

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

“Optimización de redes de agua macroscópicas considerando el nivel dinámico y demanda insatisfecha”

TESIS

Presentado por:

I.Q. Juan José Olivarez Areyan

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

Dirigido por:

Dr. Fabricio Nápoles Rivera

Morelia Michoacán. Febrero 2019

ABSTRACT

Nowdays, on planet earth there are major problems related to the water resource, currently the abundant water requirements increase exponentially due to different factors. So human beings have developed different techniques for its efficient use, to improve the environmental, social and economic aspect. At the global level, different strategies have been drawn up regarding the use of water, which has been of great importance in the consumption of fresh water demanded and the wastewater discharged. In the present project, water distribution networks are developed, considering segregation, reuse, regeneration and storage techniques to minimize the use of fresh water, considering the unsatisfied demand of users to reduce social conflict and obtain benefits economically and environmentally satisfactory.

RESUMEN

Hoy en día en el planeta tierra existen problemas de gran importancia relacionados con el recurso hídrico, actualmente los abundantes requerimientos de agua aumentan exponencialmente debido a distintos factores. Por lo que los seres humanos han desarrollado distintas técnicas para su uso eficiente, para mejorar el aspecto ambiental, social y económico. A nivel mundial se han elaborado distintas estrategias a cerca del cuidado del agua, lo que ha tenido gran importancia en los consumos de agua fresca demandada y el agua residual descargada. En el presente proyecto se desarrollan redes de distribución de agua, considerando técnicas de segregación, reúso, regeneración y almacenamiento para minimizar el uso de agua fresca, tomando en cuenta la demanda insatisfecha de los usuarios para disminuir el conflicto en el aspecto social y obtener beneficios económicos y ambientales satisfactorios.

Palabras clave: Nivel, dinámico, insatisfecha, optimización y agua.

Contenido

ABSTRACT	2
RESUMEN	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.	9
1.1 INTRODUCCIÓN	10
1.2 ANTECEDENTES	12
1.3 MARCO TEÓRICO	16
1.3.1 Aguas residuales domésticas	16
1.3.2 Aguas residuales industriales	17
1.3.3 Tratamientos de aguas residuales	20
1.4 JUSTIFICACIÓN	30
1.5 HIPÓTESIS	31
1.6 OBJETIVOS	31
1.6.1 Objetivo general	31
1.6.2 Objetivos particulares	31
1.7 METODOLOGÍA	32
1.7.1 Etapa 1	32
1.7.2 Etapa 2	32
1.7.3 Etapa 3	32
1.7.4 Etapa 4	33
CAPÍTULO 2. REÚSO DE AGUA.	34
2.1 REÚSO DE AGUA	35
2.2 MODELO MATEMÁTICO. Reúso de agua	36
2.3 CASO DE ESTUDIO. Reúso de agua	45
CAPÍTULO 3. ACOPLAMIENTO SIMULTÁNEO DEL REÚSO DE AGUA Y CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL.	49
3.1 ACOPLAMIENTO SIMULTÁNEO DEL REÚSO DE AGUA Y CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL	50
3.2 MODELACIÓN MATEMÁTICA. Acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial	51
3.3 CASO DE ESTUDIO. Acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial	61

CAPÍTULO 4. RESULTADOS.	63
4.1 Escenario D. Reúso de agua.	64
4.2 Escenario K. Reúso de agua.	66
4.3 CURVA PARETO. Reúso de agua.	68
4.4 Escenario D. Acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial.	71
4.5 Escenario K. Acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial.	73
4.6 CURVA PARETO. Implementación simultánea del reúso de agua y captación de agua pluvial.	75
4.7 Comparación de escenarios.	77
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.	78
5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	79
5.2 BIBLIOGRAFIA	80
5.3 APÉNDICE A.	85
5.4 APÉNDICE B	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Uso del agua para diferentes actividades domésticas (ver EPA, 2008 ³¹).....	16
Figura 2. Proceso de sedimentación.	21
Figura 3. Proceso coagulación-floculación.	22
Figura 4. Proceso de aireación superficial.....	24
Figura 5. Proceso de lodos activados.	25
Figura 6. Proceso de filtros percoladores.....	26
Figura 7. Proceso de digestión anaeróbica.	27
Figura 8. Superestructura reúso de agua.	36
Figura 9. Ubicación geográfica del manto acuífero en el estado de Michoacán.	45
Figura 10. Representación del "Sector 8 Republica Norte" y división de los sinks domésticos e industriales.	47
Figura 11. Superestructura reúso de agua y captación de agua pluvial.	51
Figura 12. Ejemplo de distribución para el mes de Agosto del escenario D. Reúso de agua.....	65
Figura 13. Ejemplo de distribución para el mes de agosto del escenario K.....	67
Figura 14. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio del capítulo 2 reúso de agua. $H \leq 1$	70
Figura 15. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio del capítulo 2 reúso de agua. $H \leq 2$	70
Figura 16. Ejemplo de distribución para el mes de agosto del escenario D captación de agua.	72
Figura 17. Ejemplo de distribución para el mes de agosto del escenario K captación de agua.	74
Figura 18. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio. $H \leq 2$	76
Figura 19. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio. $H \leq 1$	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Precipitación disponible para la ciudad de Morelia (2015) (SMN, 2015).....	47
Tabla 2. Características de los pozos de extracción.	48
Tabla 3. Demanda insatisfecha para el mes de agosto para el sink 1. Escenario D.	65
Tabla 4. Demanda insatisfecha para el mes de agosto para el sink 3. Escenario K.	67
Tabla 5. Comparación de flujos para diferentes escenarios de la curva Pareto del caso de estudio.	69
Tabla 6. Demanda insatisfecha para el mes de agosto para el sink 3. Escenario D.	72
Tabla 7. Demanda insatisfecha para el mes de agosto para el sink 3. Escenario K.	74
Tabla 8. Comparación de flujos para diferentes escenarios de la curva Pareto del caso de estudio.	76
Tabla 9. Demanda anual en m3 de usuarios domésticos.....	85
Tabla 10. Demanda anual en m3 de usuarios industriales.	85
Tabla 11. Costo de tubería y bombeo de las fuentes naturales a los usuarios domésticos en US\$.	86
Tabla 12. Costo de tubería y bombeo de las fuentes naturales a los usuarios industriales en US\$.	86
Tabla 13. Distribución de los pozos de extracción a los usuarios domésticos en m3 escenario D.	87
Tabla 14. Distribución de los pozos de extracción para los usuarios industriales en m3 escenario D.	88
Tabla 15. Distribución de los pozos de extracción para los usuarios industriales en m3 escenario K.	88
Tabla 16. Distribución de los pozos de extracción a los usuarios domésticos en m3 escenario k. ...	89
Tabla 17. Costo de tubería y bombeo de tanque de almacenamiento a sink doméstico en US\$. ...	90
Tabla 18. Costo de tubería y bombeo del estanque artificial a los usuarios domésticos en US\$.	90
Tabla 19. Costo de tubería y bombeo del tanque de almacenamiento al sink industrial en US\$. ...	91
Tabla 20. Costo de tubería y bombeo del estanque artificial a los usuarios industriales en US\$. ...	91
Tabla 21. Capacidad máxima de tanques de almacenamiento en m3.....	92
Tabla 22. Capacidad máxima de los estanques artificiales en m3	92
Tabla 23. Distribución de los estanques artificiales a los usuarios industriales en m3.	92
Tabla 24. Distribución de tanques de almacenamiento a los usuarios industriales en m3. Escenario D en m3.	93
Tabla 25. Costo de almacenamiento de estanques artificiales en US\$.	93
Tabla 26. Costo de almacenamiento para tanques en US\$.	93
Tabla 27. Distribución de los pozos de extracción para los usuarios industriales escenario D en m3. Reúso y captación de agua.....	94
Tabla 28. Distribución de los pozos de extracción a los usuarios domésticos escenario D en m3. Reúso y captación de agua pluvial.	95
Tabla 29. Capacidad máxima de los tanques de almacenamiento en m3.	96
Tabla 30. Capacidad máxima de los estanques artificiales en m3.	96
Tabla 31. Distribución de los estanques artificiales a los usuarios industriales en m3. Escenario K.	96
Tabla 32. Distribución de los tanques de almacenamiento a los usuarios industriales en m3. Escenario K.	97
Tabla 33. Costo de almacenamiento de tanques en US\$.	97
Tabla 34. Costo de almacenamiento de estanques artificiales en US\$.	97

Tabla 35. Distribución de los pozos de extracción para los usuarios industriales escenario K en m3. Reúso y captación de agua.....	98
Tabla 36. Distribución de los pozos de extracción a los usuarios domésticos escenario K en m3. Reúso y captación de agua pluvial.	99

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.

1.1 INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es esencial para mantener en ritmo todas las necesidades de los seres vivos sobre la tierra. El agua tiene un peso muy importante para la salud humana. El cuerpo humano puede durar semanas sin ingerir cualquier tipo de alimento, pero solo unos días sin ingerir agua.

Los humanos en promedio, estamos compuestos de un 50-65% de agua. Por lo que cada día, cada persona requiere acceso al agua para beber, cocinar, así como para higiene personal. En México, el consumo promedio de agua por persona es de 360 litros de agua al día (CONAGUA, 2017)¹, lo cual dista mucho del consumo mínimo recomendado por la Organización Mundial de Salud (OMS) recomienda una cantidad de 20 litros al día por habitante para cubrir las necesidades básicas de higiene y alimentos. Es muy evidente que hoy en día consumimos más agua de la que deberíamos, por lo que es un problema de gran preocupación, ya que el cambio climático y el crecimiento de la población disminuyen la disponibilidad de agua cada año. Hoy en día una de cada dos personas en el planeta, viven en zonas urbanas. Ciudades del mundo están creciendo de forma excepcional. De la misma forma, 93% de la urbanización se produce en los países pobres o en vías de desarrollo, y casi el 40% de la expansión urbana del mundo está creciendo en suburbios.

El informe alusivo a 2014 de las “Perspectivas de la urbanización mundial” por parte de la División de Población de la ONU (DAES), señala que el mayor crecimiento urbano se llevará a cabo en la India, China y Nigeria. Por lo que la demanda de agua incrementará exponencialmente año con año en estos países. Asimismo, para el agua que regularmente tenemos acceso, habitualmente contiene contaminantes de origen antropogénico, por lo que es necesario implementar tecnologías de tratamiento de agua para el uso en el consumo humano. No obstante, incluyendo las tecnologías de tratamientos apropiados, tanto superficiales como subterráneas son insuficientes para satisfacer las demandas en algunas regiones del mundo.

Recientemente en México se ha perdido el cuidado con las aguas residuales, tanto municipales como industriales, ya que cerca del 80% de ellas se vierten a drenajes sin recibir tratamiento previo. Existen graves problemas con la distribución del agua y su mal aprovechamiento en ciudades de la mayor parte del país. El mayor problema de ello es la baja eficiencia en el uso del agua. Todo lo mencionado anteriormente, hace que el trabajo de conservar el agua no sea fácil y aumenta la necesidad de un cambio rotundo en la forma en la que nos encaramos a este recurso natural.

Hoy en día debemos luchar para sacar el mayor provecho posible al agua, y más ahora, con los grandes periodos de sequía que vivimos año tras año. Debido a este problema, los organismos más importantes del país se empiezan a movilizar para tratar el agua como un bien cada vez máspreciado. Con ello día a día se obliga a implementar medidas de control sobre el consumo y contaminación cuidando el recurso vital y todo esto tiene mucho peso en el coste del agua, que irremediablemente se incrementara.

Dicho lo anterior, el problema repercute principalmente a la naturaleza ya que al hacer uso desmedido del recurso afecta principalmente a los mantos acuíferos o también llamada agua subterránea que tienen una función muy importante en nuestro planeta.

Un manto acuífero es aquella área que se encuentra bajo la superficie de la tierra donde el agua del exterior percola y se almacena. Una formación acuífera viene definida por una base estanca y por un techo, que puede ser libre, semipermeable o impermeable. Al realizarse un trabajo de excavación o perforación de la tierra se puede conectar con un acuífero, a través de pozos se puede explotar esta masa de agua para consumo humano, agrícola o industrial. Se le llama capa freática al acuífero subterráneo que se encuentra a poca profundidad relativa y que tradicionalmente abastece los pozos de agua potable.

1.2 ANTECEDENTES

El agua es un bien necesario para todos los seres vivos sobre la tierra y es un grave problema por el crecimiento de la población, su alto consumo y a esto se le adhiere el cambio climático.

Las reservas de agua en el mundo contienen la siguiente distribución; 97,2% del total de agua pertenece a los océanos, seguido por los glaciares 2,14%. El agua que se encuentra debajo del suelo corresponde a 0,6% de ese total, las aguas superficiales 0,009%, la humedad del suelo 0,005% y el agua de la atmósfera 0,001%, esto a través de una averiguación realizada por Fetter en 1994².

La sobre explotación del agua se debe principalmente a factores humanos. El más importante es el crecimiento de la población, actualmente existen en el planeta tierra 7550 millones de habitantes, según (ONU 2017³), de los cuales 121 millones de personas habitan en México y de esos 121 millones y 784,776 viven en Morelia, Michoacán.

El alto consumo de agua también se le debe al sector industrial pues cada producto fabricado requiere agua. Algunas industrias utilizan más aguas que otras, por ejemplo, 10 litros de agua se utilizan para hacer una hoja de papel y 91 litros de agua se usan para hacer 500 gramos de plástico (CONAGUA, 2015)⁴. Se espera que la demanda de global de agua para la fabricación de artículos se incremente en un 400% entre 2000 y 2050. Los principales aumentos se reflejarán en los países cuyas economías son emergentes o en vías de desarrollo. Muchas grandes empresas han hecho considerables progresos en la evaluación, en la reducción del consumo de agua así como en sus cadenas de suministro (CONAGUA, 2015)⁴.

La tecnología y la planificación inteligentes reducen el uso de agua y pueden mejorar la calidad de las aguas residuales. Algunos fabricantes textiles progresistas han introducido tecnología que garantiza que el agua que sale de la fábrica es tan limpia o más limpia que el agua potable de la ciudad. En el mismo sentido, las grandes empresas de bebidas también están mejorando su eficiencia en el uso del

agua y tienen más de 10 años reduciendo sustancialmente el agua utilizada en sus plantas de fabricación (CONAGUA 2015) ⁴.

En base a lo mencionado anteriormente todo el problema recae sobre la explotación de los mantos acuíferos que es de donde se obtiene el agua regularmente por lo que este problema es muy grave, ya que México cuenta con 653 acuíferos clasificados y 115 de ellos se encuentran en estado de sobreexplotación, lo que significa que se extrae un volumen de agua mayor a 10% de su capacidad de recarga. La gravedad del problema es alto: en 1975 había 32 acuíferos en esa condición, 80 en 1985 y 105 en 2010 (CONAGUA, 2015) ⁴.

En el país los mantos acuíferos subterráneos aportan casi el 40% del agua total utilizada, del que 72% se destina a riego agrícola, proporción superior promedio de los países de la OCDE (56%) y la más alta después de Portugal.

En este trabajo se discutirán temas relacionados con el mejor aprovechamiento del recurso hídrico en el cual se tomaran en cuenta varias estrategias como lo son la captación de agua de lluvia, el tratamiento de aguas residuales y la reutilización de las mismas, contribuyendo con la naturaleza de tal forma que logremos aumentar el nivel de los pozos que nos proporcionan el agua, ayudando a que no sean sobreexplotados los mantos acuíferos y remediando el aspecto ambiental, en este sentido Zhiping Sheng 2004⁵ utilizó una herramienta de gestión de agua llamada ASR, que ayuda a mantener el abastecimiento de agua económicamente recuperable y redistribuir el agua disponible durante un periodo de tiempo y a través de un espacio hidrológicamente adecuado. Esta herramienta consta de cuatro subsistemas: fuente de agua para ser almacenada, espacio en el acuífero de almacenamiento, instalaciones de recarga acompañadas de tuberías y las instalaciones de recuperación, sin embargo, al aplicar esta herramienta se tiene un tiempo de residencia de 5 años aproximadamente para aumentar el nivel 5 metros.

En el contexto de la recolección de agua de lluvia, que es un punto importante a trabajar en esta investigación, Appan 2000⁶ propuso la recolección de agua pluvial en la universidad tecnológica de Nanyang en Singapur, reportando un ahorro posible del 12,4% del gasto de agua. Farreny et al. 2011⁷ utilizó funciones lineales

para valorar la recolección de agua pero lo hizo dependiendo de varios factores, como lo son el tipo de material en el cual están contruidos los techos utilizados como colectores y el área del coeficiente de escurrimiento. Li y col 2010⁸ encontraron que las fuentes alternativas de agua (como lo es el agua regenerada y el agua de lluvia) tienen la capacidad de satisfacer hasta el 94% de las demandas de agua en los hogares irlandeses. Nápoles-Rivera y col 2013⁹ introdujeron un modelo matemático en el que se realizó programación de almacenamiento y distribución de agua durante un lapso de un año en un sistema macroscópico. En este trabajo se consideraron fuentes alternativas de agua de lluvia recolectada y agua recuperada. Asimismo, García-Montoya y col, 2015¹⁰ implementaron un modelo de programación mixta entera no lineal en el cual considera la minimización del costo anual total y el consumo de agua fresca como problema multi-objetivo aplicado a un complejo residencial, considerando la recirculación de aguas residuales y la captación de agua pluvial. Los resultados muestran que es posible satisfacer las demandas de agua y a la vez que se minimiza el consumo de agua dulce a costo total mínimo. Por otra parte, Nápoles-Rivera y col, 2015¹¹ presentaron un modelo matemático para el diseño óptimo de la red en un esquema multianual como el crecimiento de la población (demandas crecientes), las demandas estacionales, la disponibilidad estacional de fuentes naturales, el valor del dinero en el tiempo y la incertidumbre en los patrones de precipitación. Los resultados muestran que las redes diseñadas brindan soluciones atractivas desde el punto de vista económico y de sostenibilidad. De la misma manera se ha demostrado que se reduce el consumo de agua dulce y la descarga de aguas residuales al medio ambiente con el uso de programación matemática aplicado a procesos de redes en las ciudades (ver Bocanegra-Martínez y col, 2014¹²; Rojas-Torres y col, 2014¹³; Perez-Uresti y col, 2019¹⁴).

