35% menor que en los escenarios X and Y, respectivamente.

Escenario A

El escenario A corresponde a la solución económica óptima para el sistema integrado, donde se considera simultáneamente el reciclaje de agua residual doméstica y la captación de agua de lluvia; en este caso, el TAC es US\$537,190/año y está constituido por 41.15% para agua fresca, 0.95% para el bombeo de agua fresca, 1.98% para bombeo de agua recirculada, 0.13% para el costo de capital de tuberías para recirculación, 0.25% para costo de capital de tuberías de salida de los usos, 0.25% para costo de capital para tanques para agua reusada, 0.43% para

costo de capital de bombas para recirculación, 0.36% para costo de capital para unidades de tratamiento, 52.18% para costo de operación de unidades de tratamiento, 0.66% para costo de capital para áreas de captación, 0.097% para costo de capital de tuberías para agua de lluvia, 0.067% para costo de capital de tanques para agua de lluvia, 0.093% para costo de capital para tanque elevado, 0.67% para costo de bombeo de agua de lluvia, 0.67% para el tratamiento (ver **Figura 3.4**), y la inversión representa 2.36% del TAC (ver **Tabla 3.3**).

En este caso, el agua necesaria se satisface con 62.88% de agua fresca, 30.38% de agua reusada y un 6.73% de agua de lluvia (ver **Figura 3.5**); el agua fresca requerida es 338,533 m³/año, el agua reusada es 163,583 m³/año, el agua de lluvia capturada es 36,260 m³/año y el agua descargada al ambiente es 251,451 m³/año (ver **Tabla 3.4**).

Tabla 3. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario A.

Hora	Sistema Anaerobio (m ³)					
	Unidad 1			Unidad 2		
	Inodoro	Ducha	Lavavajillas	Inodoro	Ducha	Lavandería
	Jardinería	Inodoro	Inodoro	Jardinería	Inodoro	Inodoro
6	-	-	-	-	158.72	-
7	-	158.72	-	-	158.72	-
8	321.84	78.75	82.16	300.6	150.3	-
9	-	158.72	163.11	-	105.82	194.77
10	-	-	160.92	-	-	150.3
12	-	-	136.88	-	-	12.52
13	-	-	163.11	-	-	-
14	-	157.27	83.02	-	142.73	12.47
16	-	145.49	163.11	-	13.22	96.45
19	-	158.72	133.39	-	141.27	178.54
20	214.56	-	-	200.4	-	-

21	-	158.72	-	-	150.3	-
22	-	16.84	144.07	-	150.3	-
23	-	8.42	102.40	-	150.3	-
TOTAL	536.4	1041.69	1332.21	501	1321.70	645.07

La solución del escenario A requiere un sistema anaerobio para el tratamiento de aguas residuales, donde el agua tratada del inodoro es recirculada para uso en jardinería; además el agua proveniente de la ducha, lavavajillas y lavandería es recirculada al inodoro (ver **Tabla 3.5**). La capacidad de las unidades de tratamiento es de 102 m³ para el agua residual del inodoro, 44 m³ para el agua residual de la ducha, 30 m³ para el agua residual del lavavajillas y 82 m³ para el agua residual de la lavandería (ver **Tabla 3.7**).

Tabla 3.6. Agua de lluvia recolectada en cada tanque por mes para el escenario A.

Mes	Tanque de almacenamiento (m ³)						Total de agua de lluvia recolectada (m ³)
	1	2	3	4	5	6	
Enero	846.36	-	-	-	-	-	846.36
Febrero	668.18	-	-	-	-	-	668.18
Marzo	311.81	-	-	-	-	-	311.81
Abril	1000	-	-	24.54	-	-	1024.54
Mayo	1000	-	649.54	1023.18	-	-	2672.72
Junio	1000	1200	1500	1300	625	611.36	6236.36
Julio	1000	1200	1500	1300	1250	1100	7350
Agosto	1000	1200	1500	1300	1250	654.54	6904.54
Septiembre	1000	1200	1500	1300	368	421.97	5789.97
Octubre	1000	-	1125	1215.90	-	-	3340.90
Noviembre	579.09	-	-	-	-	-	579.09
Diciembre	534.54	-	-	-	-	-	534.54

Además, se requieren tres tanques de almacenamiento para el agua regenerada con una capacidad de 25 m³ cada uno (ver **Tabla 3.8**). La superficie usada para la captación de agua de lluvia es 44,545.455 m² en la unidad 1, la cual representa el 40.99 % del área total disponible de las dos zonas estudiadas del desarrollo habitacional (ver **Tabla 3.9**). La **Tabla 3.6** muestra la cantidad de agua de lluvia capturada por mes y en cada dispositivo de almacenamiento.

Al comparar los escenarios anteriores, el costo total anual del escenario A es 16.60%, 14.94% y 2.27% menor que el de los escenarios X, Y y Z, respectivamente. El consumo de agua fresca del escenario A es 37.11%, 32.57% y 9.67% menor que el de los escenarios X, Y y Z, respectivamente. Hay que hacer notar que la aplicación de la estrategia de optimización para la reutilización de agua residual doméstica y la captura de agua de lluvia es una alternativa viable para reducir el consumo de agua fresca y mejorar la sostenibilidad del sistema a un bajo costo.

Tabla 3.7. Capacidad de las unidades de tratamiento para diferentes escenarios (m³).

Tratamiento	Uso	(m ³)				
		Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E
Aerobio	Inodoro	-	-	-	-	-
	Ducha	-	-	12.24	12.24	12.24
	Lavavajillas	-	15.21	15.21	12.61	13.44
	Lavandería	-	-	0.84	9.25	9.25
Anaerobio	Inodoro	102	102.70	102.70	102.70	102.70
	Ducha	44	44.09	31.84	31.84	31.84
	Lavavajillas	30	15.21	15.21	15.21	15.21
	Lavandería	82	82.99	82.14	73.73	64.47
Bioreactor de	Inodoro	-	-	-	-	-
	Ducha	-	-	-	-	-

membrana	Lavavajillas	-	-	-	2.59	1.76
	Lavandería	-	-	-	-	9.25

Tabla 4. Capacidad de los sistemas de almacenamiento para el agua regenerada para diferentes escenarios (m^3).

Tratamiento	Uso	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E
Aerobio	Inodoro	-	-	-	-	-
	Ducha	-	-	22.04	22.04	22.04
	Lavavajillas	-	17.9	25	25	25
	Lavandería	-	-	2.27	25	25
Anaerobio	Inodoro	-	-	-	-	-
	Ducha	25	25	25	25	25
	Lavavajillas	25	25	25	25	25
	Lavandería	25	25	25	25	25
Bioreactor de membrana	Inodoro	-	-	-	-	-
	Ducha	-	-	-	-	-
	Lavavajillas	-	-	-	4.67	4.77
	Lavandería	-	-	-	-	25

Escenario E

El escenario E corresponde a la solución de los sistemas integrados minimizando el consumo total de agua fresca; en este caso el TAC es de US\$667.060/año, que está constituida por 29.44% para el agua fresca, 0.68% para el bombeo de agua fresca, 1.96% para el bombeo agua regenerada, 0.16% para el costo de capital de las tuberías para la recirculación, 0.20% en costo de capital para las tuberías de salida de las unidades, 0.47% en costo de capital para los tanques

de agua regenerada, 0.64% en costo de capital para las bombas de recirculación, 0.37% para el costo de capital para unidades de tratamiento de aguas residuales, 64.20% para el costo de operación de las unidades de tratamiento, 0.53% en costo de capital para la recolección de aguas pluviales, 0.078% en costo de capital para las tuberías de recolección de aguas pluviales, 0.054% en costo de capital para el almacenamiento de agua de lluvia, 0.069% para el costo de capital para depósito elevado, 0.54% para el costo de bombeo para agua de lluvia, 0.54% para el costo de tratamiento de agua de lluvia (ver **Figura 3.4**), y la inversión total representa el 2.60% del TAC (ver **Tabla 3.12**).

En este caso, el agua que se necesita se satisface con 55.87% de agua fresca, 37.38% con agua regenerada y 6.73% con agua de lluvia recolectada; el agua fresca total requerida es 300,838 m³/año, el agua regenerada es 201,278 m³/año, el agua de lluvia recolectada es 36,260 m³/año y las aguas vertidas al ambiente son 213,756 m³/año (ver **Tabla 3.13**).

La solución del escenario E requiere tres sistemas para el tratamiento de las aguas residuales (anaeróbico, aeróbico y bioreactor de membrana); de esta manera, las aguas residuales del inodoro se reciclan al jardín, mientras que las aguas residuales de la ducha, el lavavajillas y lavandería se reciclan al baño (véanse las **Tablas 11a y 11b**). La capacidad de las unidades de tratamiento se muestra en la **Tabla 3.7**. Por otra parte, se necesitan ocho tanques para el almacenamiento de agua regenerada con una capacidad de 25 m³ para seis tanques y dos tanques de capacidad de 4.775 y 22.046 m³ (ver **Tabla 3.8**).

Tabla 5. Área de captación utilizada para los diferentes escenarios.

Escenario	Área utilizada (m ²)	
	Unidad 1	Unidad 2
A	44,545.45	-
B	44,545.45	-
C	44,545.45	-
D	44,545.45	-

E	44,545.45	-
---	-----------	---

La superficie dedicada a la captación de aguas pluviales es 44,545.455 m² de la unidad 1, que representa 40.99% del área disponible en cada unidad del complejo residencial (ver **Tabla 3.9**). La **Tabla 3.10** muestra la cantidad de agua de lluvia captada para cada mes y cada dispositivo de almacenamiento; cabe hacer notar que el agua de lluvia se capta en una sola unidad del complejo de viviendas. Comparando la solución del escenario E con respecto a la solución del escenario X (sin integración), se observa una reducción de 44.12% en el consumo total de agua fresca, mientras que el TAC se incrementa en sólo un 3.55%.

Tabla 6. Agua de lluvia recolectada en cada tanque por mes para el escenario E.

Mes	Tanque de almacenamiento (m ³)						Total de agua de lluvia recolectada (m ³)
	1	2	3	4	5	6	
Enero	846.36	-	-	-	-	-	846.36
Febrero	668.18	-	-	-	-	-	668.18
Marzo	311.81	-	-	-	-	-	311.81
Abril	1000	-	-	24.54	-	-	1024.54
Mayo	1000	-	1125	547.72	-	-	2672.72
Junio	1000	1200	1500	1300	686.36	550	6236.36
Julio	1000	1200	1500	1300	1250	1100	7350
Agosto	1000	1200	1500	1300	804.54	1100	6904.54
Septiembre	1000	1200	1500	1300	240.90	550	5790.90
Octubre	1000	-	1125	1215.90	-	-	3340.90
Noviembre	579.09	-	-	-	-	-	579.09
Diciembre	534.54	-	-	-	-	-	534.54

Tabla 7a. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario E.