De esta manera, en el sector industrial se tienen diferentes metodologías implementadas a redes de agua, en los cuales se toman diferentes características en cada uno de los problemas, pero la mayoría tiene como objetivo la minimización de agua fresca y la generación de desechos, de tal forma Huang y col, 1999¹⁵ propone un modelo de programación matemática para determinar el uso óptimo de

agua y la red de tratamiento (WUTN) en cualquier planta química, con este modelo se puede encontrar flujo mínimo de agua dulce y la capacidad de tratamiento de las aguas residuales. Este método se ha aplicado con éxito en dos plantas petroquímicas en Taiwán. Ahora bien, Dvarioniene y col, 2006¹⁶ realizaron un modelo de “gestión integrada de los recursos hídricos” (GIRH), el cual es útil para evaluar sistemáticamente las formas de reducir el uso de agua dulce y las oportunidades para la reutilización de las aguas residuales. El análisis de la efectividad de la GIRH fue eficaz para obtener ahorros de agua del 52% por tonelada de producto en una empresa grande de la industria textil, y en una empresa de textil pequeña se observan ahorros de agua del 62%. Por otra parte, Xu y col, 2017¹⁷ crearon un modelo de optimización basado en los resultados contables de la huella hídrica en la ciudad de Dalian, China, se estableció para proporcionar una planificación científica y sostenible de la asignación del agua. Los resultados óptimos de la asignación indicaron que para el año 2020, se podrán cumplir tanto las metas de producción económica como las limitaciones de suministro de recursos hídricos. En el mismo contexto, Hul y col, (2007)¹⁸ utilizaron una técnica de optimización estocástica (PSO) para obtener soluciones globales. La principal modificación utilizada en el algoritmo es la inclusión de un operador de mutación probabilística para las variables binarias. Este cambio de como resultado mejoras computacionales al permitir que el algoritmo escape de las topologías de la red bajas a mejores soluciones. Luo y Uan (2008)¹⁹ implementaron una estrategia de optimización estocástica para obtener óptimos globales; dicha estrategia requería fijar el número de unidades de tratamiento previo a la optimización. Consecuentemente, existen varios autores que han puesto su interés al problema de redes de agua, solucionando problemas en la industria (ver Takama y col, 1980²⁰; Quesada y Grossmann, 1995²¹; Lee y Grossmann, 2003²²; Karuppiah y Grossmann, 2006²³; Alva-Argaez y col, 1992²⁴; Gabriel y El-Halwagi, 2005²⁵, Nápoles-Rivera y col, 2010²⁶; Dakwala y col, 2009²⁷; Ponce-Ortega y col, 2010²⁸; Hansen y col, 2018²⁹; Deng y Jiang 2018³⁰).

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 Aguas residuales 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 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 residuales domésticas son generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.

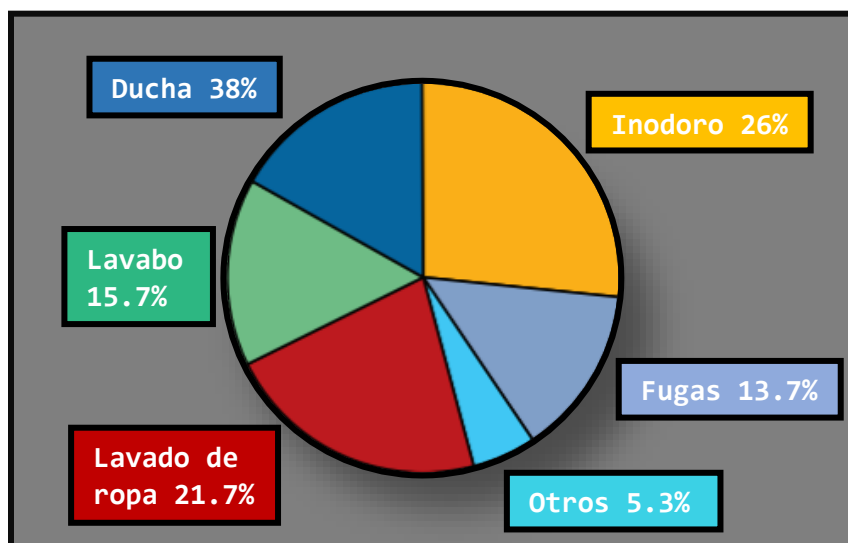


Figura 1 Uso del agua para diferentes actividades domésticas (ver EPA, 2008³¹)

Las aguas grises representan cerca del 70% de las aguas residuales domésticas, por lo que tienen un gran potencial para su reutilización (Paulo y col., 2013³²). Como podemos apreciar en la Figura 1 muestra los diferentes porcentajes de agua que utilizamos los seres humanos y claramente se observa que el mayor porcentaje se utiliza en el inodoro y el lavado de ropa.

Existen diferentes tipos de tratamiento que se les puede dar a las aguas grises para convertirlas en agua limpia pero no potable. Se puede lograr con un

tratamiento específico tratar el agua gris para reutilizarla como agua potable pero su costo de tratamiento para poder obtener una calidad específica como la requiere el agua potable sería muy elevado.

Abundan demasiados sistemas de tratamiento 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, 2010³³).
- Sistemas biológicos: incluyen tratamientos en estanques, humedales artificiales (Osnaya, 2012³⁴) 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, 1999³⁵), las cuales son capaces de tratar grandes volúmenes de aguas grises para obtener agua potable o muy cerca de la potabilidad.

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. La mayoría de las aguas grises son más fáciles de tratar y reciclar que las aguas negras debido a los bajos niveles de contaminantes. 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.

1.3.2 Aguas residuales industriales.

Las aguas residuales industriales son de gran impacto, debido a que la mayoría de estas tienen una alta carga contaminante, por los agentes tóxicos derivados de la fabricación de los productos, en la parte de la disolución de

productos químicos en procesos tales como la limpieza y recubrimiento de metales, explotación minera, la melaza en la producción de azúcar entre otros.

Es así también el grado de la carga contaminante, por ende, hay vertimientos los cuales son potencialmente contaminantes a nivel de metales pesados o cargas químicas, como otras en donde estas aguas presentan alta carga orgánica y otros la presencia de sólidos suspendidos, esta carga contaminante afecta el lugar donde son vertidos ya sea en alcantarillados o cuerpos de agua.

Cuando estas aguas no son tratadas se presentan vertimientos con gran carga toxica, permitiendo establecer el impacto que estas causan sobre el cuerpo receptor, de acuerdo a lo dicho anteriormente, observando las aguas residuales generadas en cierto tipo de industria se establece que la que generan mayor tasa de toxicidad se ve en la industria de curtiembre, el sector metalmecánico y la elaboración de productos químicos, en el caso cuando estas aguas no son tratadas superan los valores de las normas a nivel ambiental establecidas.

Otras aguas residuales que también son de gran impacto son las aguas con efluentes corrosivos por tener un pH muy ácido o muy básico, generado en la industria de recubrimiento metálico, los textiles, en especial cuando se emplea soda en el proceso de lavado de los equipos, el cual genera impacto y sobrepasa los rangos de pH, dependiendo del lugar donde sean vertidos.

La alta carga orgánica, es también generada por la industria de bebidas, alimentos y a fabricantes de productos de aseo, esta carga contaminante se mide por medio de DBO o DQO, como también a las aguas residuales que presentan altas temperaturas ocasionando desequilibrios eco sistémicos, siendo factores importantes del impacto ambiental.

El plomo, metal pesado generado de baterías dejadas en cuerpos hídricos, afectando al ecosistema ya que este no es biodegradable, difícil manejo en el momento que este llega a contaminar afectando ecosistemas marinos, otro

contaminante es el Mercurio, un metal que puede causar daños a la población humana a través de envenenamiento por este.

En términos generales las aguas residuales generadas por el sector industrial son las de mayor impacto ambiental, ya que son generadoras de una carga contaminante tóxica establecida anteriormente, ya que hay concentración de sólidos, generación de metales pesados, sulfuros, que afectan considerablemente los cuerpos de agua donde son arrojados, afectando grandemente a la población ocasionando problemas de salud, pero también afectan la fauna y flora acuática por la acumulación de metales pesados afectándolos biológicamente.

Actualmente para estos procesos industriales se emplean tecnología o procesos eficientes que ayuden a dar un buen manejo a estas aguas residuales del sector industrial, este manejo adecuado de las aguas residuales del sector industrial, está determinada por la normatividad ambiental como la tecnología a emplear en el tratamiento de estas aguas como el costo para emplearlas, pero también en el interés que este sector quiera establecer para mitigar o reducir los impactos ambientales por sus vertimientos.

La porción orgánica corresponde al 70 % de la cantidad de materia sólida existente (Tebutt, 1977³⁶; Jordáo y Pessoa, 1975³⁷); el 30% es inorgánico.

Las aguas residuales tratadas pueden filtrarse para transformarlas en agua limpia.

Por otra parte, existen procesos duros, así como destilación (evaporación) o procesos mecánicos tales como filtración de membrana, típicamente ultrafiltración y osmosis inversa, las cuales soportan a tratar grandes volúmenes de aguas grises para crear agua potable, o ya sea muy cerca de la potabilidad. Sin embargo, hasta el día de hoy aunque existe la tecnología, no hay dispositivos “duros” para tratar aguas grises para la utilización familiar.

1.3.3 Tratamientos de aguas residuales.

El fin de los tratamientos de aguas residuales es eliminar los contaminantes del agua primeramente utilizada, con una serie de procesos físicos, químicos y biológicos.

1.3.3.1 Tratamientos fisicoquímicos.

Los tratamientos físico-químicos regularmente son utilizados para preparar el agua residual para la siguiente técnica de tratamiento.

Este tratamiento consta, fundamentalmente, de dos etapas: coagulación y floculación. La primera consiste en obtener que las materias coloidales y en suspensión existentes en el agua formen coágulos, mediante operaciones mecánicas. En este caso y para favorecer esa separación, se utilizan compuestos químicos, y es por ello que se denominan tratamientos fisicoquímicos (Metcalf y Eddy, 2003³⁸).

1.3.3.2 Sedimentación.

Consiste en una operación de separación sólido-fluido en las que las partículas sólidas de una suspensión, más densas que el fluido, se separan de éste por la acción de la gravedad. Es una operación controlada por la transferencia de cantidad de movimiento.

En varios casos, como cuando existen fuerzas de interacción entre las partículas y éstas son suficientemente pequeñas (suspensiones de tipo coloidal), la sedimentación natural no es posible, pues anteriormente se tiene que proceder a la floculación o coagulación de partículas.

Para que se lleve a cabo la sedimentación en la práctica, el tamaño de las partículas y su concentración en la suspensión deben tener unos valores mínimos, del orden de 1-10 micras y 0.2% de sólido en suspensión.

La sedimentación en general se utiliza para separar partículas sólidas dispersas en un líquido. La diferencia de densidades entre las partículas sólidas y el líquido hace que, aunque éste último tenga un movimiento ascendente y las partículas sólidas sedimenten, depositándose en el fondo de donde son eliminadas en forma

de lodos. La viscosidad del líquido frena las partículas sólidas, que deben vencer el rozamiento con el líquido en el movimiento de caída (ver Figura 2).

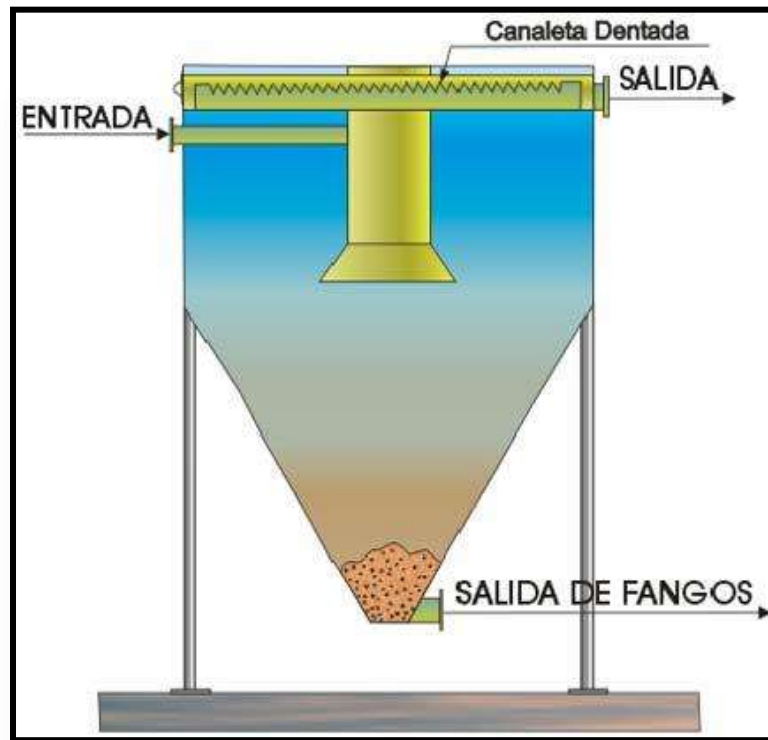


Figura 2. Proceso de sedimentación.

1.3.3.3 Filtración.

La filtración es la separación de partículas sólidas contenidas en un fluido, pasándolo a través de un medio filtrante, sobre el que se depositan los sólidos, regularmente el medio filtrante 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. El fluido puede ser un líquido o un gas; las partículas sólidas pueden ser gruesas o finas, rígidas o flexibles, redondas o alargadas, separadas o agregados. La suspensión de alimentación puede llevar una fracción elevada o muy baja 40-5% en volumen de sólidos. Hay muchas maneras de clasificar los sistemas de filtración: Por gravedad o a presión, lenta o rápida, de torta o en profundidad (Shimizu y col., 1996³⁹).

1.3.3.4 Coagulación-Floculación

Operación físico-química que admite la purificación de agua no apta para el consumo humano.

Se fundamenta en la dificultad de que algunas partículas se sedimenten naturalmente llamadas coloides. Las partículas coloidales se hacen presente de forma natural en el agua. Son de diámetro muy pequeño (1 nm a 1 micra) y tienen carga electronegativamente, lo que conlleva a que tienen fuerzas de repulsión entre las partículas vecinas.

Primeramente, la coagulación ayuda a eliminar las fuerzas de repulsión, agregando sales de metales electropositivos para neutralizarlos.

Enseguida, la floculación permitirá la agregación de partículas coloidales. Debido a su bajo peso, sólo las partículas no pueden instalarse. Los aglomerados empiezan a formarse, aumentando significativamente su peso. Esto se hace gracias a la adición de polímero que actúa como pegamento entre los coloides. Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide (ver Figura 3). 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 y col., 2005⁴⁰).

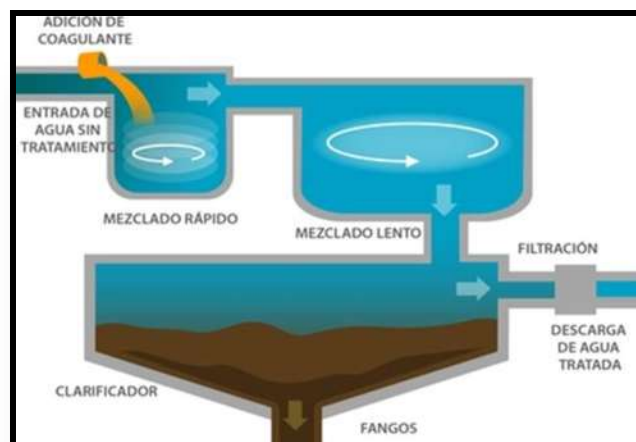


Figura 3. Proceso coagulación-floculación.

1.3.3.5 Desinfección.

El objetivo principal de la desinfección es la destrucción o desactivación de los microorganismos patógenos que puedan encontrarse en el agua residual. Los microorganismos patógenos pueden ser bacterias, virus, protozoos entre algunos otros. Si lo que se pretende es reutilizar el agua, no basta con solo desactivar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo.

Existen diferentes tratamientos para efectuar la desinfección, siendo las más utilizadas la desinfección con cloro en forma de gas comprimido bajo presión, soluciones de hipoclorito de sodio, o de hipoclorito de calcio. También existe la desinfección con UV, notándose un creciente interés en la aplicación para desinfectar el agua residual. 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, 1999⁴¹).

1.3.4 Tratamientos biológicos.

Los tratamientos biológicos en las aguas residuales dependen de las bacterias, nematodos y otros pequeños organismos que descomponen los residuos orgánicos, mediante procesos celulares normales.

El objetivo principal del tratamiento biológico es la creación de un sistema en el que los productos de la descomposición se facilite recogerlos para su adecuada eliminación.

El tratamiento biológico es a menudo un proceso de tratamiento secundario, utilizado para remover los materiales remanentes antes de ser efectuado un sistema primario.

Existe un amplio rango de procesos biológicos utilizados para el tratamiento de aguas residuales, como lo son los sistemas de disposición en tanques sépticos o aeróbicos; una amplia variedad de tipos de aireación, como la aireación superficial

y por rociado; procesos de lodos activados; estanques y lagunas; filtros percoladores; y digestión anaeróbica.

1.3.4.1 Aireación superficial.

La función de la aireación superficial es empujar el agua desde debajo de la superficie del agua hacia la parte superior, lo que crea su contacto con el aire, y luego las gotas caen por gravedad y regresan al agua, mezclándose con oxígeno (ver Figura 4). Los chorros de agua rompen la superficie con diversos grados de fuerza. Existen varios tipos de aireación superficial, entre los que se mencionan los aireadores flotantes. Cuando tienen una alta tasa de bombeo, pueden mezclar en forma efectiva líquidos en las lagunas y en los tanques que se utilizan en el tratamiento de agua.

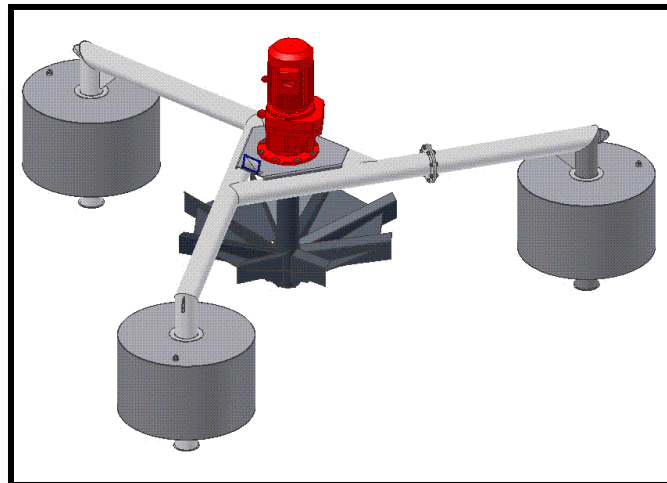


Figura 4. Proceso de aireación superficial.

1.3.4.2 Procesos de lodos activados.

Este proceso es ampliamente utilizado para el tratamiento secundario de aguas residuales domésticas e industriales, regularmente en corrientes de desechos con alto contenido de materia orgánica o biodegradable. Lodo activado es un término usado para señalar los depósitos ricos en microbios que se establecen en tanques. Uno de los aspectos de diseño más importantes de este método es la aireación (Gernaey y col, 2004⁴²).

El proceso de lodos activados consta de tres etapas básicas:

1. Se debe contar con un reactor en el que los microorganismos se mantengan en suspensión, aireados y en contacto con todos los residuos que se estén tratando.
2. Una fase de separación líquido-sólido.
3. Tener un sistema de reciclaje de lodos recircular los lodos activados al comienzo del proceso. Existen diversas variantes de procesos de lodos activados, que incluyen variaciones en el método de aireación y en la forma en el que el lodo es devuelto al proceso.

La cantidad de aire y lodo puede variarse en función del tratamiento deseado. Los lodos remanentes son separados utilizando tanques de sedimentación. Una porción de los lodos se reutiliza y los excesos son desechados (ver Figura 5).