Hora	Sistema aerobio (m ³)			Sistema anaerobio (m ³)							Bioreactor de membrana (m ³)	
	Unidad 2			Unidad 1				Unidad 2			Unidad 1	
	Ducha	Lavavajilla	Lavandería	Inodoro	Ducha	Lavavajilla	Lavandería	Inodoro	Ducha	Lavandería	Lavavajilla	Lavandería
	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Jardinería	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Jardinería	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Inodoro
6	-	-	-	-	61.80	-	-	-	96.92	-	-	-
7	-	-	-	-	82.40	-	-	-	235.03	-	-	-
8	-	-	-	321.84	78.75	82.16	-	300.6	150.3	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	321.84	-	-	300.6	-	-
10	-	-	-	-	-	-	160.92	-	-	150.3	-	-
12	59.39	57.57	33.33	-	-	117.51	-	-	-	-	7.64	35.76
13	61.34	60	66.3	-	13.73	135.91	22.13	-	18.82	18.82	11.46	60
14	61.34	60	66.3	-	41.24	135.91	125.58	-	214.46	30.40	11.46	60
16	61.34	60	66.3	-	74.23	135.91	13.51	-	99.67	-	11.46	60

Tabla 8. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario E (continuación).

Hora	Sistema aerobio (m ³)			Sistema anaerobio (m ³)							Bioreactor de membrana (m ³)	
	Unidad 2			Unidad 1				Unidad 2			Unidad 1	
	Ducha	Lavavajilla	Lavandería	Inodoro	Ducha	Lavavajilla	Lavandería	Inodoro	Ducha	Lavandería	Lavavajilla	Lavandería
	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Jardinería	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Jardinería	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Inodoro
19	-	60	66.3	-	35.41	135.91	85.44	-	236.41	4.10	11.46	60
20	61.34	-	-	214.56	-	-	-	200.4	-	-	-	-
21	-	0.48	0.97	-	63.27	73.46	-	-	148.84	-	3.82	20.36
22	1.45	1.45	0.48	-	82.40	74.64	-	-	146.89	-	-	3.87
23	0.48	0.48	-	-	44.16	116.78	-	-	149.32	-	-	-
TOTAL	306.71	300	299.99	563.4	577.43	1008.21	729.42	501	1496.70	504.23	57.3	300

Tabla 3.12. Comparación de costos para diferentes escenarios de la curva Pareto del caso de estudio.

Concepto (dólares/año)	Min TAC	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Min Fresh
	Escenario A				Escenario E
Costo de agua fresca	221,062	216,796	208,960	202,430	196,447
Costo de bombeo de agua fresca	5,145	5,046	4,864	4,712	4,572
Costo de bombeo de recirculación	10,665	11,091	11,874	12,526	13,123
Costo capital para tubería de recirculación	708	765	976	1,047	1,095
Costo capital para tubería de salida de usos	1,381	1,381	1,381	1,381	1,381
Costo de capital para tanques	1,352	1,677	2,251	2,744	3,196
Costo de capital para bombas para recirculación	2,335	2,901	3,649	3,983	4,289
Costo de capital para unidades de tratamiento	1,981	2,081	2,281	2,381	2,481
Costo de operación de unidades de tratamiento	280,348	299,948	336,225	373,350	428,304
Costo de capital para áreas de captación	3,573	3,573	3,573	3,573	3,573
Costo de capital para tuberías para agua de lluvia	523	525	521	527	525
Costo de capital para almacenamiento de agua de lluvia	365	365	365	365	365
Costo de capital para tanque elevado	504	496	483	472	462
Costo de bombeo de agua de lluvia	3,613	3,610	3,615	3,608	3,614
Costo de tratamiento de agua de lluvia	3,626	3,626	3,626	3,626	3,626
Inversión total	12,725	13,769	15,483	16,477	17,368
Costo total anual	537,190	553,888	584,648	616,730	667,060

Tabla 3.13. Comparación de flujos para diferentes escenarios de la curva Pareto del caso de estudio.

Flujo (m ³ /año)	Min TAC	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Min Fresh
	Escenario A				Escenario E
Agua fresca	338,533	332,000	320,000	310,000	300,838
Agua requerida	538,376	538,376	538,376	538,376	538,376
Agua captada	36,260	36,260	36,260	36,260	36,260
Agua recirculada	163,583	170,116	182,116	192,116	201,278
Agua de salida de los usos	461,149	461,149	461,149	461,149	461,149
Agua después de la mezcla de flujos	461,149	461,149	461,149	461,149	461,149
Agua de entrada a los tratamientos	415,034	415,034	415,034	415,034	415,034
Agua de salida de los tratamientos	415,034	415,034	415,034	415,034	415,034
Agua tratada descargada al ambiente	251,451	244,918	232,918	222,918	213,756

Curva Pareto

Los escenarios A y E son las soluciones óptimas de los extremos para el sistema integrado; utilizando el método de restricción se obtiene la curva Pareto que se muestra en la **Figura 3.2**. Observe en la **Figura 3.2** que varias soluciones (por ejemplo los escenarios B, C y D) compensan estos dos puntos extremos. En este caso, los TAC de los escenarios B, C y D son de US\$553,888/año, US\$584,648/año y US\$616,730/año, respectivamente (véase la **Tabla 3.12**); mientras que los consumos totales de agua fresca son de 332,000 m³/año, 320,000 m³/año y 310,000 m³/año para los escenarios

B, C y D, respectivamente. Comparando el escenario B con respecto a los escenarios A y E, el agua fresca total consumida tiene una reducción de 1.92% y un incremento de 10.35%, respectivamente; por otra parte, el TAC del escenario B aumenta 3.10% con respecto al escenario A y disminuye 16.96% con respecto al escenario E. Comparando el escenario C con respecto a los escenarios A y E, el total de agua dulce consumida tiene una reducción de 5.47% y un aumento del 6.36%, respectivamente; por otra parte, el escenario C tiene un incremento de 8.83% con respecto al escenario A y una reducción del 12.35% con respecto al escenario E para el TAC. Finalmente, comparando el escenario D con respecto a escenarios A y E, esto representa una reducción de 8.42% y un incremento de 3.04% para el agua fresca total consumida, respectivamente; Además, el TAC en el escenario D es 14.80% más alto que el escenario A, pero es inferior en 7.54% que el escenario E.

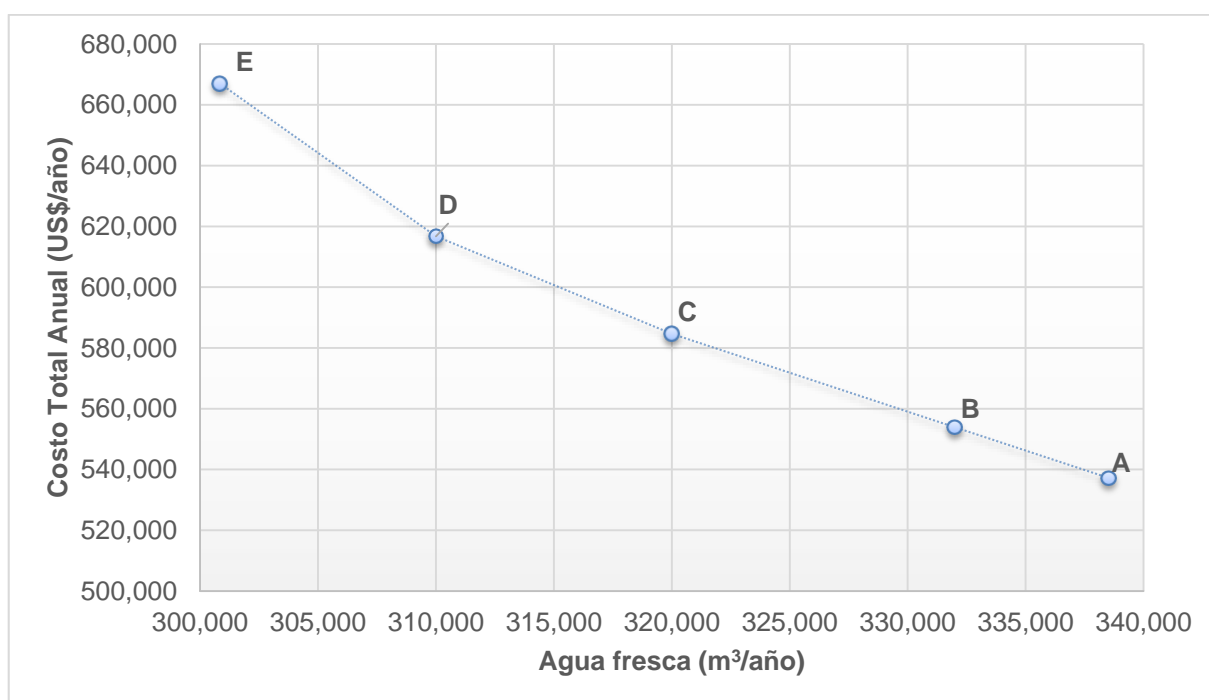


Figura 3.2. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio.

Finalmente, el análisis anterior indica que la solución del escenario D es atractiva; esto es debido a que representa un ahorro significativo en el consumo total de agua fresca con respecto a la solución de Escenario A (costo mínimo) y, al mismo

tiempo, el costo total anual es ligeramente inferior a las soluciones de los escenarios E (mínimo consumo de agua dulce) y X (sin integración). Por lo tanto, la solución asociada al escenario D se presenta en detalle en la siguiente sección.

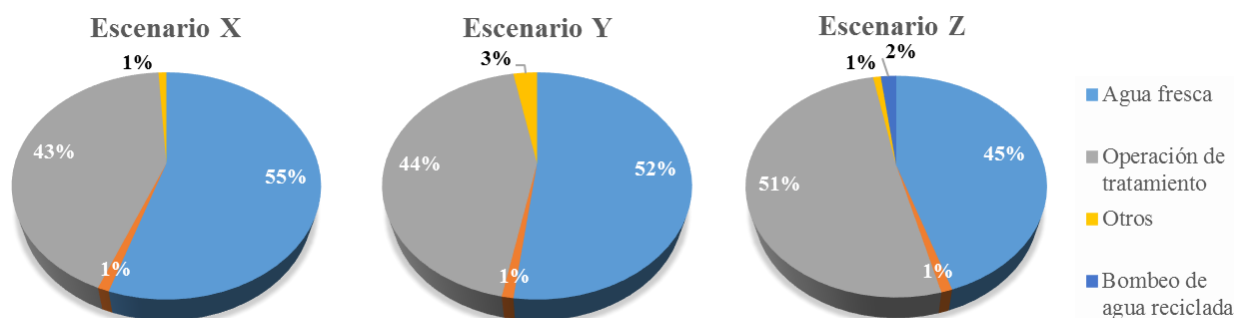


Figura 3.3. Costos incluidos en el costo total anual para los escenarios X, Y, Z.