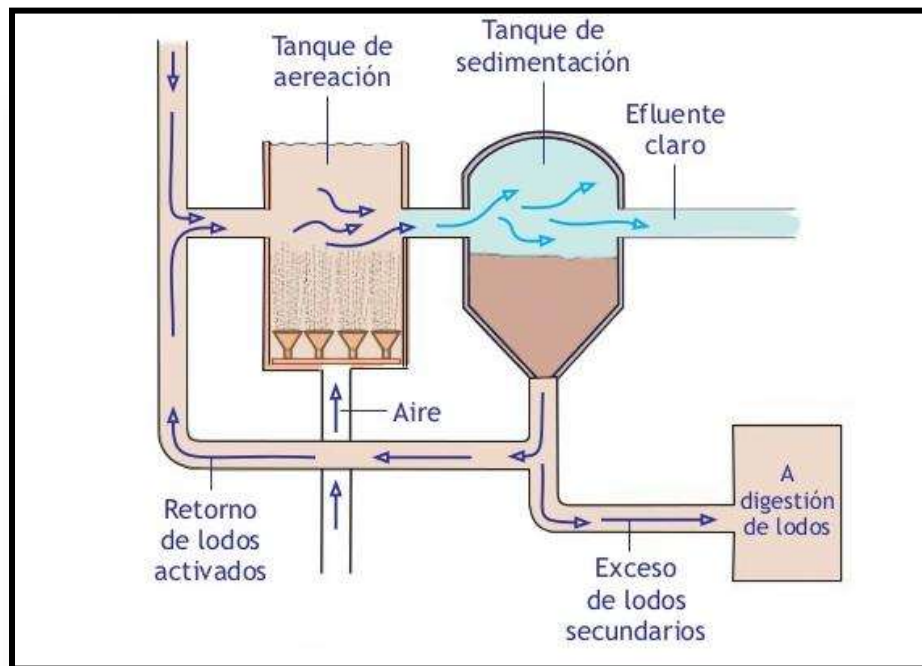


Figura 5. Proceso de lodos activados.

1.3.4.3 Filtros percoladores.

Un filtro percolador es una cama de grava o ya sea un medio plástico sobre el cual se rocían las aguas residuales pre tratadas. En este proceso de filtro percolador, los microorganismos se apegan al medio del lecho y forman una capa biológica sobre éste. A medida que las aguas residuales se percola por el medio, los microorganismos digieren y eliminan los contaminantes del agua.

Cada sistema de filtro percolador se compone por lo siguiente (ver Figura 6):

1. Un tanque séptico, que elimina los que se asientan y flotan de las aguas residuales.
2. Un tanque de dosificación/clarificador. Tanque de hormigón o fibra de vidrio que permite que los materiales biológicos se sedimenten del agua.
3. Un filtro percolador. Es un tanque ya sea de grava o de material plástico. Las aguas residuales se distribuyen sobre el medio y fluyen hacia abajo a través de la superficie.
4. Sistema de aplicación al suelo. Distribuye el agua tratada por debajo de la superficie del suelo.

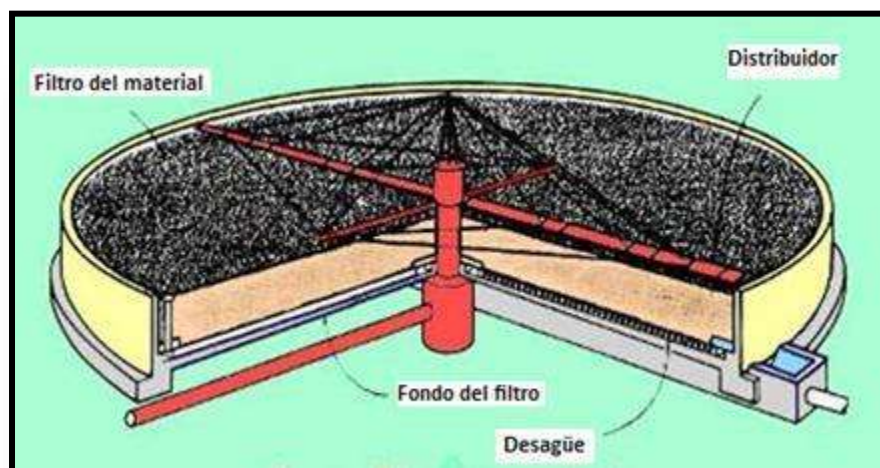


Figura 6. Proceso de filtros percoladores.

1.3.4.4 Digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica es un tratamiento en el cual los microorganismos degastan el material biodegradable en ausencia de oxígeno. Se puede utilizar para procesar una amplia serie de materia orgánica, tanto, restos de comida y pasto hasta papel inservible y residuos animales.

Esta descomposición anaeróbica consta de tres etapas importantes. En el proceso de la transformación de la materia orgánica existen productos intermedios conocidos como metabólicos. Finalizando el proceso de digestión queda un lodo líquido que es toda la materia orgánica que no se haya descompuesto completamente, se separara en sólidos y líquidos. El líquido puede someterse a tratamiento aeróbico o recircularse a través del proceso digestivo. En tanto a los sólidos pueden usarse como fertilizante o pueden ser desechados (ver Figura 7).

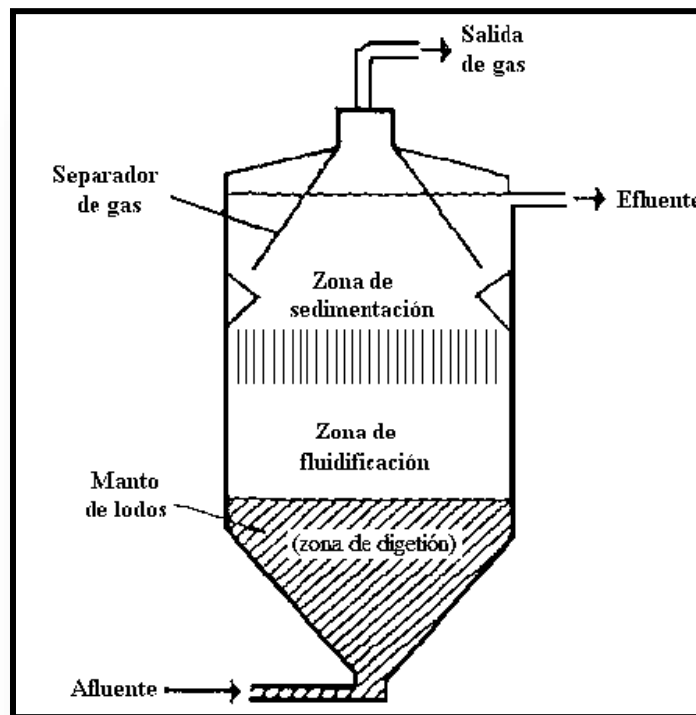


Figura 7. Proceso de digestión anaeróbica.

1.3.5 Captación de agua de lluvia

La captación de agua pluvial es un sistema de recolección que ha sido practicado en diferentes épocas y culturas ya que es una manera fácil para obtener agua tanto para consumo humano como para otras actividades. La captación de agua de lluvia no es algo nuevo y tampoco implica gran tecnología a un nivel doméstico. El agua de lluvia puede ser interceptada, colectada y almacenada en depósitos especiales para su uso posterior. Esto ayudaría durante el tiempo de secas para sobrellevarlas y también durante épocas de lluvias fuertes que desencadenan inundaciones que afectan la Ciudad. Debido al mal uso del agua y por factores tales como la deforestación masiva en el planeta, el agua ira escaseando progresivamente lo cual significa que en un futuro no muy lejano, el sistema de captación de agua de lluvia será un mecanismo de sobrevivencia necesario.

1.3.6 Optimización de procesos.

La optimización de procesos consiste en el manejo de las variaciones de un concepto inicial y usar la información obtenida para mejorar la idea. La optimización consta de buscar la mejor solución y esto implica que hay más de una solución y que cada una de ellas no tiene valores iguales. La definición de “mejor solución” es relativa a cada problema que se está manejando, su método de solución, las tolerancias permitidas y al encontrar la solución óptima dependerá de la formulación personal del problema.

Nuestra vida diaria nos confronta con muchas oportunidades de resolver problemas de optimización, por ejemplo, pueden surgir muchas preguntas como: ¿cuál es la mejor ruta para llegar algún lugar?, ¿cuál proyecto debo empezar primero? ¿qué ruta debo tomar para minimizar el consumo de gasolina?, etc. La mayoría de estas decisiones se basan en nuestros años de conocimiento del sistema sin recurrir a ninguna teoría matemática sistemática. Sin embargo, a medida que el sistema se complica, cada vez se toman más decisiones al mismo tiempo y se ven limitados por diversos factores, algunos de los cuales son nuevos para el sistema, es difícil tomar decisiones óptimas basadas en un conocimiento previo y heurístico. Además, muchas de las veces las apuestas son altas y hay múltiples

partes interesadas que satisfacer. La teoría de la optimización matemática proporciona una mejor alternativa para la toma de decisiones en estas situaciones, siempre que uno pueda representar las decisiones y el sistema matemáticamente.

La optimización es el proceso de ajustar los valores conocidos de entrada o las características de un proceso matemático para encontrar la salida o el resultado mínimo o máximo. Los enfoques de la optimización de procesos están relacionados con los métodos de encontrar raíces o ceros.

En los algoritmos de búsqueda de minimización, por ejemplo, en la búsqueda del costo mínimo, en la superficie del costo (para todos los valores posibles de la función) es el corazón de las rutinas de optimización, usualmente una superficie de costo tiene muchos picos, valles y lados. La búsqueda exhaustiva requiere de un número extremadamente grande de evaluaciones para encontrar el óptimo.

1.4 JUSTIFICACIÓN.

La problemática social que se vive en grandes partes del estado de Michoacán por la escasez de agua genera diversos problemas entre los que destaca la incapacidad de satisfacer las demandas diarias de agua. Por ejemplo, en la ciudad de Morelia, existen colonias en las cuales el agua se abastece por distintos periodos en la semana, suministrando el agua en ocasiones solamente dos días por cada semana. Por otro lado el consumo desmedido del recurso, también genera un problema de sobreexplotación de los mantos acuíferos, lo que hace necesario buscar alternativas para la solución de este problema.

1.5 HIPÓTESIS

La aplicación de técnicas de optimización al problema de síntesis de redes de agua macroscópicas ayudará a definir estrategias que permitan minimizar el consumo de agua fresca, la demanda insatisfecha de agua y los costos de mantenimiento, distribución y operación de dichos sistemas, satisfaciendo las demandas de agua y minimizando el impacto ambiental.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es proponer un modelo de optimización de redes agua considerando el tratamiento de aguas residuales y la recolección de agua pluvial que permita minimizar el consumo de agua fresca, la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos y los costos de operación del sistema.

1.6.2 Objetivos particulares

- Desarrollar una superestructura que represente las posibles interacciones entre los componentes del sistema.
- Formular un modelo de optimización basado en la superestructura propuesta que incluya todas las opciones de interés (segregación 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).
- Codificar el modelo matemático propuesto empleando la plataforma de programación GAMS.
- Aplicar el modelo propuesto en el caso de estudio con las características propias de dicho análisis.
- Analizar los resultados obtenidos para determinar la efectividad económica-ambiental y social por el reúso y captación del agua.

1.7 METODOLOGÍA

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

1.7.1 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.

1.7.2 Etapa 2.

En esta segunda etapa del proyecto se desarrolló una superestructura para representar el reúso óptimo de agua en los dos diferentes tipos de usuarios como lo son el usuario doméstico e industrial y la captación de agua de lluvia. En la superestructura se incluyen esquemas que han sido muy exitosos para el reúso de agua que se han implementado a nivel industrial y son, de la misma manera, los que implementaremos para el reúso de agua a nivel doméstico. 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. También se considera la captación, tratamiento, almacenamiento y distribución de agua de lluvia. Con base a esta superestructura, se formula el modelo matemático.

1.7.3 Etapa 3.

La tercera etapa del proyecto consto de elaborar el modelo matemático en el cual se toma en cuenta las fuentes naturales, que para nuestro caso de estudio son los pozos de extracción siendo un total de 28 pozos. Se incluyen dos diferentes tipos de usuarios, domésticos e industriales con diferentes demandas de agua. Se realizaron balances de masa en las fuentes naturales, en los tanques de almacenamiento y estanques artificiales, para los usuarios domésticos e industriales así como en las plantas de tratamiento para ambos usuarios. Estos balances se hacen de la aplicación de la ecuación general al balance de masa: Acumulación es igual a entradas menos salidas.

Se toma en cuenta como parámetro importante la precipitación que se calculó con ayuda de métodos indirectos, (de acuerdo a la norma oficial mexicana: (NOM-

011-CONAGUA-2015⁴³) como función de la precipitación anual y el parámetro que esta dado en función del tipo y uso de suelo.

La distribución del agua es importante mencionarlo ya que para los usuarios de tipo doméstico se cuenta con una planta de tratamiento en el cual se somete el agua residual para posteriormente reutilizarla en riego de jardines y con esto disminuir el uso de agua fresca para esta actividad. Por otra parte, los usuarios de tipo industrial también cuentan con una planta de tratamiento en la cual se trata toda el agua utilizada en diferentes áreas de la industria para después reutilizarla en sus distintos usos dependiendo la calidad de agua que se desea.

Para valorar el aspecto social se cuenta con ecuaciones para restringir la demanda insatisfecha de agua, ya que en distintos puntos del caso de estudio aplicado no cubre la demanda de agua de los usuarios domésticos todos los días, por lo que, se suministra el agua de forma inestable, razón por la cual se consideran restricciones para la demanda insatisfecha de agua, considerando a que estos usuarios no permanezcan más de dos días sin el recurso hídrico.

Por ultimo considerando el aspecto ambiental y el cuidado del manto acuífero se incluyen ecuaciones para calcular el nivel dinámico que cambia en los pozos de extracción, lo cual nos indica la cantidad de agua que extraemos de cada pozo. Se establece una ecuación para restringir el nivel del pozo, de tal manera que podemos manipular lo que deseamos extraer del pozo de extracción.

1.7.4 Etapa 4.

Se realizó la programación del modelo de optimización propuesto en la etapa 3, en la plataforma de programación GAMS. Posteriormente, se aplicó a un caso de estudio de un área de la ciudad de Morelia, Michoacán. Enseguida se analizaron y discutieron los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2. REÚSO DE AGUA.

2.1 REÚSO DE AGUA

En esta sección el problema abordado especifica un área limitada de la ciudad de Morelia Michoacán con un número conocido de usuarios domésticos e industriales cuyas demandas de agua también son conocidas, así como el periodo de tiempo que tiene que ser satisfechas durante todos los días y durante todo el año, se hizo el análisis tomando en cuenta los 365 días del año día a día, el problema de diseño consiste en determinar la estructura óptima de la red que permita reciclar las aguas residuales de ambos usuarios, su reutilización y regeneración. En otras palabras, el modelo necesita determinar las tuberías, bombas y dispositivos de almacenamiento requeridos para el agua regenerada. La superestructura mostrada en la Figura 8 incluye posibles configuraciones de interés para resolver este problema. El caso de estudio que se muestra en la Figura 9 es para una zona específica en donde existe un determinado número de usuarios domésticos e industriales con diferentes usos específicos del recurso hídrico. No obstante, la superestructura propuesta se puede aplicar para un área de cobertura mayor en donde se incluyan cualquier número de usuarios domésticos e industriales. Cabe considerar, por otra parte, las aguas residuales descargadas al ambiente tiene que satisfacer las regulaciones ambientales por lo que se le debe de dar el tratamiento adecuado para cumplir las restricciones. Nos permitimos poner de relieve que evitar la mezcla de diferentes tipos de corrientes de aguas residuales puede aumentar los costos de tubería, pero asimismo puede reducir el costo de tratamiento. Finalmente, el modelo de optimización tiene que determinar la estructura óptima de la red, el tamaño de las tuberías, así como las condiciones de operación para satisfacer la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos y la demanda de agua de los usuarios industriales, maximizando las ventas de agua, minimizando el consumo de agua fresca y minimizando la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos. El modelo matemático propuesto se describe en la siguiente sección.

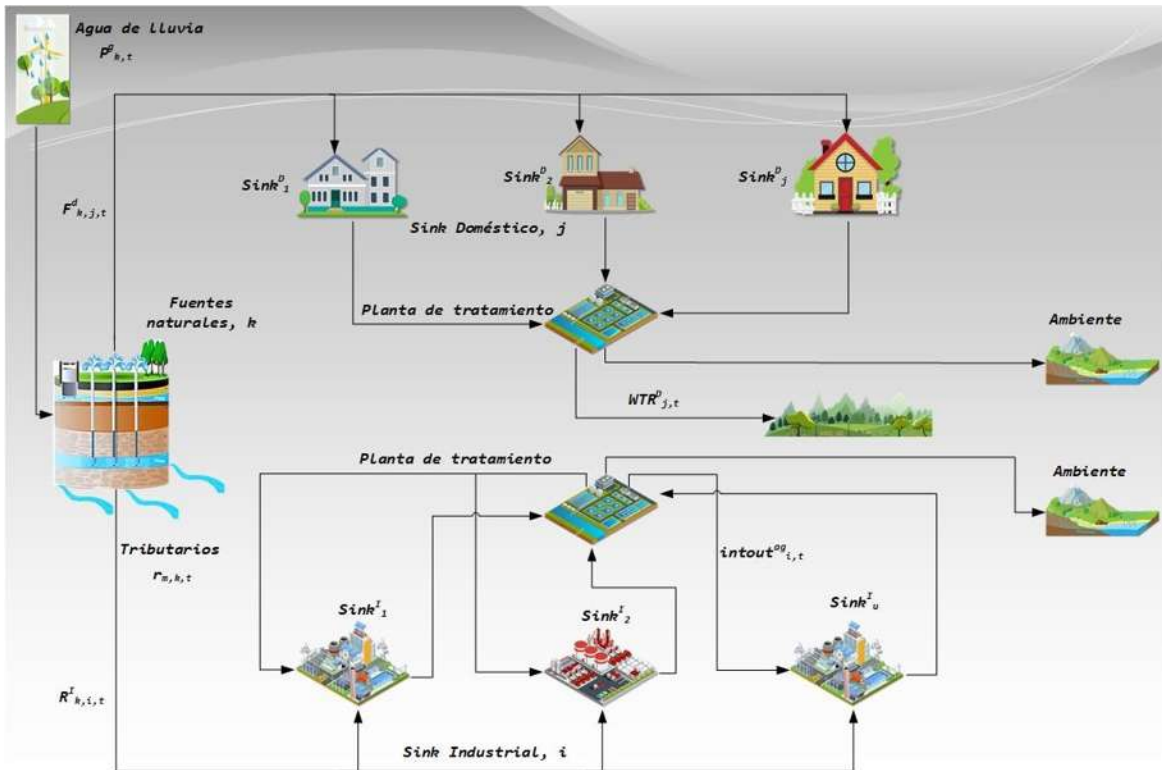


Figura 8. Superestructura reúso de agua.

2.2 MODELO MATEMÁTICO. Reúso de agua.

Para iniciar, se declaran los índices utilizados en el modelo: k representa las fuentes naturales, t representa los diferentes períodos de tiempo en días, cuando se descarga el agua, se almacena y se reutiliza. La formulación del modelo propuesto se establece de la siguiente manera:

a) Ecuaciones del balance de agua en las fuentes naturales.

El balance de masa para las fuentes naturales consta de la acumulación en el periodo de tiempo t ($G_{k,t}$) es igual a la acumulación en un periodo de tiempo anterior ($t - 1$) ($G_{k,t-1}$), más las corrientes tributarias que lleguen a la fuente natural k ($trib_{m,k,t}$) más el agua recolectada desde la precipitación directa en las fuentes naturales k en un periodo de tiempo dado t ($P_{k,t}^g$), menos el agua que es enviada a los diferentes usos domésticos ($f_{k,j,t}^d$), menos el agua que es enviada a los

diferentes usos industriales ($r_{k,i,t}^i$) y menos la pérdida de agua por la precipitación directa hacia la corriente natural k en un tiempo t $v_{k,t}^g$, cuando esta precipitación rebasa el volumen de la fuente natural, menos la pérdida de agua por la precipitación directa hacia la corriente natural k en un tiempo t , cuando esta precipitación rebasa el volumen de la fuente natural:

$$G_{k,t} = G_{k,t-1} + \sum_{m \in M} trib_{m,k,t} + P_{k,t}^g - f_{k,j,t}^d - r_{k,i,t}^i - v_{k,t}^g \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.1)$$

Agua recolectada por precipitación directa. La precipitación directa y el agua escurrida ($P_{k,t}^g$) puede ser calculada como sigue:

$$P_{k,t}^g = ROWV_{k,t} + DPWV_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.2)$$

El escurrimiento será igual a la precipitación anual (P_t) multiplicado por el área de captación (A_k^{ROW}) y esto a su vez multiplicado por el coeficiente de escurrimiento ($Ce_{y(t)}$):

$$ROWV_{k,t} = P_t \cdot A_k^{ROW} \cdot Ce_{y(t)} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.3)$$

De donde el coeficiente de escurrimiento ($Ce_{y(t)}$) es calculado por métodos indirectos, como función de la precipitación anual y el parámetro k (de acuerdo con la norma oficial mexicana: (NOM-011-CONAGUA-2015⁴³). Este parámetro esta dado en función del tipo y uso del suelo y del volumen de precipitación anual.

$$Ce_y = \frac{K(P - 250)}{2000} \quad K \leq 0.15 \quad \forall y \in Y$$

$$Ce_y = \frac{K(P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad K \geq 0.15 \quad \forall y \in Y$$

en donde K es el parámetro que depende del tipo y uso de suelo.

Mientras que la precipitación directa depende de la precipitación mensual y el área de recolección de la fuente natural.

$$DPWV_{k,t} = P_t \cdot A_k^{DPW} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.4)$$

Pérdida de agua en la fuente natural. Se considera la pérdida cuando el volumen sea rebasado en la fuente natural y se calcula:

La pérdida de agua de la corriente natural k en un periodo de tiempo t ($v_{k,t}^g$) se considerará un 20% de la precipitación total en la corriente k en un periodo de tiempo t :

$$v_{k,t}^g = 0.2 \left(\sum_{m \in M} trib_{m,k,t} + P_{k,t}^g \right) \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2.5)$$

b) Ecuaciones del balance de masa para usuarios de tipo doméstico.

Para realizar el balance de masa es necesario tomar en cuenta los suministros de agua que se alimentan a dicho uso, y el agua tratada que se recircula para el uso exclusivo de riego de áreas verdes. Enseguida se muestra el balance:

Balance de masa de entrada para usuarios de tipo doméstico.

La cantidad de agua disponible en la entrada para usuarios de tipo doméstico para el sink j en periodo de tiempo t ($d_{j,t}^{ds}$) es igual a la sumatoria del flujo de agua que se extrae de las fuentes naturales ($f_{k,j,t}^d$) más la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos ($DINDS_{j,t}^d$), más el agua tratada de los usuarios domésticos que se usara específicamente para el riego de jardines ($WTR_{j,t}^d$):

$$d_{j,t}^{ds} = \sum_k f_{k,j,t}^d + DINDS_{j,t}^d + WTR_{j,t}^d \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.6)$$

Ecuaciones relacionadas a la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos.

Para la demanda insatisfecha se necesita una variable para tratar de minimizar esta demanda insatisfecha ya que en varios puntos del caso de estudio se cuenta con esta problemática, por lo que se establece la ecuación 7 que la restringe, la cual dice que la demanda de agua de los usuarios domésticos ($d_{j,t}^{ds}$) menos la demanda insatisfecha en un tiempo t ($DINDS_{j,t}^d$) más la demanda insatisfecha en un tiempo

$t - 1$ ($DINDS_{j,t-1}^d$) más la demanda insatisfecha en un tiempo $t - 2$ ($DINDS_{j,t-2}^d$) debe de ser mayor o igual a cero:

$$d_{j,t}^{ds} - (DINDS_{j,t}^d + DINDS_{j,t-1}^d + DINDS_{j,t-2}^d) \geq 0 \quad j \in J, \forall t \in T \quad (2.7)$$

Restricciones para la demanda insatisfecha.

Para restringir la demanda insatisfecha para que los usuarios domésticos no se queden sin agua más de dos días seguidos se agrega una variable binaria $DINDSY_{j,t}$ y se multiplica por un valor big M, el cual estará representado como el valor más alto de la demanda de agua de los usuarios domésticos y será igual o mayor a la demanda insatisfecha ($DINDS_{j,t}^d$):

$$DINDS_{j,t}^d \leq MGRANDE * DINDSY_{j,t} \quad j \in J, \forall t \in T \quad (2.8)$$

Se necesita otra ecuación como la (8) pero ahora para que el valor de ($DINDS_{j,t}^d$) sea lo más pequeño posible:

$$DINDS_{j,t}^d \geq -MGRANDE * DINDSY_{j,t} \quad j \in J, \forall t \in T \quad (2.9)$$

El razonamiento inductivo refleja que si la variable binaria ($DINDSY_{j,t}$) tiene el valor de 1, la demanda insatisfecha tiene que ser menor que un valor muy grande para la ecuación (8). Y para la ecuación (9) tiene que ser mayor que un valor muy chico.

En consecuencia, si la variable binaria ($DINDSY_{j,t}$) es igual a cero, la demanda insatisfecha sería $0 \leq DINDS_{j,t}^d \leq 0$, en conclusión es que la ($DINDS_{j,t}^d$) sería igual a cero para este caso.

Nótese que se hace uso del big M porque si multiplicamos la demanda insatisfecha por una variable binaria se produce una no linealidad, por lo que se complicaría el problema en resolver de forma detallada esa no linealidad, en cambio, la variable binaria se multiplica por el valor de big M que para nuestro caso este valor es un parámetro que conocemos.

Por último se establece la restricción de la variable binaria para los tiempos, la cual dice que la variable binaria en cualquier tiempo t ($DINDSY_{j,t}$) más la variable binaria

de un tiempo $t - 1$ ($DINDSY_{j,t-1}$) más de un tiempo $t - 2$ ($DINDSY_{j,t-2}$) tiene que ser menor o igual a uno. Esto se hace para que no se tengan más de dos días seguidos con demanda insatisfecha:

$$DINDSY_{j,t} + DINDSY_{j,t-1} + DINDSY_{j,t-2} \leq 1 \quad j \in J, \forall t \in T \quad (2.10)$$

De tal manera que si el valor de la variable binaria ($DINDSY_{j,t}$) en un tiempo t es igual a uno, esto obliga a que en el tiempo $t - 1$ y $t - 2$ sean necesariamente cero.

Consecuentemente si la variable binaria $DINDSY_{j,t}$ en un tiempo t es igual a cero, en el tiempo $t - 1$ y $t - 2$ serían menor o igual a uno. En otras palabras, en cualquier de los tiempos puede tomar el valor de cero y se cumpliría la restricción.

Ecuaciones para controlar el nivel dinámico de los pozos de extracción.

En un pozo de extracción hay dos niveles de vital importancia: Nivel estático: Es el nivel de agua que se encuentra cuando no se ha iniciado la extracción.

El nivel dinámico es el resultado de cuando en el pozo se le extrae el agua, es decir cuando inicia el bombeo y el nivel de agua comienza a bajar conforme a la velocidad de bombeo hasta que para y la rapidez de llenado del pozo se equilibra con la del bombeo.

Para poder evaluar la altura del nivel dinámico del pozo de extracción se hace uso de la siguiente ecuación y consta de la altura del pozo k en el tiempo t ($H_{k,t}$) es igual a la sumatoria del agua para los usuarios domésticos ($f_{k,j,t}^d$) más la sumatoria del agua para los usuarios industriales ($r_{k,i,t}^i$) menos la sumatoria de las corrientes tributarias ($trib_{m,k,t}$) menos la precipitación de las fuentes naturales k en un tiempo t ($P_{k,t}^g$) más las pérdidas de agua de las fuentes naturales k en un tiempo t ($v_{k,t}^g$) y todo lo anterior dividido entre el área del pozo de extracción de las fuentes naturales k (A_k):

$$H_{k,t} = \left[\sum_{j \in J} f_{k,j,t}^d + \sum_{i \in I} r_{k,i,t}^i - \sum_{m \in M} trib_{m,k,t} - P_{k,t}^g + v_{k,t}^g \right] / A_k \quad k \in K, \forall t \in T \quad (2.11)$$

Restricción para controlar el nivel dinámico del pozo. Esto se considera para valorar el aspecto ambiental, controlamos la cantidad de agua que se desea extraer de cada pozo, teniendo en cuenta que si aumenta demasiado el nivel dinámico no es bueno y esto es manipulando el nivel dinámico.

$$H_{k,t} \leq 0 \quad k \in K, \forall t \in T \quad (2.12)$$

Balance de masa de salida para usuarios de tipo doméstico.

El balance de masa de salida del sink j en un tiempo determinado t ($d_{j,t}$) es igual a la cantidad de agua utilizada o pérdida en los sinks domésticos ($cw_{j,t}^d$) más el flujo de agua correspondiente a las aguas residuales ($int_{j,t}^{in}$).

$$d_{j,t} = cw_{j,t}^d + int_{j,t}^{in} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.13)$$

El término de agua ($cw_{j,t}^d$) del balance anterior hace referencia al agua que se utiliza cuando se lava el coche y en otra actividad en la cual se pueda utilizar el agua antes de que se tire al drenaje y para propósitos de modelación se consume un 50% del agua recibida en cada usuario doméstico. Y el término de agua residual ($int_{j,t}^{in}$) es el agua que llega a la alcantarilla y deberá ser enviada a una planta de tratamiento en el cual se trate para después destinarla al riego de áreas verdes.

Balance en planta de tratamiento.

A la planta de tratamiento llega el agua residual de los usuarios domésticos ($int_{j,t}^{in}$), que puede con un tratamiento previo recuperarse y reutilizarse con fines de riego (en su totalidad) o para su eliminación final ($wtr_{j,t}$). El segundo término (cw_t^{tp}) del balance representa el flujo de agua que no se reutiliza durante un tiempo t (es decir, el agua que ya no se trata en la planta de tratamiento y por lo tanto es enviada a disposición final):

$$\sum_j int_{j,t}^{in} = wtr_{(j=8,t)} + cw_t^{tp} \quad \forall t \in T \quad (2.14)$$

El agua tratada será enviada solamente al riego de áreas verdes como se muestra a continuación:

$$wtr_{j,t} = \sum_{j=8} wtr_{j,t} \quad \forall t \in T \quad (2.15)$$

Donde ($wtr_{j,t}$) es el flujo de agua enviado desde la planta de tratamiento al riego de áreas verdes de los usuarios domésticos, por lo que se cuenta con un sink destinado a las áreas verdes y será el último usuario doméstico.

c) Ecuaciones relacionadas al balance de masa para usuarios de tipo industrial.

Balance de masa de entrada para usuarios de tipo industrial.

El agua en la entrada para usuarios de tipo industrial para el sink i en un periodo de tiempo t ($d_{i,t}^{di}$) es igual a la sumatoria del flujo de agua que viene de las fuentes naturales ($r_{k,i,t}^i$) más el agua previamente tratada de los usuarios industriales ($int_{i,t}^{sal}$):

$$d_{i,t}^{di} = \sum_{k \in K} r_{k,i,t}^i + \sum_i int_{i,t}^{sal} \quad \forall t \in T, \forall j \in J \quad (2.16)$$

Balance de masa de salida para usuarios de tipo industrial.

El balance de masa del sink i en un periodo de tiempo t ($d_{i,t}^{di}$) es igual a la cantidad de agua utilizada o consumida en el proceso ($cw_{i,t}^{di}$) más el flujo de agua correspondiente a las aguas residuales ($int_{i,t}^{int}$):

$$d_{i,t}^{di} = cw_{i,t}^{di} + int_{i,t}^{int} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (2.17)$$

El término de agua ($cw_{i,t}^{di}$) del balance anterior hace referencia al agua que se consume en la industria y para propósitos de modelación se consume un 90% del agua. El término de agua residual ($int_{i,t}^{int}$) es el agua que llega a la alcantarilla y deberá ser enviada a una planta de tratamiento para después recircularla al proceso en cual sea requerido.

Balance en planta de tratamiento.

El flujo de aguas residuales que alimenta la planta de tratamiento de los usuarios industriales es aquel flujo que ya ha pasado por el proceso y que puede reutilizarse

por lo cual se somete a un tratamiento para después de ser tratada pueda ser reutilizada para los mismos usuarios industriales:

$$\sum_i int_{i,t}^{int} = int_t^{out} \quad \forall t \in T \quad (2.18)$$

El agua tratada de los usuarios industriales se recircula hacia el mismo uso industrial por lo que:

$$int_t^{sal} = \sum_i int_{i,t}^{sal} \quad \forall t \in T \quad (2.19)$$

d) Funciones objetivos.

Una función objetivo consiste en maximizar los ingresos de la red de agua macroscópica; esto es la diferencia de las ventas menos los costos de tratamiento, almacenamiento y de distribución:

$$TAR = \text{ventas} - \text{costos de tratamiento} - \text{costos de almacenamiento} - \text{costos de bombeo}.$$

Los términos de *ventas* se pueden expresar como la venta total de agua:

$$\begin{aligned} \text{ventas} = & \left(\sum_k \sum_j \sum_t f_{k,j,t}^d \right) DSC + \left(\sum_k \sum_i \sum_t r_{k,i,t}^i \right) ISC \\ & + \left(\sum_t WTR_{j=8,t} \right) DSCJ + \left(\sum_i \sum_t int_{i,t}^{sal} \right) ISCR \end{aligned} \quad (2.27)$$

Se toma en cuenta que el costo del agua no depende de la fuente sino del usuario final. Cada usuario tiene necesidades diferentes y utiliza el agua con diferente calidad, por lo que el costo de tratamiento dependerá del usuario final, y esto se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{costo de trat} = & \left(\sum_k \sum_j \sum_t f_{k,j,t}^d CTND + \sum_k \sum_i \sum_t r_{k,i,t}^i CTNI \right) \\ & + \left(\sum_t WTR_{j=8,t} + \sum_i \sum_t int_{i,t}^{sal} \right) CTPE \end{aligned} \quad (2.28)$$

El costo de almacenamiento se necesita para instalar la infraestructura requerida del proceso, y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{costo de almacenamiento} = \left(\sum_l \text{Costo}_l^s \right) \quad (2.29)$$

Y finalmente, los costos de distribución que incluyen los costos de tubería y bombeo que son requeridos para distribuir el agua en la ciudad desde las fuentes tanto naturales como de almacenamiento hasta los usuarios finales.

$$\begin{aligned} \text{Costo } tb = & \sum_k \sum_j \sum_t f_{k,j,t}^d PCND + \sum_k \sum_i \sum_t r_{k,i,t}^i PCNI + \sum_t WTR_{j=8,t} PCSTJ \\ & + \sum_i \sum_t int_{i,t}^{sal} PCSTIN \end{aligned} \quad (2.30)$$

Se debe tomar en cuenta que es una práctica en los diseños preliminares, como el que se toma en cuenta en esta metodología, estimar el costo de la tubería y el bombeo utilizando como base solo el flujo para una distancia determinada. Si el diámetro de las tuberías, la distancia entre los puntos de almacenamiento para usuarios finales y la altura son fijos, solo el índice determina el tamaño de las bombas y la energía requerida. Por otro lado, después de esta etapa, se debe considerar el diseño detallado de la red de tuberías para determinar el costo exacto.

Demanda insatisfecha de agua.

Otra función objetivo es la minimización de la demanda de agua insatisfecha y es como sigue:

$$DI = \sum_j \sum_t DINDS_{j,t} \quad (2.31)$$

Función multiobjetivo. La función objetivo consiste en maximizar los ingresos de la red de agua macroscópica (*TAR*) y minimizar la demanda insatisfecha del agua (*DI*):

$$O. F. = \text{Max}\{TAR\}; \text{Min}\{DI\} \quad (2.32)$$

2.3 CASO DE ESTUDIO. Reúso de agua.

Se presenta un caso de estudio para mostrar la aplicación del modelo matemático propuesto. En el caso particular del estado de Michoacán existen 23 mantos acuíferos situados en diferentes partes del estado. En el caso de Morelia se tiene el acuífero Morelia-Querendaro, definido con la clave 1602 (ver Figura 9) en el sistema de información geográfica para el manejo de agua subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 26' y 20° 08' de latitud norte y los meridianos 100° 38' y 101° 29' de longitud oeste, abarca una superficie aproximada de 3,510 km².

Geopolíticamente abarca la totalidad de los municipios de Cuitzeo, Huandacareo, Santa Ana Maya, Copandaro, Tarimbaro, Álvaro Obregón; de manera parcial los municipios de Morelos, Chucándiro, Morelia, Quiroga, Lagunillas, Acuitzio, Charo, Zinapécuaro, Queréndaro e Indaparapeo; y pequeñas porciones de los municipios de Páztuario, Huiramba Y Huaniqueo. Enseguida se muestra la imagen de su ubicación.

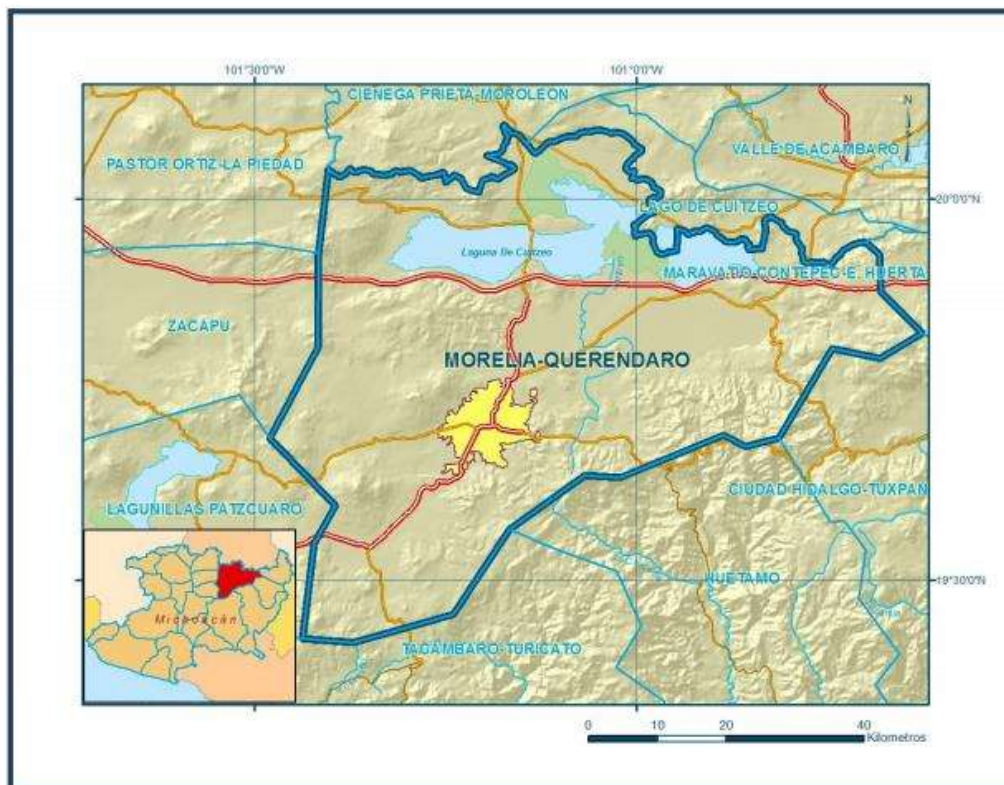


Figura 9. Ubicación geográfica del manto acuífero en el estado de Michoacán.