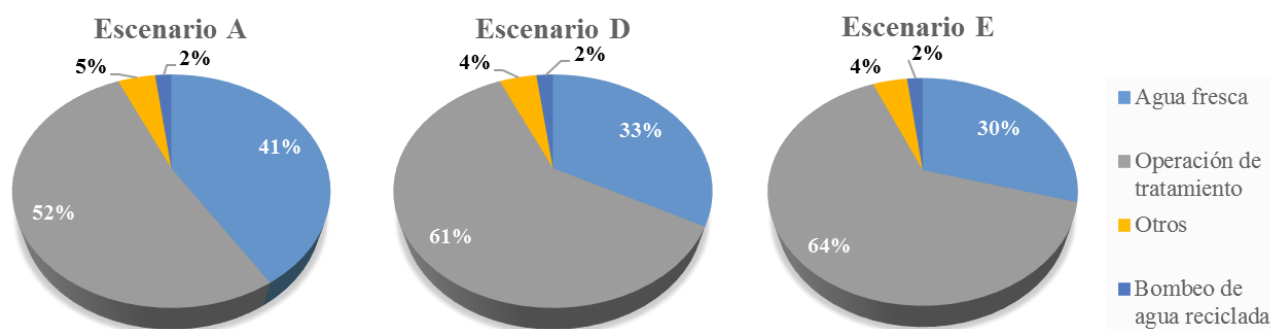


Figura 3.4. Costos incluidos en el costo total anual para los escenarios A, D, E.

Escenario D

El TAC para la solución del escenario D es de US\$616,730/año y está constituido por 32.82% para el agua fresca, el 0.76% para el bombeo de agua fresca, 2.03% para el bombeo de agua regenerada, 0.16% para el costo de capital de las tuberías de recirculación, 0.22 % para el costo de capital para las tuberías de salida de las unidades, 0.44% para el costo de capital para los tanques de agua regenerada, 0.64% para el costo de capital para las bombas de recirculación, 0.38% para el costo de capital para las unidades de tratamiento de aguas residuales, 60.53% para el costo

de operación de las unidades de tratamiento, 0.57% para el costo de capital para la recolección de agua de lluvia, 0.085% para el costo de capital para las tuberías para el agua de lluvia recolectada, 0.059% para el costo de capital para el almacenamiento de agua de lluvia, 0.076% para el costo de capital para el depósito elevado, 0.58% para el costo de bombeo para el agua de lluvia, 0.58 % para el costo de tratamiento de agua de lluvia (ver **Figura 3.4**), y la inversión total representa 2.67% del TAC (ver **Tabla 3.12**). En este caso, el total de agua necesaria se satisface con 57.58% de agua fresca, 35.68% de agua regenerada y 6.73% de agua de lluvia; el agua fresca requerida es 310,000 m³/año, el agua regenerada es 192,116 m³/año, el agua de lluvia recolectada es 36,260 m³/año y las aguas vertidas al ambiente son 222,918 m³/año (ver **Tabla 3.13**).

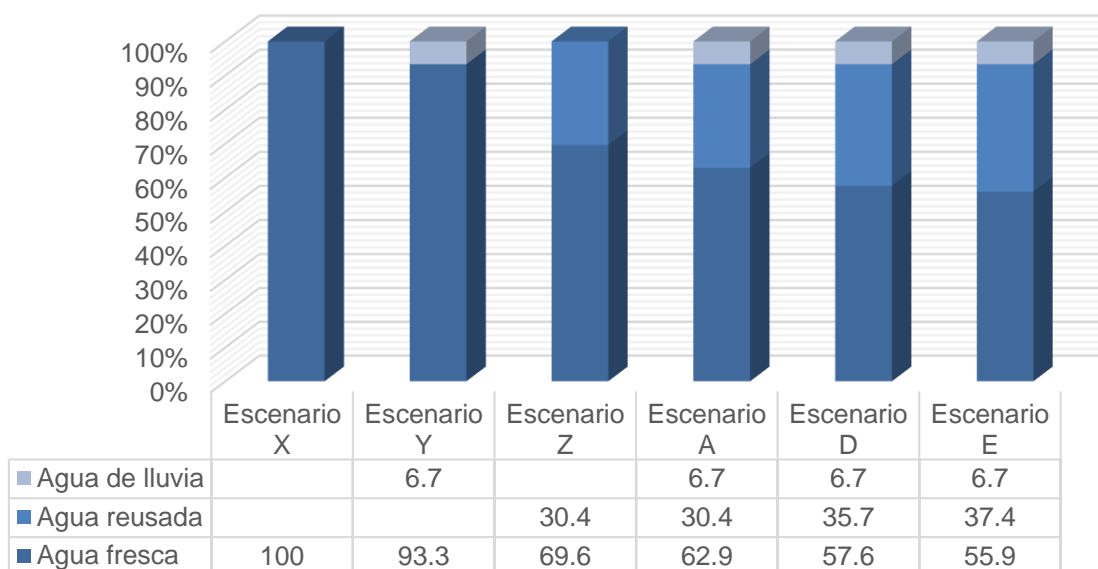


Figura 3.5. Porcentaje de fuentes de agua para los diferentes escenarios.

La solución del escenario D requiere de un sistema aerobio para el tratamiento de las aguas residuales de la ducha, lavavajillas y lavandería de la unidad 1 para ser reutilizadas en el inodoro; requiere del sistema anaerobio para el tratamiento de las aguas residuales del inodoro, lavavajillas y lavandería para reciclarla a la jardinería, ducha e inodoro, y emplea el bioreactor de membrana para el tratamiento de las aguas residuales del lavavajillas para reutilizar al baño (véanse las **Tablas 3.15a y 3.15b**). La capacidad de las unidades de tratamiento y de cada uso se muestra en la **Tabla 7**. Por

otra parte, se requieren siete tanques para almacenar agua regenerada; tres tanques para el agua regenerada del sistema aerobio con una capacidad de 22.046, 25 y 25 m³; tres tanques de 25 m³ cada uno para el agua regenerada que proviene del sistema anaerobio y un tanque de 4,67 m³ después del bioreactor de membranas (ver **Tabla 3.8**).

Tabla 3.14. Agua de lluvia recolectada en cada tanque por mes para el escenario D.