Se analizó una zona de la ciudad de Morelia “Sector 8 Republica Norte”, en el cual se sufre día a día con problemas de demanda de agua, por lo que solo se les suministra el recurso hídrico en distintos lapsos de la semana. Se tomaron en cuenta 7 zonas divididas que representan los sinks domésticos en la superestructura y se anexó un sink más de los usuarios domésticos solo con la finalidad de utilizar ese último sink para el riego de áreas verdes: El sink 1 cuenta con 22,399 habitantes, el sink 2 con 16,468 habitantes, el sink 3 con 21,319 habitantes, el sink 4 con 16,538, el sink 5 con 21,951, el sink 6 con 5,852, y el sink 7 con 31,770. Se tiene un total de 127,750 habitantes (ver Figura 10). En la Figura 10 se puede apreciar la ubicación exacta de las fuentes naturales, que, para nuestro caso de estudio son los pozos de extracción. En la Tabla 2 se muestra detalladamente las características de los pozos de extracción, así como el nivel dinámico de los mismos. El consumo anual de agua dulce para usuarios de tipo doméstico e industrial se muestra en la Tabla 9 y Tabla 10 respectivamente, ubicado en el apéndice A. En la Tabla 1 se muestra la precipitación mensual en mm de agua, obtenido del Sistema Meteorológico Nacional (2015⁴⁴). Los costos unitarios en dólares son estimados de acuerdo al nivel socioeconómico de cada sink, esto dependerá de varios factores estipulados en el Periódico oficial del gobierno del estado (2016⁴⁵). Los costos de tubería y bombeo de las fuentes naturales para los usuarios domésticos e industriales (ver Tabla 11 y Tabla 12 del Apéndice A). Se generaron escenarios con distinto nivel dinámico para el caso de estudio abordado, solamente se presentan dos escenarios de forma detallada con 2 niveles dinámicos del pozo para el apartado de reúso de agua.

Este problema se codificó en el software GAMS, donde se utilizó el solver CPLEX para resolver el problema mixto entero lineal (MILP). El problema consiste de 104499 ecuaciones y 295033 variables, usando un valor absoluto y relativo de $1e-9$ con una computadora de procesador Intel(R) Core(TM) i7-3612QM CPU @ 2.10 GHz 2.10 GHz con 4 GB de memoria RAM en aproximadamente 140.129 s de tiempo de CPU.

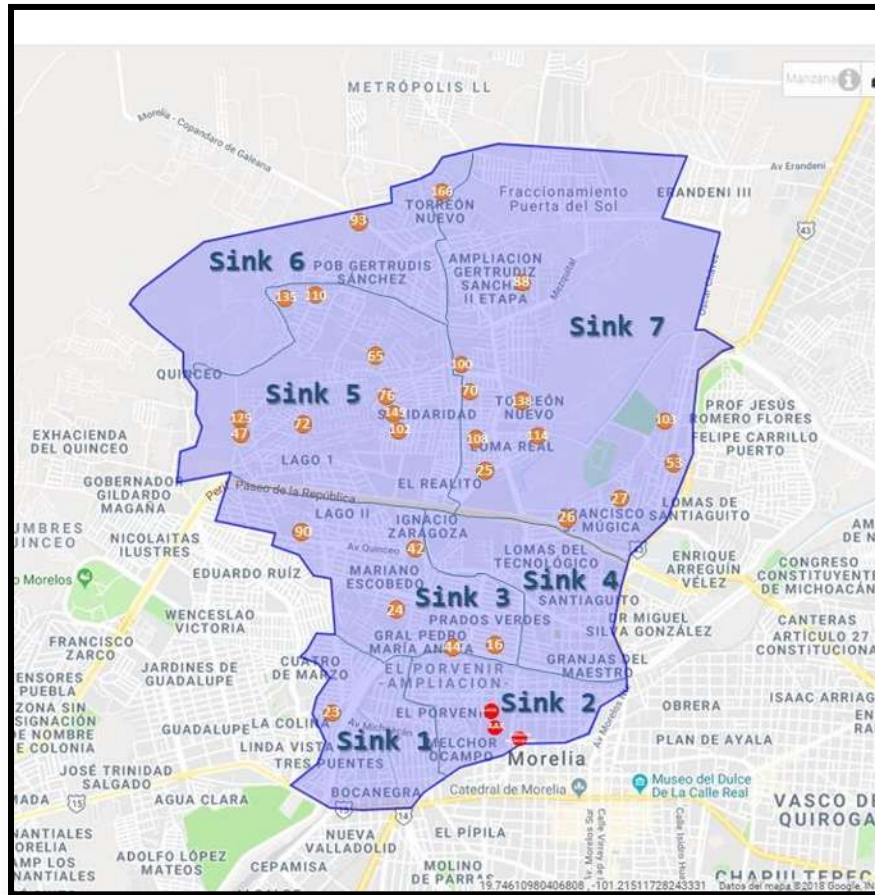


Figura 10. Representación del "Sector 8 Republica Norte" y división de los sinks domésticos e industriales.

Tabla 1. Precipitación disponible para la ciudad de Morelia (2015) (SMN, 2015⁴⁵).

Mes	Precipitación (mm Agua)
Enero	0.1
Febrero	10.8
Marzo	114.2
Abril	6.4
Mayo	114.6
Junio	97
Julio	137.4
Agosto	65.4
Septiembre	51
Octubre	36.5
Noviembre	1.7
Diciembre	19

Tabla 2. Características de los pozos de extracción.

Fuentes de abastecimiento							
Id	Estado	Pozo profundo	Nivel Dinámico	Id	Estado	Pozo profundo	Nivel Dinámico
16	Activo	Prados Verdes	72	88	Activo	La Palma	115
23	Activo	Delta de los Ríos	160	90	Activo	Mariano Escobedo III	217
24	Activo	Mariano Escobedo	98	93	Activo	Amp. Torreón Nuevo II	157
25	Activo	El Realito	38	100	Activo	Reposición Gertrudis Sánchez	169
26	Activo	Lomas del Tecnológico	150	102	Activo	Amp. Solidaridad	137
27	Activo	La Soledad	150	103	Activo	Amp. La Soledad	164
42	Activo	Ignacio Zaragoza	170	108	Activo	El Realito II	158
44	Activo	Mariano Escobedo II	154	110	Activo	Villas del Real IV	134
47	Baja	El Lago I	55	114	Activo	Loma Real	131
53	Activo	LA Soledad II	185	125	Activo	El Lago II (Rep)	145
65	Activo	Gertrudis Sánchez I	100	135	Activo	Rinconada de Morelia	100
70	Activo	Villas del Real III	70	138	Activo	Residencial Torreón Nuevo	144
72	Activo	El Lago II	225	149	Activo	Torreón Nuevo II	178
76	Baja	Amp. Torreón Nuevo I	123	166	Activo	Manantiales	157

CAPÍTULO 3. ACOPLAMIENTO SIMULTÁNEO DEL REÚSO DE AGUA Y CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL.

3.1 ACOPLAMIENTO SIMULTÁNEO DEL REÚSO DE AGUA Y CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL.

El problema abordado en este apartado se considera la misma zona “8 República Norte” del caso de estudio anterior. Son las mismas demandas de agua de los usuarios domésticos e industriales como se observa en la Tabla 9 y Tabla 10, respectivamente, así como la misma precipitación anual (ver Tabla 1), en este caso se estudió se tuvo que analizar las posibles zonas de captación y lugares para acomodar los dispositivos de almacenamiento. El problema consiste en hacer la síntesis de red de agua en la zona 8 república norte para disminuir la demanda insatisfecha de agua en distintas épocas a través de la instalación de sistemas de captación de agua pluvial y sistemas de reúso de aguas grises, así como el almacenamiento y distribución de este recurso. La solución óptima debe de tener en cuenta la configuración de la red y las condiciones de funcionamiento con las ventas totales anuales (TAR) y con la mínima demanda insatisfecha de los usuarios domésticos. La solución a este caso de estudio, se propone la superestructura mostrada en la Figura 11, donde se muestran las especificaciones del problema, que en este caso son los mismos usuarios utilizados en el apartado anterior pero, a diferencia, en este problema se cuentan con tanques de almacenamiento y estanques artificiales; sin embargo, la superestructura sin dificultad se puede aplicar a más zonas de la ciudad o inclusive a ciudades conjuntas. En este apartado se incluyen tratamiento al agua de lluvia para satisfacer las necesidades de cada usuario y tratamiento a las aguas grises. Debemos tomar en cuenta que las aguas residuales se pueden mezclar con agua solamente de la misma calidad y toda el agua que se descargue al ambiente debe de ser tratada para que cumpla las restricciones ambientales. El agua de lluvia y las aguas regeneradas deben almacenarse en diferentes dispositivos de almacenamiento, de tal manera que el agua de lluvia tiene mayor calidad. En base a la superestructura propuesta, el modelo de optimización se presenta en la siguiente sección.

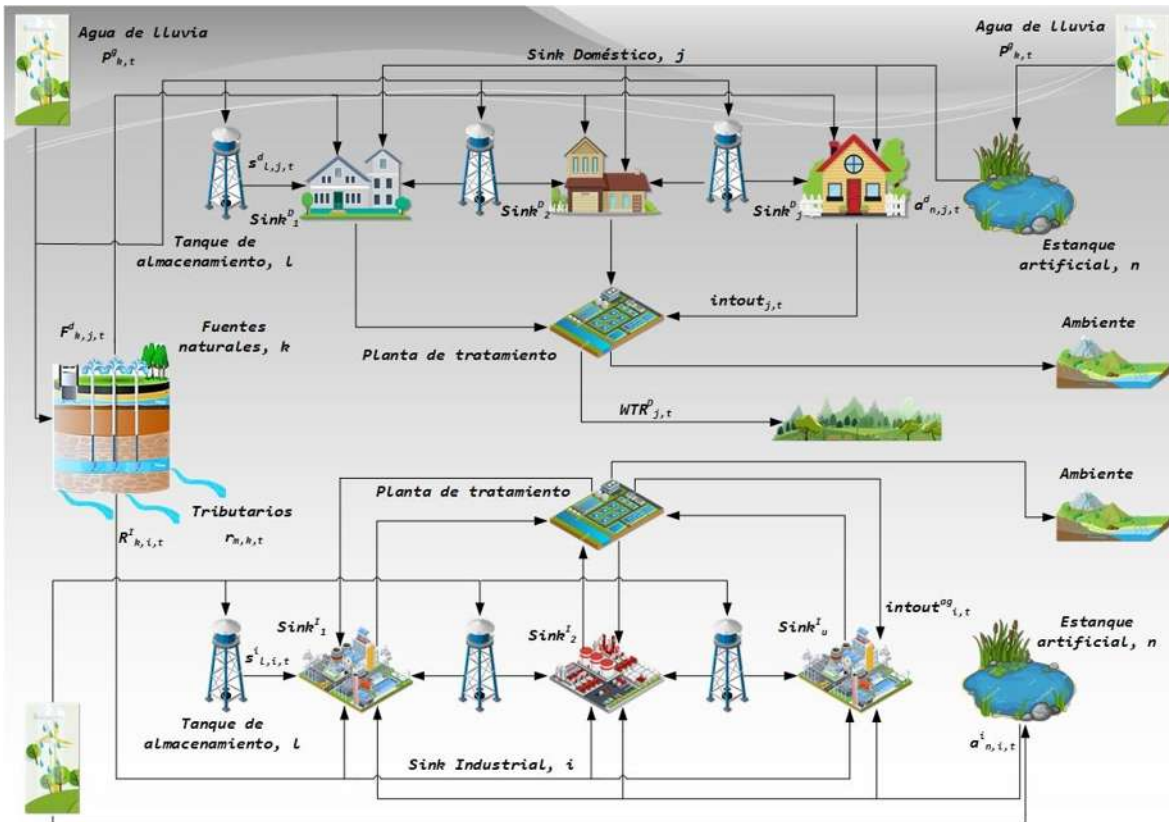


Figura 11. Superestructura reuso de agua y captación de agua pluvial.

3.2 MODELACIÓN MATEMÁTICA. Acoplamiento simultáneo del reuso de agua y captación de agua pluvial.

En esta sección se presenta el modelo de optimización propuesto para el diseño de sistemas de reutilización de agua y de recolección de agua pluvial, el cual implica el tratamiento de aguas residuales, así como el tratamiento de agua pluvial, almacenamiento y distribución en una zona de la ciudad de Morelia basado en la superestructura mostrada en la Figura 15. Donde j representa los usuarios domésticos, i representa los usuarios industriales, s representa los tanques de almacenamiento, n representa los estanques artificiales. La formulación propuesta considera los 365 días del año, haciendo el análisis día a día; esto debido a que se pueda saber el comportamiento de la demanda insatisfecha y ubicar el periodo preciso en el cual sucede el problema. El modelo propuesto se divide en dos partes, la primera corresponde a las ecuaciones relacionadas con el reuso de agua que fue

explicada en el apartado anterior, en tanto que la segunda corresponde a la captación de agua pluvial, la cual se demuestra consecuentemente:

a) Ecuaciones del balance de agua de lluvia recolectada.

Cálculo para la precipitación del agua pluvial. Se tiene que contemplar cual es la cantidad de precipitación del agua pluvial disponible por lo que se tiene que calcular.

Este cálculo toma en cuenta que, para una localización en específico, la cantidad de agua recolectada (P) está en función de la precipitación total (P_t), el área que ocupara el agua de lluvia recolectada (A) y el coeficiente de escurrimiento (Ce) por lo cual la ecuación es:

$$P = f(\text{Precipitación total, Área, } Ce)$$

Como se estableció en la anterior para la recolección de agua pluvial está en función del coeficiente de escurrimiento el cual depende del tipo de material con el que está construida el área de captación, en el caso de un área urbanizada se utilizan las azoteas de las casas y edificios como área de captación. Distintos autores tienen reportados datos para el coeficiente de escurrimiento en un rango de 0.7-0.95 (Ver Farrany et al., 2011⁷). Finalmente, la precipitación mensual en un periodo de tiempo dado se considera a tener una distribución normal aleatoria, por lo cual los parámetros estadísticos (principal y desviación estándar) pueden ser obtenidos por datos históricos. Dicha tal información, la ecuación anterior se tendrá que expresar para cada uno de los almacenamientos considerados y estará dada en función de la precipitación mensual, el área de captación pluvial y el coeficiente de escurrimiento.

Cálculo de precipitación para el almacenamiento de agua total para tanque s .

El agua total disponible para el almacenamiento del tanque s , ubicado en la locación l en un periodo de tiempo t ($P_{l,t}^s$) es igual a la precipitación total (P_t) multiplicado por el área de recolección disponible (A_l^s) y esto a su vez multiplicado por el coeficiente de escurrimiento (Ce^s):

$$P_{l,t}^s = P_t \cdot A_l^s \cdot C e^s \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (2.33)$$

Cálculo de precipitación para el almacenamiento de agua total para estanque artificial α . El agua total disponible para el estanque artificial α , ubicado en la locación n , en un periodo de tiempo t ($P_{n,t}^a$) es igual a la precipitación total (P_t) multiplicado por el área de recolección disponible (A_n^a) y esto a su vez multiplicado por el coeficiente de escurrimiento ($C e^a$):

$$P_{n,t}^a = P_t \cdot A_n^a \cdot C e^a \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (2.34)$$

Al realizar la captación de agua, tenemos que tomar en cuenta la precipitación mensual ya que habrá meses que llueva más que otros y esto afectara directamente al volumen de los tanques utilizados para la captación, por lo que será necesario incluir la perdida de agua cuando la precipitación rebase el volumen de los tanques utilizados.

Ya que tengamos el valor calculado de la precipitación de agua pluvial en cada dispositivo de almacenamiento, es necesario realizar un balance de masa por lo que el agua captada disponible será enviada a cada dispositivo de almacenamiento:

Balance de agua del tanque de almacenamiento s : La precipitación directa para el tanque de almacenamiento s ubicado en la locación l en un periodo de tiempo t ($P_{l,t}^s$) es igual a la entrada del tanque s ubicado en la locación l en un periodo de tiempo t ($s_{l,t}^{ent}$) más las pérdidas de agua del tanque s ubicado en la locación n en un periodo de tiempo t ($v_{l,t}^s$):

$$P_{l,t}^s = s_{l,t}^{ent} + v_{l,t}^s \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (2.34)$$

Balance de agua del estanque artificial de almacenamiento α : La precipitación directa para el tanque de almacenamiento α ubicado en la locación n en un periodo de tiempo t ($P_{n,t}^a$) es igual a la entrada del tanque α ubicado en la locación n en un periodo de tiempo t ($a_{n,t}^{ent}$) más las pérdidas de agua del tanque s ubicado en la locación n en un periodo de tiempo t ($v_{n,t}^a$):

$$P_{n,t}^a = a_{n,t}^{ent} + v_{n,t}^a \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (2.35)$$

b) Ecuaciones del balance de masa en los tanques de almacenamiento y los estanques artificiales.

Se considera la acumulación de dichos tanques que será igual a la entrada menos la salida y esto aplicado a cada uno de los dispositivos de almacenamiento:

Balance de masa para tanque de almacenamiento S. El balance de masa consta de la acumulación en el periodo de tiempo t ($S_{l,t}$) es igual a la acumulación en un periodo de tiempo anterior ($t - 1$) ($S_{l,t-1}$) más el flujo de entrada al tanque $s_{l,t}^{ent}$ menos la sumatoria de la salida de los usuarios domésticos $s_{l,j,t}^{sal,d}$, menos la sumatoria de la salida de los usuarios industriales $s_{l,i,t}^{sal,i}$:

$$S_{l,t} = S_{l,t-1} + s_{l,t}^{ent} - \sum_{j \in J} s_{l,j,t}^{sal,d} - \sum_{i \in I} s_{l,i,t}^{sal,i} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (2.36)$$

Balance de masa para estanque artificial A. El balance de masa consta de la acumulación en el periodo de tiempo t ($A_{n,t}$) es igual a la acumulación en un periodo de tiempo anterior ($t - 1$) ($A_{n,t-1}$) más el flujo de entrada al tanque ($a_{n,t}^{ent}$) menos la sumatoria de la salida de los usuarios doméstico ($a_{n,j,t}^{sal,d}$), menos la sumatoria de la salida de los usuarios industriales ($a_{n,i,t}^{sal,i}$)

$$A_{n,t} = A_{n,t-1} + a_{n,t}^{ent} - \sum_{j \in J} a_{n,j,t}^{sal,d} - \sum_{i \in I} a_{n,i,t}^{sal,i} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (2.37)$$

c) Ecuaciones del balance de masa para usuarios de tipo doméstico incluyendo agua pluvial.

Para realizar el balance de masa es necesario tomar en cuenta todos los suministros de agua que se alimentan a dicho uso, ya que no solamente se dispone de una fuente principal, sino que se cuentan con distintas fuentes como lo son las fuentes naturales y la captación de agua pluvial, ya sea de los estanques artificiales como de los tanques de almacenamiento.

Balance de masa de entrada para usuarios de tipo doméstico.

La cantidad de agua disponible en la entrada para usuarios de tipo doméstico para el sink j en periodo de tiempo t ($d_{j,t}^{ds}$) es igual a la sumatoria del flujo de agua que se extrae de las fuentes naturales ($f_{k,j,t}^d$) más la sumatoria del flujo de agua del tanque de almacenamiento ubicado en la locación l destinado para el sink j en un periodo de tiempo t ($s_{l,j,t}^{sal,d}$) más la sumatoria del flujo de agua del estanque artificial ubicado en la locación n destinado para el sink j en un periodo de tiempo t ($a_{n,j,t}^{sal,d}$) más la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos ($DINDS_{j,t}^d$), más el agua tratada de los usuarios domésticos que se usara específicamente para el riego de jardines ($WTR_{j,t}^d$):

$$d_{j,t}^{ds} = \sum_k f_{k,j,t}^d + \sum_{l \in L} s_{l,j,t}^{sal,d} + \sum_{n \in N} a_{n,j,t}^{sal,d} + DINDS_{j,t}^d + WTR_{j,t}^d \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2.38)$$

Ecuaciones relacionadas a la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos.

Las ecuaciones respecto a la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos son las mismas utilizadas en el apartado anterior, así como las ecuaciones que controlan el nivel dinámico de los pozos de extracción.

d) Ecuaciones relacionadas al balance de masa para usuarios de tipo industrial.

Balance de masa de entrada para usuarios de tipo industrial.

El agua en la entrada para usuarios de tipo industrial para el sink i en un periodo de tiempo t ($d_{i,t}^{di}$) es igual a la sumatoria del flujo de agua que viene de las fuentes naturales ($r_{k,i,t}^i$) más la sumatoria del flujo de agua del tanque de almacenamiento ubicado en la locación l para el sink i en un periodo de tiempo t ($s_{l,i,t}^{sal,i}$) más la sumatoria del flujo de agua del estanque artificial ubicado en la locación n para el

sink i en un periodo de tiempo t ($a_{n,i,t}^{sal,i}$) más el agua previamente tratada de los usuarios industriales ($int_{i,t}^{sal}$):

$$d_{i,t}^{di} = \sum_{k \in K} r_{k,i,t}^i + \sum_{l \in L} s_{l,i,t}^{sal,i} + \sum_{n \in N} a_{n,i,t}^{sal,i} + \sum_i int_{i,t}^{sal} \quad \forall t \in T, \forall j \in J \quad (2.39)$$

Balance de salida de los usuarios de tipo doméstico e industrial.

Las ecuaciones respecto al balance de salida de tipo doméstico e industrial se establece en el apartado anterior y son las ecuaciones respecto al reúso del agua, así como las ecuaciones de la planta de tratamiento de ambos usuarios.

e) Selección de dispositivos de almacenamiento.

Se pueden instalar dos diferentes dispositivos de almacenamiento para propósitos generales, para cada una de estas unidades se tiene que hacer uso de las restricciones de capacidad máxima tanto para la cantidad de agua que puede almacenarse como para el agua que puede alimentarse en un periodo de tiempo dado. S_l^{max} y A_n^{max} son las capacidades máximas para tanques y estanques artificiales de almacenamiento y son utilizados para uso tanto doméstico como industrial.

$$S_l^{max} \geq S_{l,t} \quad l \in L, t \in T \quad (2.39)$$

$$A_n^{max} \geq A_{n,t} \quad n \in N, t \in T \quad (2.40)$$

$$S_l^{max} \geq S_{l,t}^{in} \quad l \in L, t \in T \quad (2.41)$$

$$A_n^{max} \geq a_{n,t}^{in} \quad n \in N, t \in T \quad (2.42)$$

Después, un conjunto de ecuaciones será requerido para determinar si un dispositivo de almacenamiento va a ser instalado durante un periodo de tiempo t en una locación dada.

Tanques de almacenamiento para usuarios de tipo doméstico e industrial.

Para un tanque de almacenamiento para fines generales se requiere instalar como máximo un tanque de almacenamiento en la ubicación l ; sin embargo, el tanque se puede instalar en cualquier periodo de tiempo. Si el tanque de almacenamiento debe

instalarse en un tiempo y lugar determinados, entonces la variable binaria $z_{l,t}^s$ es igual a uno y el tanque de almacenamiento está instalado en la ubicación l en un periodo de tiempo t y esto se detona con la siguiente ecuación:

$$\sum_t z_{l,t}^s \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (2.43)$$

La capacidad de los tanques de almacenamiento debe encontrarse dentro de los límites máximos $\delta_l^{s,max}$ y las siguientes ecuaciones activan la capacidad de almacenamiento para el dispositivo de almacenamiento dado, si al menos una de las variables binarias es igual a uno, entonces el dispositivo se puede usar desde el momento t en adelante.

$$S_{l,t'} \leq \delta_l^{s,max} \sum_{t=1}^{t=t'} z_{l,t}^s \quad \forall l \in L, \forall t' \in T' \quad (2.44)$$

$$S_{l,t'}^{in} \leq \delta_l^{s,max} \sum_{t=1}^{t=t'} z_{l,t}^s \quad \forall l \in L, \forall t' \in T' \quad (2.45)$$

Las ecuaciones con respecto a las funciones económicas son usadas para agregar el costo de los dispositivos de almacenamiento en caso de que sean utilizados y determinan el valor presente neto a través del factor $K_{F,t}$, el cual es un factor utilizado para anualizar la inversión.

$$K_{F_l} = \sum_t K_{F_{l,t}} \cdot \sum_t VP_{l,t} \cdot z_{l,t}^s \quad \forall l \in L \quad (2.46)$$

$$Cost_l^s = K_{F_l} [A + B(S_l^{max})^\alpha] \quad \forall l \in L \quad (2.47)$$

A y B son constantes que se utilizan para tener en cuenta los costos fijos y variables del tanque y α es un exponente positivo que es menos que 1.0 para tener en cuenta las economías de escala.

Si todas las variables binarias son igual a cero, los tanques no son instalados, haciendo sus costos ($Cost_l^s$) y capacidad ($S_{l,t}'$) igual a cero.

Siguiendo la misma analogía anterior al tanque de almacenamiento para usuarios de tipo doméstico e industrial se hace para el estanque artificial para el mismo uso ($z_{n,t}^a$):

Estanque artificial para usuarios de tipo doméstico e industrial.

$$\sum_t z_{n,t}^a \leq 1 \quad \forall n \in N \quad (2.49)$$

$$A_{n,t'} \leq \delta_n^{a,max} \sum_{t=1}^{t=t'} z_{n,t}^a \quad \forall n \in N, \forall t' \in T' \quad (2.50)$$

$$a_{n,t'}^{in} \leq \delta_n^{a,max} \sum_{t=1}^{t=t'} z_{n,t}^a \quad \forall n \in N, \forall t' \in T' \quad (2.51)$$

$$K_{F_n} = \sum_t K_{F_{n,t}} \cdot \sum_t VP_{n,t} \cdot z_{n,t}^a \quad \forall n \in N \quad (2.52)$$

$$Cost_n^a = K_{F_n} [A + B(A_n^{max})^\alpha] \quad \forall n \in N \quad (2.53)$$

f) Funciones objetivos.

Ingreso total anual

Una función objetivo consiste en maximizar los ingresos de la red de agua macroscópica; esto es la diferencia de las ventas menos los costos de tratamiento, almacenamiento y de distribución:

$$TAR = \text{ventas} - \text{costos de tratamiento} - \text{costos de almacenamiento} - \text{costos de bombeo.}$$

Los términos de *ventas* se pueden expresar como la venta total de agua:

$$\begin{aligned} \text{ventas} = & \left(\sum_k \sum_j \sum_t f_{k,j,t}^d + \sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{sal,d} + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{sal,d} \right) DSC \\ & + \left(\sum_k \sum_i \sum_t r_{k,i,t}^i + \sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{sal,i} + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{sal,i} \right) ISC \\ & + \left(\sum_t WTR_{j=8,t} \right) DSCJ \\ & + \left(\sum_i \sum_t int_{i,t}^{sal} \right) ISCR \end{aligned} \quad (2.54)$$

Se toma en cuenta que el costo del agua no depende de la fuente sino del usuario final. Cada usuario tiene necesidades diferentes y utiliza el agua con diferente calidad, por lo que el costo de tratamiento dependerá del usuario final, y esto se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{costo de trat} = & \left(\sum_k \sum_j \sum_t f_{k,j,t}^d \text{CTND} + \sum_k \sum_i \sum_t r_{k,i,t}^i \text{CTNI} \right) \\
 & + \left(\sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{\text{sal},d} + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{\text{sal},d} \right) \text{CTAD} \\
 & + \left(\sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{\text{sal},i} + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{\text{sal},i} \right) \text{CTAI} \\
 & + \left(\sum_t \text{WTR}_{j=8,t} + \sum_i \sum_t \text{int}_{i,t}^{\text{sal}} \right) \text{CTPE} \quad (2.55)
 \end{aligned}$$

El costo de almacenamiento se necesita para instalar la infraestructura requerida del proceso, y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{costo de almacenamiento} = \left(\sum_l \text{Costo}_l^s + \sum_n \text{Costo}_n^a \right) \quad (2.56)$$

Y finalmente, los costos de distribución que incluyen los costos de tubería y bombeo que son requeridos para distribuir el agua en la ciudad desde las fuentes tanto naturales como de almacenamiento hasta los usuarios finales.

$$\begin{aligned}
 \text{Costo tb} = & \sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{\text{sal},d} \text{PCSTD} + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{\text{sal},d} \text{PCASD} + \sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{\text{sal},i} \text{PCSTI} \\
 & + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{\text{sal},i} \text{PCASI} + \sum_k \sum_j \sum_t f_{k,j,t}^d \text{PCND} + \sum_k \sum_i \sum_t r_{k,i,t}^i \text{PCNI} \quad (2.57)
 \end{aligned}$$

Se debe tomar en cuenta que es una práctica en los diseños preliminares, como el que se toma en cuenta en esta metodología, estimar el costo de la tubería y el bombeo utilizando como base solo el flujo para una distancia determinada. Si el diámetro de las tuberías, la distancia entre los puntos de almacenamiento para usuarios finales y la altura son fijos, solo el índice determina el tamaño de las bombas y la energía requerida. Por otro lado, después de esta etapa, se debe considerar el diseño detallado de la red de tuberías para determinar el costo exacto.

Demanda insatisfecha de agua.

Otra función objetivo es la minimización de la demanda de agua insatisfecha y es como sigue:

$$DI = \sum_j \sum_t DINDS_{j,t} \quad (2.58)$$

Función objetivo. La función objetivo consiste en maximizar los ingresos de la red de agua macroscópica (TAR) y minimizar la demanda insatisfecha del agua (DI):

$$O.F. = Max\{TAR\}; Min\{DI\} \quad (2.59)$$

3.3 CASO DE ESTUDIO. Acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial.

Para aprobar la aplicabilidad de la metodología considerada se tomó un caso de estudio de la ciudad de Morelia, Michoacán México, la cual corresponde a la misma zona llamada “Sector 8 República Norte” (ver Figura 10). Actualmente, en la ciudad de Morelia la demanda del recurso hídrico ha aumentado exponencialmente, además que por las consecuencias del cambio climático ha producido una disminución significativa en el agua fresca disponible para el consumo humano; inclusive, debido a los problemas sociales, mucha gente ha optado por emigrar de las zonas rurales, aumentando drásticamente el aumento de población y consecuentemente la demanda de agua en la ciudad.

Por otra parte, la cantidad total de precipitación en Morelia es la misma utilizada en el capítulo anterior (ver Tabla 1), lo que importa para la recarga del acuífero de la ciudad. Las características del caso de estudio se muestran en el apartado anterior, como lo son el número de sinks, número de habitantes por cada sink, ubicación exacta de las fuentes naturales, características de los pozos de extracción, nivel dinámico de los pozos, la demanda anual de los usuarios domésticos e industriales, precipitación mensual en mm de agua. Las aguas residuales descargas al ambiente representan el 50 % de la demanda de los usuarios domésticos, por lo que es un total de 5,976,166 m³ anuales. Los costos unitarios del agua fresca son los establecidos en el apartado anterior, los costos de tubería y bombeo para los tanques de almacenamiento del agua pluvial para los usuarios domésticos e industriales se pueden ver en la Tabla 17 y Tabla 18 del apéndice B, respectivamente. Los costos unitarios del agua fresca son los establecidos en el apartado anterior. Los costos de tubería y bombeo para los estanques artificiales del agua pluvial para los usuarios domésticos e industriales se pueden ver en la Tabla 19 y Tabla 20 del Apéndice B, respectivamente. Para integrar la captación de agua pluvial, similar al apartado anterior, se generaron escenarios con distinto nivel dinámico para el caso de estudio abordado, solamente se presentan dos escenarios de forma detallada con 2 niveles dinámicos del pozo para el apartado de reúso de agua.

Este problema se codificó en el software GAMS, donde se utilizó el solver CPLEX para resolver el problema mixto entero lineal (MILP). El problema consiste de 104,499 ecuaciones y 295,033 variables, usando un valor absoluto y relativo de $1e-9$ con una computadora de procesador Intel™ Core™ i7-3612QM CPU @ 2.10 GHz 2.10 GHz con 4 GB de memoria RAM en aproximadamente 45.297 s de tiempo de CPU.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS.

4.1 Escenario D. Reúso de agua.

El problema fue resuelto para los 365 días del año, haciendo un análisis detallado del día a día y valorando la demanda insatisfecha. El escenario D del Capítulo 2 reúso de agua, es resuelto con una restricción del nivel dinámico del pozo menor o igual a 1 metro, esto quiere decir que al pozo de extracción no se le puede succionar más agua que no sobrepase de ese nivel dinámico. El valor límite de la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos se restringió a 1,110,000 m³. Se obtuvo la solución para la maximización de las ganancias con un Ingreso Total Anual (TAR de \$5,838,779 dólares/año); esta solución representa un consumo total de agua fresca de 14,401,400 m³ anuales. La representación esquemática de la solución de este escenario se reporta solo para el mes de AGOSTO para fines prácticos, el cual se observa en la Figura 13. Cabe señalar que para esta solución no es necesaria el agua de lluvia y por consiguiente no se instalan tanques ni estanques de almacenamiento, solamente el tratamiento y distribución del agua tratada que, para los usuarios domésticos se utiliza para el riego de áreas verdes y para los usuarios industriales se regenera hacia la misma industria para darle un nuevo uso. El total de agua regenerada de los usuarios domésticos que se utilizará en el riego de jardines es de 414,270 m³ anuales, para los usuarios industriales es de 1,536,626 m³ y el agua residual descargada al ambiente es igual a 5,561,900 m³ anuales. La variable demanda insatisfecha para los usuarios domésticos se restringió para que tengan agua al menos cada tercer día. Con el valor del nivel de succión de los pozos de 1 metro, los usuarios domésticos sufren una demanda insatisfecha de 1,110,000 m³ anuales y esta demanda insatisfecha se presenta cada 2 días y no se presenta en todos los sinks domésticos, sino que solo en algunos. En la Tabla 3 se presenta la demanda insatisfecha del mes de agosto para el sink 3 de los usuarios domésticos, el cual es el único sink en el cual se presenta una demanda insatisfecha cada dos días en todo el año, sin embargo, para los otros sinks la demanda varía y en algunos se presenta y en otros no.

Para el mes de Agosto el consumo total de agua fresca es de 841,267 m³ para usuarios domésticos y 284,872 m³ para industriales como se muestra la distribución de cada pozo de extracción en la tabla 13 y tabla 14 del apéndice A, el agua total

regenerada de los usuarios domésticos es de $37,915\text{m}^3$, para los usuarios industriales es de $18,817\text{m}^3$ y el agua descargada al ambiente de ambos usuarios es de $516,226\text{m}^3$.

Tabla 3. Demanda insatisfecha para el mes de agosto para el sink 1. Escenario D.

Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.
213	-	220	-	227	5468.324	234	-	241	-
214	-	221	5468.324	228	-	235	-	242	5180.517
215	5468.324	222	-	229	-	236	5468.324	243	-
216	-	223	-	230	5468.324	237	-		
217	-	224	5468.324	231	-	238	-		
218	5468.324	225	-	232	-	239	5468.324		
219	-	226	-	233	5468.324	240	-		

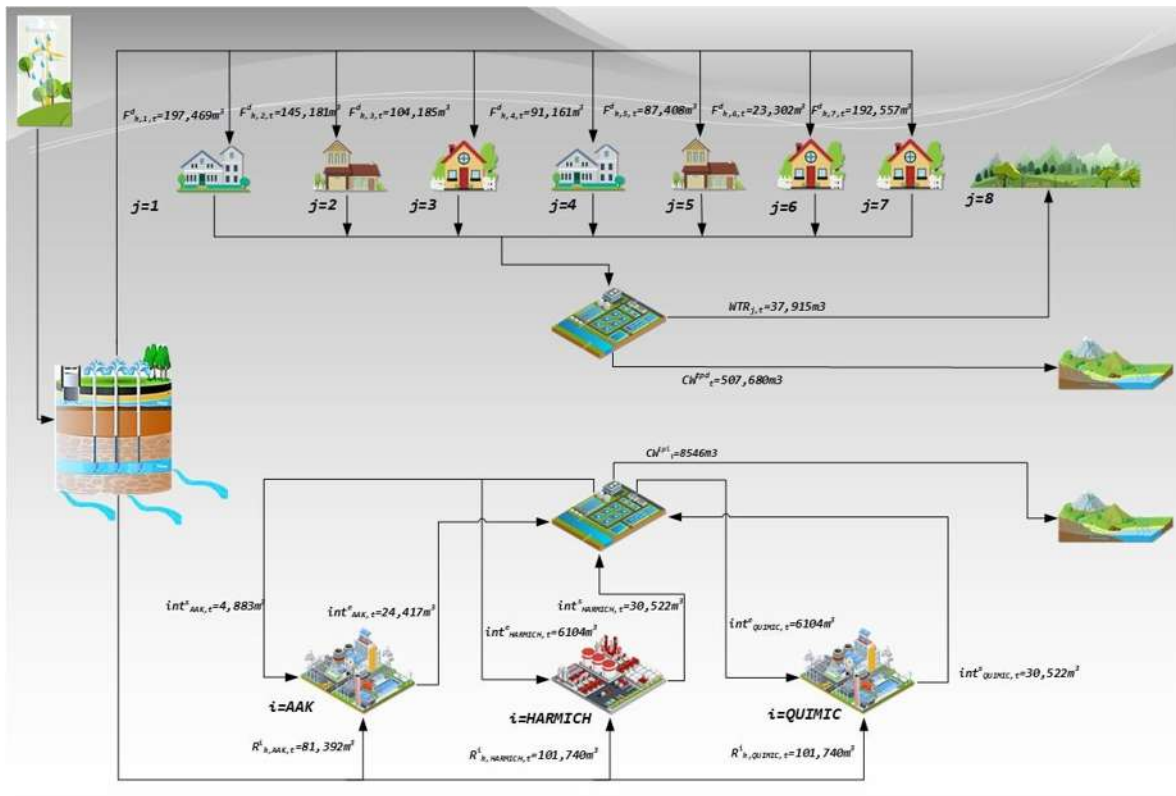


Figura 12. Ejemplo de distribución para el mes de Agosto del escenario D. Reúso de agua.

4.2 Escenario K. Reúso de agua.

El escenario K es resuelto con una restricción del nivel dinámico del pozo menor o igual a 2 metros del capítulo 2 reúso de agua. El valor límite de la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos se restringió a 1,110,000 m³. Se obtuvo la solución para la maximización de las ganancias con un Ingreso Total Anual (TAR de \$6,191,682 dólares/año); esta solución representa un consumo total de agua fresca de 14,041,000m³ anuales. La representación esquemática de la solución de este escenario se observa en la Figura 13. El total de agua regenerada para ambos usuarios y el agua descargada al ambiente es similar al capítulo anterior. La variable demanda insatisfecha para los usuarios domésticos se restringió para que tengan agua al menos cada tercer día. En la Tabla 4 se presenta la demanda insatisfecha del mes de agosto para el sink 3 de los usuarios domésticos. La demanda insatisfecha para este escenario se presenta para el sink 3 cada dos días, sin embargo, la variable no presenta demanda para los sinks 1,2,4 y 7, en el sink 5 comienza en el día 89 y disminuye gradualmente hasta el día 365 y el sink 6 se presenta hasta el día 149. Por lo que se satisfacen la mayoría de los sinks, restringiendo la demanda insatisfecha y generando ganancias por la venta de agua.