Mes	Tanque de almacenamiento (m ³)						Total de agua de lluvia recolectada (m ³)
	1	2	3	4	5	6	
Enero	846.36	-	-	-	-	-	846.36
Febrero	668.18	-	-	-	-	-	668.18
Marzo	311.82	-	-	-	-	-	311.82
Abril	1000	-	-	24.54	-	-	1024.54
Mayo	1000	-	649.54	1023.18	-	-	2672.72
Junio	1000	1200	1500	1300	445.45	790.91	6236.36
Julio	1000	1200	1500	1300	1250	1100	7350
Agosto	1000	1200	1500	1300	804.54	1100	6904.54
Septiembre	1000	1200	1500	1300	160.61	630.3	5790.91
Octubre	1000	-	1125	1215.91	-	-	3340.91
Noviembre	579.09	-	-	-	-	-	579.09
Diciembre	534.54	-	-	-	-	-	534.54

El área necesaria para la recolección de aguas pluviales es 44,545.455 m² para la unidad 1, lo que representa un 40,99% de la superficie total disponible de las dos unidades del complejo de viviendas (ver **Tabla 3.9**). La **Tabla 3.14** muestra la cantidad de agua de lluvia recolectada en cada mes y cada dispositivo de almacenamiento. La superficie disponible es mayor que la utilizada; sin embargo, la capacidad máxima de

los dispositivos de almacenamiento no permite una mayor captación de aguas pluviales; por esta razón, el agua de lluvia recolectada es igual en todos los escenarios del caso de estudio.

Tabla 3.15a. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario D.

Hora	Sistema aerobio (m ³)			Sistema anaerobio (m ³)							Bioreactor de membrana (m ³)	
	Unidad 1			Unidad 1			Unidad 2				Unidad 2	
	Ducha	Lavavajilla	Lavandería	Inodoro	Ducha	Lavandería	Inodoro	Ducha	Lavavajilla	Lavandería	Lavavajilla	
	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Jardinería	Inodoro	Inodoro	Jardinería	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Inodoro	
6	-	-	-	-	15.24	-	-	143.484	-	-	-	-
7	-	-	-	-	160.92	-	-	156.528	-	-	-	-
8	-	-	-	321.84	160.92	-	300.6	68.136	82.164	-	-	-
9	-	-	-	-	-	321.84	-	-	1.212	299.388	-	-
10	-	-	-	-	-	160.92	-	-	-	150.3	-	-
12	55.354	46.864	59.748	-	-	-	-	0.795	135.912	0.53	11.22	11.22
13	56.4	51.048	59.748	-	50.607	52.489	-	61.132	135.912	24.903	11.22	11.22
14	56.4	51.048	59.748	-	115.285	76.048	-	72.183	135.912	34.621	11.22	11.22
16	56.4	51.048	59.748	-	89.503	-	-	127.903	135.912	12.45	11.22	11.22

Tabla 3.15b. Agua reusada por hora para todos los meses del escenario D (continuación).

Hora	Sistema aerobio (m ³)			Sistema anaerobio (m ³)							Bioreactor de membrana (m ³)
	Unidad 1			Unidad 1			Unidad 2				Unidad 2
	Ducha	Lavavajilla	Lavandería	Inodoro	Ducha	Lavandería	Inodoro	Ducha	Lavavajilla	Lavandería	Lavavajilla
	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Jardinería	Inodoro	Inodoro	Jardinería	Inodoro	Inodoro	Inodoro	Inodoro
19	56.4	51.048	59.748	-	139.874	39.392	-	101.444	135.912	59.57	11.22
20	-	-	-	214.56	-	-	200.4	-	-	-	-
21	-	-	0.626	-	160.294	-	-	27.054	123.246	-	-
22	0.523	40.111	0.927	-	119.358	-	-	113.203	37.097	-	-
23	0.523	8.844	0.729	-	150.824	-	-	64.152	86.148	-	-
TOTAL	282	300.011	301.022	536.4	1162.825	650.689	501	936.014	1009.427	581.762	56.1

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se han presentado dos formulaciones de optimización para la síntesis de redes de agua en complejos residenciales, lo que implica al mismo tiempo recolección de agua de lluvia, reutilización de aguas grises, así como el almacenamiento y distribución de ambas. Esta formulación matemática se representa en dos superestructuras: a) el reúso de agua residual y b) la implementación simultánea del reúso de agua residual y colección de agua de lluvia. Ambas opciones consideran segregación, reciclado, tratamiento, almacenamiento y recirculación de aguas residuales y, para el caso b), además se considera la captura y reutilización de agua de lluvia. Los modelos propuestos son problemas de programación mixta entera no lineal, que fueron formulados para tomar en cuenta dos funciones objetivo; la primera consiste en la minimización del costo total anual para satisfacción de las demandas de agua en el complejo residencial, y la segunda en la reducción al mínimo del consumo de agua fresca.

En el caso de estudio de la ciudad de Morelia, la satisfacción de las demandas de agua para uso doméstico se ha convertido en un serio problema en los últimos años. Los resultados muestran que es posible satisfacer las demandas de agua en el complejo residencial, reduciendo al mínimo el consumo de agua fresca (promoviendo de esta manera la sostenibilidad del sistema) y con un mínimo costo total, donde la inversión inicial se puede recuperar en un período de tiempo corto debido a la reducción en el consumo de agua fresca.

Además, la aplicación de los tratamientos de agua puede proveer subproductos al complejo habitacional que pueden ser aprovechados para la integración del sistema, por ejemplo: los lodos activados y el metano producido en el proceso anaerobio.

Finalmente, el enfoque propuesto es general y se puede aplicar a cualquier otro estudio de caso con diferentes condiciones y en diferentes lugares.

REFERENCIAS

- 1) Ahmad, J., EL-Dessouky, H. (2008). Design of a modified low cost treatment system for the recycling and reuse of laundry waste water. *Resources, Conservation and Recycling*. 52(): 973-978.
- 2) Abdulla, F., Al-Shareef, A. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*. 243: 195-207.
- 3) Appels, L., Lauwers, J., Dregreve, J., Helsen, J., Lievens, B., Willems, K., Van, J., Dewil, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15: 4295-4301.
- 4) Aviso, K., Tan, R., Culaba, A. (2010). Designing eco-industrial water exchange networks using fuzzy mathematical programming. *Clean Technology and Environmental Policy*. 12(4):353-363.
- 5) Baroni, L., Cenci, L., Tettamanti, M., Berati, M. (2007). Evaluating the environmental impact of various dietary patterns combined with different food production systems. *European Journal of Clinical Nutrition*. 61: 279–286.
- 6) Bocanegra-Martínez, A., Ponce-Ortega, J., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., Castro-Montoya, A., El-Halwagi, M. (2014). Optimal design of rainwater collecting systems for domestic use into a residential development. *Resources, Conservation and Recycling*. 84: 44-56.
- 7) Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R. (2014). GAMS User's Guide. Washington, USA, The Scientific Press, Washington, DC.
- 8) Burgara-Montero, O., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M. El-Halwagi, M. (2013). Incorporation of the seasonal variations in the optimal treatment of industrial effluents discharged to watersheds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 52: 5145–5160.

- 9) Bussieck, M., Pruessner, A. (2003). Mixed-Integer Nonlinear Programming. Obtenido de: <http://www.gamsworld.org/minlp/siagopt.pdf>.
- 10) Chaillou, K., Gérente, C., Andrés, Y. (2011). Bathroom greywater characterization and potential treatments for reuse. *Water Air Soil*. 215: 31-42.
- 11) Chen, Y.T., Chen, C.C., (2014). The optimal reuse of reclaimed water: A mathematical model analysis. *Water Resource Manage*. 28: 2035–2048.
- 12) Chernicharo, C. (2006). Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater. *Environmental Science and Biotechnology*. 5: 73-92.
- 13) Chin, W., Roddick, F., Harris, J. (2009). Greywater treatment by UVC/H₂O₂. *Water Research*. 43: 3940-3947.
- 14) CONAGUA. (2012). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
- 15) CONAGUA. (2011). Obtenido de: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=63&n3=63>.
- 16) Davies, E.G.R., Simonvic, S.P. (2011). Global water resources modeling with an integrated model of the social–economic–environmental system. *Advances in Water Resources*. 34(6):684-700.
- 17) Dakwala, M., Mohanty, B., Bhargava, R. (2009). A process integration approach to industrial water conservation: a case study for an Indian starch industry. *Journal of Cleaner Production*. 17(18):1654-1662.
- 18) De la Peña, M., Ducci, J., Zamora, V., (2013). Tratamiento de aguas residuales en México. Obtenido de: http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/tratamiento_de_aguas_residuales_en_mexico.pdf.

- 19) Elmitwalli, T. A., Otterpohl, R. (2007). Anaerobic biodegradability and treatment of greywater in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Water Research*. 41: 1379–1387.
- 20) Environmental Protection Agency, EPA. (2008). Indoor water use in the United States. *Water Sense*. Obtenido de: http://www.epa.gov/WaterSense/docs/ws_indoor508.pdf.
- 21) Environmental Protection Agency, EPA. (2014): <http://www.epa.gov/WaterSense/pubs/indoor.html>. (Acceso en Enero de 2014).
- 22) Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*. 4: 85-104.
- 23) Fan, Y., Li, G., Wu, L., Yang, W., Dong, C., Xu, H., Fan, W. (2006). Treatment and reuse of toilet wastewater by an airlift external circulation membrane bioreactor. *Process Biochemistry*. 41: 1364-1370.
- 24) Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Tayá, C., Rieradevall, J., Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research*. 45: 3245-3254.
- 25) Foo, D. (2009). State-of-the-art review of pinch analysis techniques for water network synthesis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 48(11): 5125–5159.
- 26) Friedler, E., Gilboa, Y. (2010). Performance of UV disinfection and the microbial quality greywater effluent along a reuse system for toilet flushing. *Science of the Total Environment*. 408: 2109-2117.
- 27) Furumai, H. (2008). Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Physics and Chemistry of the Earth*. 33: 340-346.

- 28) Gander, M., Jefferson, B., Judd, S. (2000). Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations. *Separation and Purification Technology*. 18: 119-130.
- 29) García-Montoya, M., Ponce-Ortega, J.M., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M. (2014). Optimal design of reusing water systems in a housing complex. *Clean Technologies and Environmental Policy*. In press. DOI: 10.1007/s10098-014-0784-x.
- 30) Gernaey, K., Loosdrecht, M., Henze, M., Lind, M., Jorgensen, S. (2004). Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: state of the art. *Environmental Modelling and Software*. 19(9): 763-783.
- 31) Gross, A., Kaplan, D., Baker, K. (2007). Removal of chemical and microbiological contaminants from domestic greywater using recycled vertical flow bioreactor (RVFB). *Ecological Engineering*. 31(2): 107–114.
- 32) Hashim, H., Hudzori, A., Yusop, Z., Ho, W. (2013). Simulation based programming for optimization of large-scale rainwater harvesting system: Malaysia case study. *Resources, Conservation and Recycling*. 80: 1-9.
- 33) Helmreich, B., Hom, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*. 248: 118-124.
- 34) Hernández-Sancho, F., Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R. (2011). Cost modelling for wastewater treatment processes. *Desalination*. 268: 1-5.
- 35) Hong, K., Guen, K. (1999). Treatment of domestic wastewater using microfiltration for reuse wastewater. *Desalination*. 126: 7-14.