Para el mes de Agosto el consumo total de agua fresca es de 837,124m³ para usuarios domésticos y 284,872m³ para industriales como se muestra la distribución de cada pozo de extracción en la Tabla 15 y Tabla 16 del apéndice A, el agua total regenerada de los usuarios domésticos es de 37,915m³, para los usuarios industriales es de 17,091m³ y el agua descargada al ambiente de ambos usuarios es de 516,626m³.

Tabla 4. Demanda insatisfecha para el mes de agosto para el sink 3. Escenario K.

Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.
213	-	220	-	227	5468.324	234	-	241	-
214	-	221	5468.324	228	-	235	-	242	5180.517
215	5468.324	222	-	229	-	236	5468.324	243	-
216	-	223	-	230	5468.324	237	-		
217	-	224	5468.324	231	-	238	-		
218	5468.324	225	-	232	-	239	5468.324		
219	-	226	-	233	5468.324	240	-		

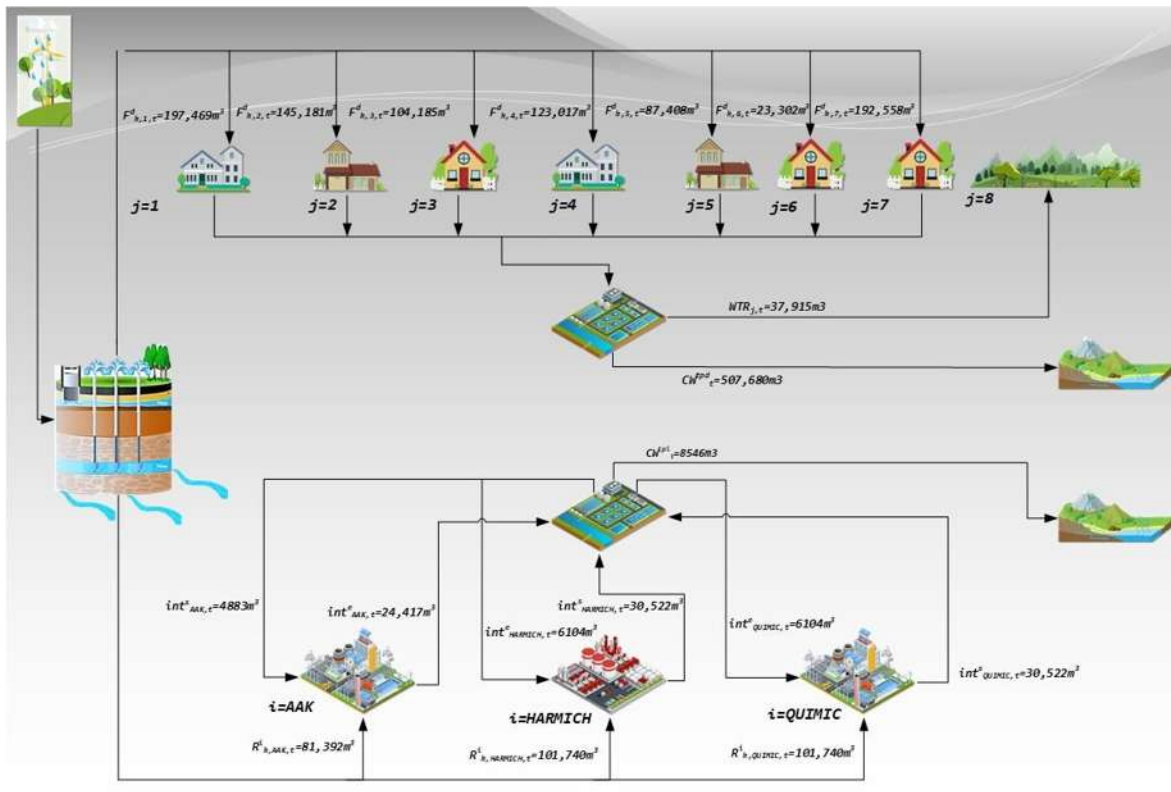


Figura 13. Ejemplo de distribución para el mes de agosto del escenario K.

4.3 CURVA PARETO. Reúso de agua.

Los escenarios A y G con un nivel dinámico de 1 metro del Capítulo 2 reúso de agua, son las soluciones óptimas de los extremos para el sistema integrado; utilizando el método de restricción de demanda insatisfecha se obtiene la curva Pareto que se muestra en la Figura 14. Se observa en la Figura 14 que varias soluciones (por ejemplo los escenarios B, C, D, E y F) compensan estos dos puntos extremos. En este caso, los TAR de los escenarios B, C, D, E y F son de 6,105,252.8 dólares/año, 6,004,952.8 dólares/año, 5,838,779.014 dólares/año, 5,553,343.787 dólares/año y 5,189,343.787 dólares/año, respectivamente (ver Tabla 13); mientras que los consumos totales de agua fresca son de 13,012,000 m³/año, 13,012,000 m³/año, 13,512,000 m³/año, 14,012,000 m³/año, 14,512,000 m³/año, y 15,012,000 m³/año, para los escenarios B, C, D, E y F respectivamente. Y la demanda insatisfecha para los escenarios B, C, D, E y F, es de 2,111,500 m³/año, 1,611,500 m³/año, 1,111,500 m³/año, 611,500 m³/año y 111,500 m³/año, respectivamente (ver Tabla 5). Como se puede observar la tendencia de la demanda insatisfecha es proporcional al agua fresca consumida, al disminuir la demanda insatisfecha, aumenta el consumo de agua fresca y al mismo tiempo el TAR disminuye. Comparando el escenario B del escenario F, el consumo de agua fresca aumenta 2,000,000 m³/año con un TAR de 5,188,993 dólares/año, pero la demanda insatisfecha disminuye 2,000,000 m³/año. Por lo que, el escenario más agradable es el escenario D, ya en la curva Pareto el punto se encuentra exactamente a la mitad de las soluciones que compensan los dos puntos extremos. Se hace lo similar pero con un nivel dinámico de 2 metros, como se puede observar en la figura 15 el comportamiento de las soluciones óptimas.

Tabla 5. Comparación de flujos para diferentes escenarios de la curva Pareto del caso de estudio.

Flujo (m ³ /año)	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E	Escenario F	Escenario G
Agua fresca	12,512,000	13,012,000	13,512,000	14,012,000	14,512,000	15,012,000	15,154,000
Agua requerida	17,074,370	17,074,370	17,074,370	17,074,370	17,074,370	17,074,370	17,074,370
Agua recirculada	1,950,870	1,950,870	1,950,870	1,950,870	1,950,870	1,950,870	1,950,870
Demanda insatisfecha	2,611,500	2,111,500	1,611,500	1,111,500	611,500	111,500	0
Nivel dinámico	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1	≤1
Agua de entrada a los tratamientos	7,512,800	7,512,801	7,512,802	7,512,803	7,512,803	7,512,803	7,512,803
Agua tratada descargada al ambiente	5,561,900	5,561,901	5,561,902	5,561,903	5,561,903	5,561,903	5,561,903
Ventas totales anuales (US\$/Año)	6,205,258	6,105,252	6,005,252	5,838,779	5,538,993	5,188,993	5,110,943

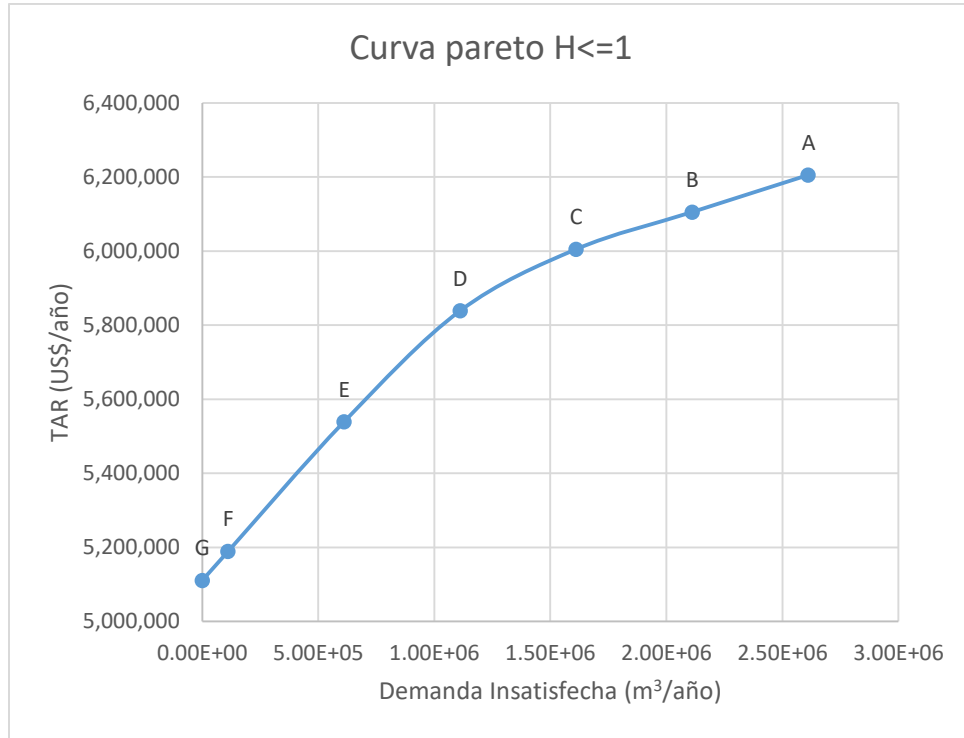


Figura 14. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio del capítulo 2 reúso de agua. $H \leq 1$.

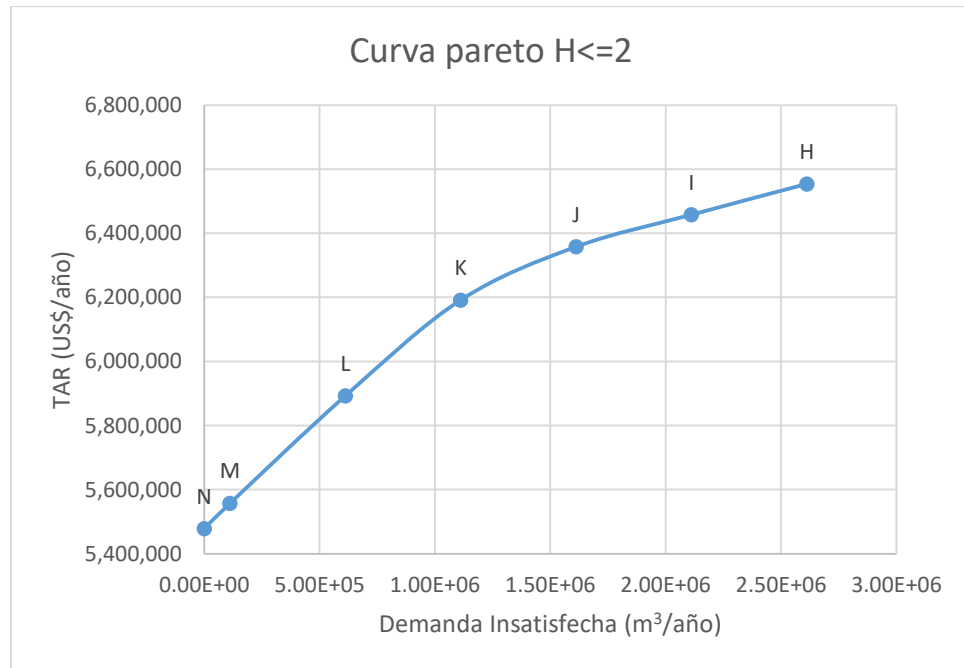


Figura 15. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio del capítulo 2 reúso de agua. $H \leq 2$.

4.4 Escenario D. Acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial.

El problema fue resuelto para los 365 días del año, haciendo un análisis detallado del día a día. El escenario D del Capítulo 3 acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial, es resuelto con una restricción del nivel dinámico del pozo menor o igual a 1 metro, esto quiere decir que al pozo de extracción no se le puede succionar más agua que no sobrepase de ese nivel dinámico. A diferencia del escenario D del Capítulo 2, en este escenario se cuenta con fuentes alternas de agua, por lo que lo hace diferente del análisis anterior. El valor límite de la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos se restringió a 1,110,000 m³. Se obtuvo la solución para la maximización de las ganancias con un Ingreso Total Anual (TAR de \$6,775,283 dólares/año); esta solución representa un consumo total de agua fresca de 13,126,000 m³ anuales. La representación esquemática de la solución de este escenario se reporta solo para el mes de AGOSTO para fines prácticos, el cual se observa en la Figura 16. Cabe señalar que en esta solución es necesaria el agua de lluvia y por consiguiente se instalan tanques y estanques de almacenamiento, el tratamiento y distribución del agua tratada también es considerada que, para los usuarios domésticos se utiliza para el riego de áreas verdes y para los usuarios industriales se regenera hacia la misma industria para darle un nuevo uso. Se utilizan un total de 20 tanques de almacenamiento y 6 estanques artificiales, las capacidades máximas de los dispositivos de almacenamiento se pueden observar en la Tabla 21 y Tabla 22 del apéndice B. La distribución del agua almacenada de los tanques y estanques se puede observar en la Tabla 23 y Tabla 24 del apéndice B. Los costos para los tanques y estanques de almacenamiento, incluyendo el tratamiento del agua se presentan en la Tabla 25 y Tabla 26 del apéndice B. El total de agua regenerada de los usuarios domésticos que se utilizará en el riego de jardines es de 414,270 m³ anuales, para los usuarios industriales es de 1,536,600 m³ y el agua residual descargada al ambiente es igual a 5,561,900m³ anuales. La variable demanda insatisfecha para los usuarios domésticos se restringió para que tengan agua al menos cada tercer día. Con el valor del nivel de succión de los pozos de 2 metros. En la Tabla 7 se presenta la demanda insatisfecha del mes de agosto para el sink 3 de los usuarios domésticos.

Para el mes de Agosto el consumo total de agua fresca es de 817,009 m³ para usuarios domésticos y 205,872 m³ para industriales como se muestra la distribución de cada pozo de extracción en la Tabla 27 y Tabla 28 del apéndice B, el agua total regenerada de los usuarios domésticos es de 37,915m³, para los usuarios industriales es de 17,899m³ y el agua descargada al ambiente de ambos usuarios es de 516,629m³.

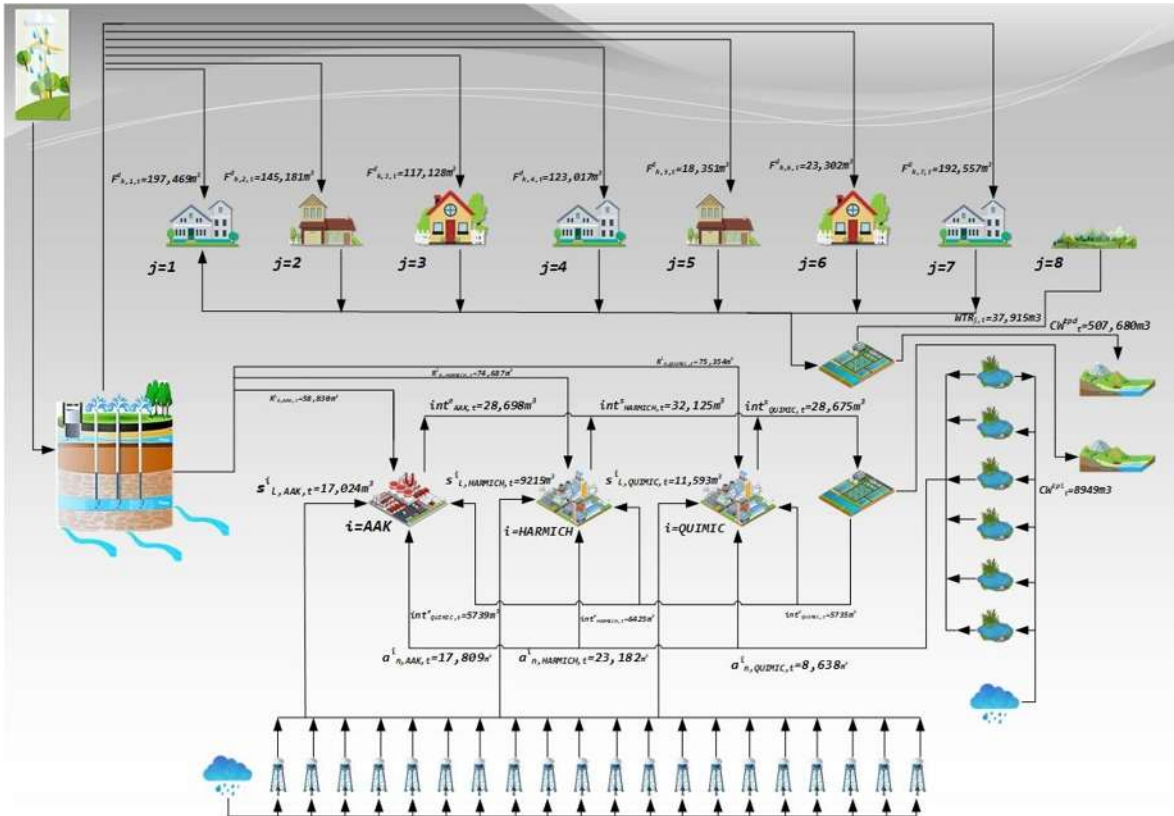


Figura 16. Ejemplo de distribución para el mes de agosto del escenario D captación de agua.

Tabla 6. Demanda insatisfecha para el mes de agosto para el sink 3. Escenario D.

Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.
213	-	220	-	227	5468.324	234	-	241	-
214	-	221	5468.324	228	-	235	-	242	5180.517
215	5468.324	222	-	229	-	236	5468.324	243	-
216	-	223	-	230	5468.324	237	-		
217	-	224	5468.324	231	-	238	-		
218	5468.324	225	-	232	-	239	5468.324		
219	-	226	-	233	5468.324	240	-		

4.5 Escenario K. Acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial.

El escenario K es resuelto con una restricción del nivel dinámico del pozo menor o igual a 2 metros del capítulo 3 acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial. Se obtuvo la solución para la maximización de las ganancias con un Ingreso Total Anual de \$7,128,187 dólares/año; esta solución representa un consumo total de agua fresca de 13,126,000 m³ anuales. La representación esquemática de la solución de este escenario se observa en la Figura 17. Se utilizan un total de 20 tanques de almacenamiento y 6 estanques artificiales, las capacidades máximas de los dispositivos de almacenamiento se pueden observar en la Tabla 29 y Tabla 30 del apéndice B. La distribución del agua almacenada de los tanques y estanques se puede observar en la Tabla 31 y Tabla 32 del apéndice B. Los costos para los tanques y estanques de almacenamiento, incluyendo el tratamiento del agua se presentan en la Tabla 33 y Tabla 34 del apéndice B. El total de agua regenerada y descargada para los usuarios domésticos es similar al escenario anterior. La variable demanda insatisfecha para los usuarios domésticos se restringió para que tengan agua al menos cada tercer día. La demanda insatisfecha tiene el mismo comportamiento que el apartado anterior (ver Tabla 7).