- 36) Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R., Judd, S. (2004). Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water Science and Technology*. 50:157–64.
- 37) Judd, S. (2006). *The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. Elsevier. Great Britain. 325 p.
- 38) Li, G., Wu, L., Dong, C., Wu, G., Fan, Y. (2007). Inorganic nitrogen removal of toilet wastewater with an airlift external circulation membrane bioreactor. *Journal of Environmental Sciences*. 19: 12-17.
- 39) Li, Z., Boyle, F., Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination*. 260: 1-8.
- 40) Liberti, L., Notarnicola, M. (1999). Advanced treatment and disinfection for municipal wastewater reuse in agriculture. *Water Science and Technology*. 40: 235-245.
- 41) Lira-Barragán, L. F., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., El-Halwagi, M. (2013). Incorporating property-based water networks and surrounding watersheds in site selection of industrial facilities. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 52: 91-107.
- 42) Lorenzo, Y., Obaya, M. C. (2006). La digestión anaerobia y los reactores UASB. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*. 40 (1): 13-21.
- 43) Lovelady, E., El-Halwagi, M. (2009). Design and integration of eco-industrial parks. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 28(2): 265-272.
- 44) Mahmoud, N., Zeeman, G., Gijzen, H., Lettinga, G. (2003). Anaerobic sewage treatment in a one-stage UASB and a combined UASB-digester system. *Seventh International Water Technology Conference Egypt*. 307:322.

- 45) Mandal, D., Labhasetwar, P., Dhone, S., Dubey, A., Shinde, G., Wate, S. (2011). Water conservation due to greywater treatment and reuse in urban setting with specific context to developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*. 55: 356-361.
- 46) Merz, C., Scheumann, R., El Hamouri, B., Kraume, M. (2007). Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club. *Desalination*. 215: 37–43.
- 47) Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and reuse*. 4th ed. USA. McGraw-Hill International. Editions, China.
- 48) Osnaya, M. (2012). Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Oaxaca. Inédito.
- 49) Paulo, P., Azevedo, C., Begosso, L., Galbiati, A., Boncz, M. (2013). Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. *Ecological Engineering*. 50: 95-100.
- 50) Penn, R., Schütze, M., Friedler, E. (2013). Modelling the effects of on-site greywater reuse and low flush toilets on municipal sewer systems. *Journal of Environmental Management*. 114: 72-83.
- 51) Pidou, M., Avery, L., Stephenson, T., Jeffrey, P., Parsons, S. A., Liu, S., Memon, F., Jefferson, B. (2008). Chemical solutions for greywater recycling. *Chemosphere*. 71(1): 147–155.
- 52) Ponce-Ortega, J. M., Hortua A. C., El-Halwagi, M., Jiménez-Gutiérrez, A. (2009). A Property-Based Optimization of Direct Recycle Networks and Wastewater Treatment Processes. *American Institute of Chemical Engineers*. 55 (9): 2329-2344.

- 53) Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M., Jiménez-Gutiérrez, A. (2010). Global optimization for the synthesis of property-based recycle and reuse networks including environmental constraints. *Computers and Chemical Engineering*. 34: 318-330.
- 54) Rashidi, M., Saghafian, B., Haghghi, F. (2013). Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. *Resources, Conservation and Recycling*. 73: 86-93.
- 55) Revitt, D., Eriksson, E., Donner, E. (2011). The implications of household greywater treatment and reuse for municipal wastewater flows and micropollutant loads. *Water Research*. 45: 1549-1560.
- 56) Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., El-Halwagi, M., Serna-González, M., Jiménez-Gutiérrez, A. (2010). Water integration of eco-industrial parks using a global optimization approach. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 49 (20): 9945-9960.
- 57) Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., Jiménez-Gutiérrez, A., El-Halwagi, M. (2011). A global optimal formulation for the water integration in eco-industrial parks considering multiple pollutants. *Computers and Chemical Engineering*. 35: 1558-1574.
- 58) Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., El-Halwagi, M. (2012). Optimal reconfiguration of multi-plant water networks into an eco-industrial park. *Computers and Chemical Engineering*. 44: 58-83.
- 59) Ryan, A., Spash, C., Measham, T. (2009). Socio-economic and psychological predictors of domestic greywater and rainwater collection: Evidence from Australia. *Journal of Hydrology*. 379: 164-171.

-
- 60) Sample, D., Liu, J. (2014). Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture. *Journal of Cleaner Production*. 30: 1-21.
- 61) Santos, C., Taveira-Pinto, F., Cheng, C., Leite, D. (2012). Development of an experimental system for greywater reuse. *Desalination*. 285: 301-305.
- 62) Shimizu, Y., Okuno, Y., Uryu, K., Ohtsubo, S., Watanabe, A. (1996). Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment. *Water Research*. 30 (10): 2385-2392.
- 63) Sostar-Turk, S., Petrinic, I., Simonic, M. (2005). Laundry wastewater treatment using coagulation and membrane filtration. *Resources, Conservation and Recycling*. 44(2): 185–196.
- 64) Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., Hartung, H. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth*. 34: 776-785.
- 65) Vázquez-Castillo, J. A., Ponce-Ortega, J. M., Segovia-Hernández, J. G., El-Halwagi, M. (2013). A multi-objective approach for property-based synthesis of batch water networks. *Chemical Engineering and Processing*. 65: 83-96.
- 66) Wang, Y., Smith, R. (1994). Wastewater minimization. *Chemical Engineering Science*. 49 (7): 981- 1006.
- 67) Zhang, W., Wang, C., Li, Y., Wang, P., Wang, Q., Wang, D. (2014). Seeking sustainability: multiobjective evolutionary optimization for urban wastewater reuse in China. *Environmental Science and Technology*. 48: 1094-1102.