Para el mes de Agosto el consumo total de agua fresca es de 873,124m³ para usuarios domésticos y 193,141 m³ para industriales como se muestra la distribución de cada pozo de extracción en la Tabla 35 y Tabla 36 del apéndice B, el agua total regenerada de los usuarios domésticos es de 37,915m³, para los usuarios industriales es de 16450m³ y el agua descargada al ambiente de ambos usuarios es de 515,901m³.

Tabla 7. Demanda insatisfecha para el mes de agosto para el sink 3. Escenario K.

Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.	Días	Dem. Ins.
213	-	220	-	227	5468.324	234	-	241	-
214	-	221	5468.324	228	-	235	-	242	5180.517
215	5468.324	222	-	229	-	236	5468.324	243	-
216	-	223	-	230	5468.324	237	-		
217	-	224	5468.324	231	-	238	-		
218	5468.324	225	-	232	-	239	5468.324		
219	-	226	-	233	5468.324	240	-		

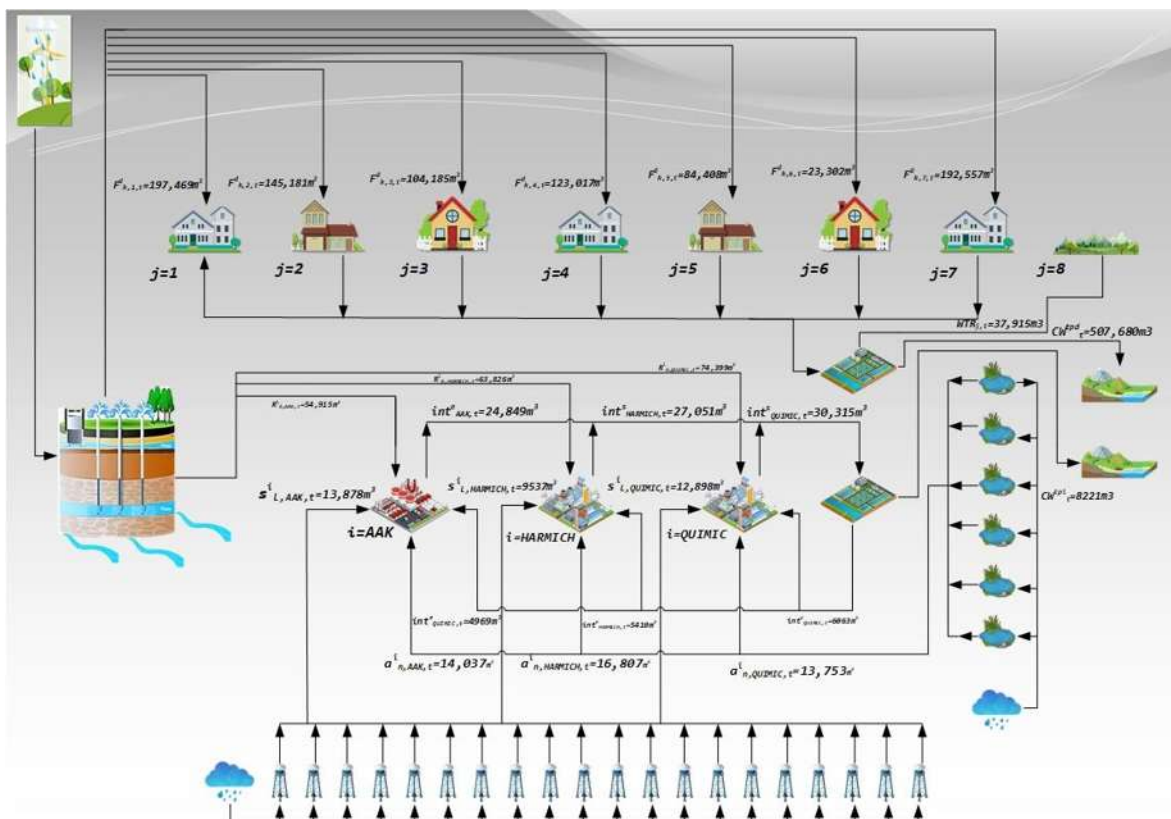


Figura 17. Ejemplo de distribución para el mes de agosto del escenario K captación de agua.

4.6 CURVA PARETO. Implementación simultánea del reúso de agua y captación de agua pluvial.

Los escenarios H y N con un nivel dinámico de 2 metros, son las soluciones óptimas de los extremos para el sistema integrado; utilizando el método de restricción de demanda insatisfecha se obtiene la curva Pareto que se muestra en la Figura 18. Se observa en la Figura 18 que varias soluciones (por ejemplo los escenarios I, J, K, L y M) compensan estos dos puntos extremos. En este caso, los TAR de los escenarios I, J, K, L y M son de 7,368,048 dólares/año, 7,294,361 dólares/año, 7,128,187 dólares/año, 6,829,069 dólares/año y 6,493,675 dólares/año, respectivamente (ver Tabla 8); mientras que los consumos totales de agua fresca son de 12,126,000 m³/año, 12,626,000 m³/año, 13,126,000 m³/año, 13,626,000 m³/año, y 14,125,000 m³/año, para los escenarios I, J, K, L y M, respectivamente. Y la demanda insatisfecha para los escenarios I, J, K, L y M, es de 2,111,500 m³/año, 1,611,500 m³/año, 1,111,500 m³/año, 611,500 m³/año y 111,500 m³/año, respectivamente. Como se puede observar la tendencia de la demanda insatisfecha es proporcional al agua fresca consumida, al disminuir la demanda insatisfecha, aumenta el consumo de agua fresca y al mismo tiempo el TAR disminuye. Comparando el escenario I del escenario M, el consumo de agua fresca aumenta 2,000,000 m³/año con un TAR de 6,493,675 dólares/año, pero la demanda insatisfecha disminuye 2,000,000 m³/año. Por lo que, el escenario más agradable es el escenario K, ya en la curva Pareto el punto se encuentra exactamente a la mitad de las soluciones que compensan los dos puntos extremos. Se hace lo similar pero con un nivel dinámico de 1 metro, como se puede observar en la Figura 19 el comportamiento de las soluciones óptimas.

Tabla 8. Comparación de flujos para diferentes escenarios de la curva Pareto del caso de estudio.

Flujo (m ³ /año)	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E	Escenario F	Escenario G
Agua fresca	11,626,000	12,126,000	12,626,000	13,126,000	13,626,000	14,125,000	14,238,000
Agua requerida	17,074,370	17,074,370	17,074,370	17,074,370	17,074,370	17,074,370	17,074,370
Agua recirculada	1,950,870	1,950,870	1,950,870	1,950,870	1,950,870	1,950,870	1,950,870
Demanda insatisfecha	2,611,500	2,111,500	1,611,500	1,111,500	611,500	112,500	0
Nivel dinámico	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2
Agua captada	105,560	105,561	105,562	105,563	105,564	105,565	105,566
Agua de entrada a los tratamientos	1,055,600	1,055,601	1,055,602	1,055,603	1,055,604	1,055,605	1,055,606
Agua tratada descargada al ambiente	5,561,900	5,561,901	5,561,902	5,561,903	5,561,904	5,561,905	5,561,906
Ventas totales anuales (US\$/Año)	7,418,201	7,368,048	7,294,361	7,128,187	6,829,069	6,493,675	6,415,275

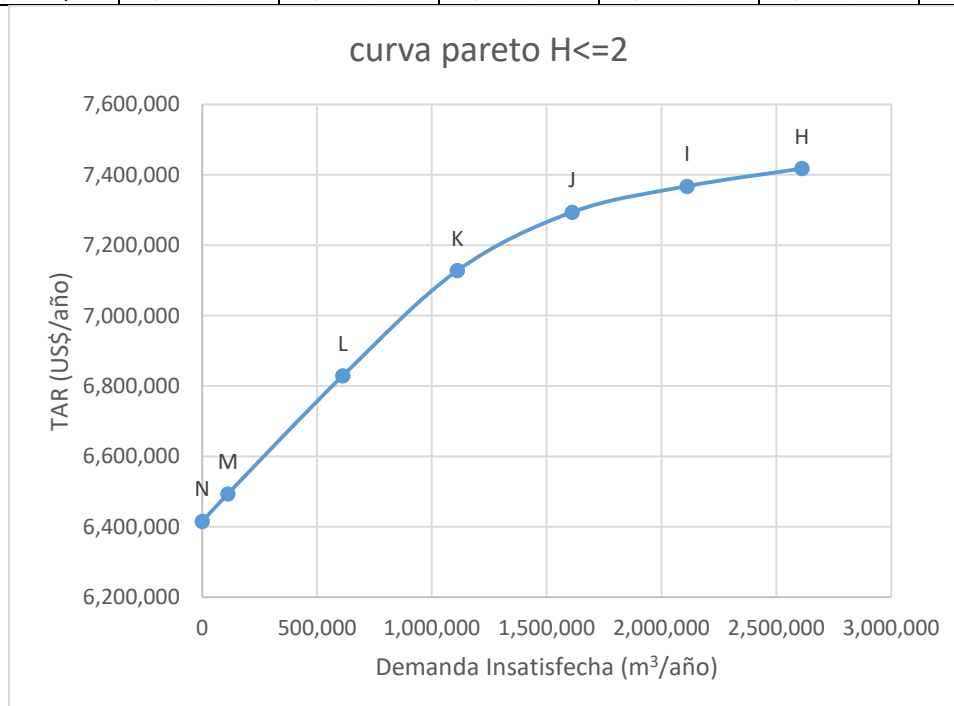


Figura 18. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio. H≤2.

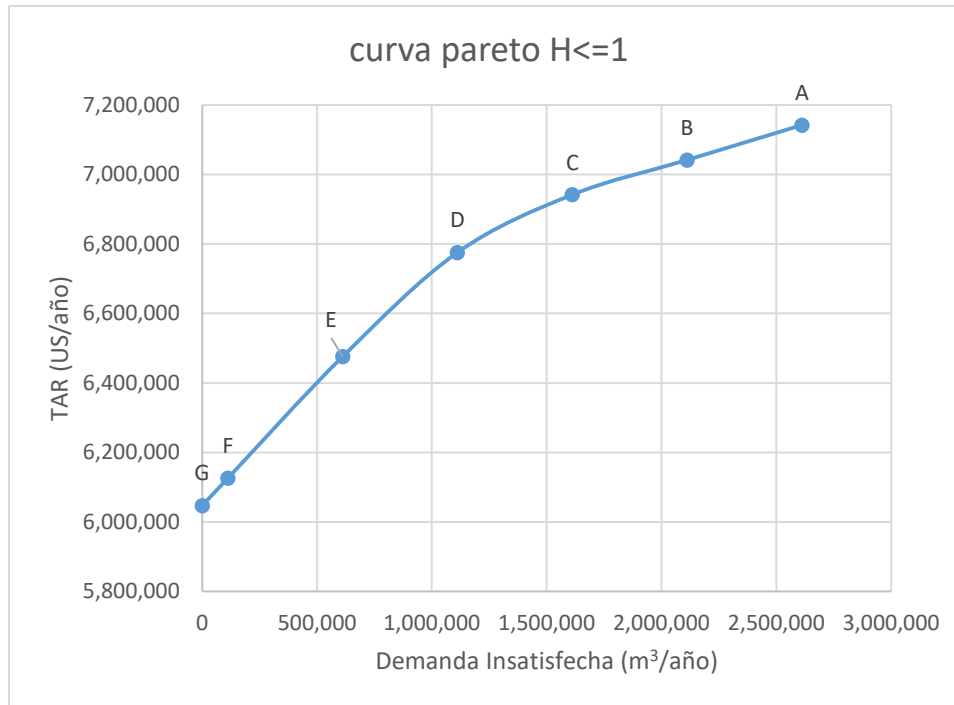


Figura 19. Curva Pareto con las soluciones óptimas para el caso de estudio. $H \leq 1$.

4.7 Comparación de escenarios.

Al comparar los escenarios analizados en ambos apartados, incluyendo el apartado de REÚSO DE AGUA Y ACOMPLAMIENTO SIMULTÁNEO DEL REÚSO DE AGUA Y CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL se observa notoriamente en base a los resultados obtenidos que la alternativa de tomar en cuenta fuentes alternas de agua como es la reutilización y captación de agua pluvial nos proporciona mayores ganancias sobre la venta de agua y se mejora significativamente el problema social de la demanda insatisfecha de agua, generando ganancias mayores y el impacto al acuífero sería moderado. Se puede observar que, a pesar de considerar como una alternativa de solución la captación y reúso del agua, los dos escenarios analizamos con anterioridad, la mejor opción es el escenario D y K, catalogado desde un punto de vista empresarial porque se tiene ingresos muy considerables, el nivel dinámico del pozo es prudente y la demanda insatisfecha disminuye significativamente. A diferencia del escenario N, se elimina completamente la demanda insatisfecha, pero disminuye casi 1,000,000 de dólares con respecto al escenario N por lo que al empresario no le convendría esta situación.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este proyecto realizado se presentan dos formulaciones de optimización para la síntesis de redes de agua para una zona de la ciudad de Morelia, lo que implica al mismo tiempo la recolección de agua pluvial, reutilización de aguas residuales, así como el almacenamiento y distribución de ambas. En la formulación se presentan dos superestructuras: el reúso de aguas residuales y la implementación simultánea del reúso de agua y recolección de agua pluvial. Ambas opciones consideran segregación, reciclado, tratamiento, almacenamiento y recirculación de aguas residuales. Los modelos propuestos son problemas de programación mixta entera lineal, que fueron formulados para tomar en cuenta dos funciones objetivo; la primera consiste en la maximización de venta de agua para satisfacer el lado de las ganancias, y la segunda la minimización de la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos para atacar el problema social.

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 minimizar la demanda insatisfecha de los usuarios, reduciendo el consumo de agua fresca, implementando la captación de agua pluvia y el reúso del agua residual, con un mínimo costo total debido a la reducción en el consumo de agua fresca y generando ganancias significativas.

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

5.2 BIBLIOGRAFIA

1. CONAGUA. Comisión Nacional del agua: 2017
<http://www.gob.mx/conagua/articulos/cuidemos-el-agua-en-familia?idiom=es.pdf>
2. Fetter, 1994.
<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/marquezronald/wp-content/uploads/ANTECEDENTES3.pdf>
3. ONU. (Organización de Naciones Unidas 2017).
https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf
4. CONAGUA. Comisión Nacional del agua: 2015
http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/carrera_agua_2015.pdf
5. Zhuping Sheng., An aquifer storage and recovery system with reclaimed wastewater to preserve native groundwater resources in El paso, Texas 2004, 3, (1), 1-11.
6. Appan, A. 2000. A dual-mode system for harnessing roof water for non-potable uses. 317-321.
7. 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 Res.* 45 (10), 3245-3254.
8. Li, Z., Boyle, F., Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination.* 260: 1-8.
9. Nápoles-Rivera, F., Serna-Gonzales, M., El-Halwagi, M.M., Ponce-Ortega, J.M., 2013. Sustainable water management for macroscopic system. *J. Clean prod.* 47, 102-117.
10. García-Montoya, M., Bocanegra-Martínez, A., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M.M., 2015. Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers and Chemical Engineering.* 76, 104-116.

11. Nápoles-Rivera, F., Rojas-Torres, M.G., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M., 2015. Optimal design of macroscopic water networks under parametric uncertainty. *Journal of Cleaner Production*. 88, 172-184.
12. Bocanegra-Martinez, A., Ponce-Ortega, J.M., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., Castro-Montoya, A.J., El-Halwagi, M.M., 2014. Optimal design of rainwater collecting systems for domestic use into a residential development. *Resources, Conservation and Recycling*. 84, 44-56.
13. Rojas-Torres, M.G., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M., 2014. Optimal design of sustainable water systems for cities involving future projections. *Computers and Chemical Engineering*. 69, 1-15.
14. Pérez-Uresti, S.I., Ponce-Ortega, J.M., Jiménez-Gutiérrez, A., 2019. A multi-objective optimization approach from sustainable water management for places with over-exploited water sources. *Computers and Chemical Engineering*. 121, 158-173.
15. Huang, C.H., Chang, C.T., Ling, H.C., Chang, C.C., 1999. A mathematical programming model for water usage and treatment network design. *Industrial Engineering Chemistry Research*. 38, (7), 266-2679.
16. Dvarioniene, J., Stasiskiene, Z., 2007. Integrated water resource management model for process industry in Lithuania. *Journal of Cleaner Production*. 15, 950-957.
17. Xu, M., Li, C., Wang, X., Cai, Y., Yue, W., 2018. Optimal water utilization and allocation in industrial sectors based on water footprint accounting in Dalian City, China. *Journal of Cleaner Production*. 176, 1283-1291.
18. Hul, S., Tan, R.R., Auresenia, J., Fuchino, T., Foo, C. Y. D., 2007. Water networks synthesis using mutation-enhanced particle swarm optimization. *Process Safety and Environmental Protection*. 85, (6), 507-514.
19. Luo, Y., Uan, X., 2008. Global optimization for synthesis of integrated water systems with particle swarm optimization algorithm. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 16, (1) 11-15.

20. Takama, N., Kuriyama, T., Shoroko, K., Umeda, T., 1980. Optimal water allocation in a petroleum refinery. *Computers and Chemical Engineering*. 4, (4), 102-117.
21. Quesada, I., Grossmann, I., 1995. Global optimization of bilinear process networks whit multicomponent flows. *Computers and Chemical Engineering*. 19, (12), 1219-1242.
22. Lee, S., Grossmann, I., 2003. Global optimization of nonlinear generalized disjunctive programming with bilinear equality constraints: Applications to process networks. *Computers and Chemical Engineering*. 27, (11) ,1557-1575.
23. Karuppiah, R., Grossmann, I., 2006. Global optimization for the synthesis if integrated water system in chemical processes. *Computers and Chemical Engineering*. 20, (4), 650-673.
24. Alva-Argaez, A., Kokossis, A.C., Simth, R., 1998. Wastewater minimization of industrial systems using an integrated approach. *Computers and Chemical Engineering*. 22, (Suppl), S741-S744.
25. Gabriel, F., El-Halwagi, M.M., 2005. Simultaneous synthesis of waste interception and material reuse networks: Problem reformulation for global optimization. *Environmental progress*. 24, (2), 171-180.
26. Nápoles-Rivera, F., Jiménez-Gutiérrez, A., Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M.M., 2010. Recycle and reuse mass exchange networks based on properties using a global optimization technique. 20th European Symposium on Computer Aided Process. ESCAPE20. 28, 871-876.
27. Dakwala, M., Mohanty, B. Bhargava, T., 2009. A process integration approach to industrial water conservation: a case study for an Indian starch industry. *Journal of Cleaner Production*. 17, 1654-1662.
28. Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M.M., Jiménez-Gutiérrez, A.J., 2010. Global optimization for the synthesis of property-based recycle and reuse networks including environmental constraints. *Computers and Chemical Engineering*. 34, 318-330.

29. Hansen, E., Sequeira-Rodrigues, M.A., Escobar-Aragao, M., Montero-de-Aquim, P., 2018. Water and wastewater minimization in a petrochemical industry through mathematical programming. *Journal of Cleaner Production*. 172, 1814-1822.
30. Deng, C., Jiang, W., Zhou, W., Feng, X., 2018. New superstructure-based optimization of property-based industrial water system. *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.312.
31. Environmental Protection Agency, EPA. (2008). Indoor water use in the United States. *Water Sense*. *Obtenido de* :
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-03/documents/ws-factsheet-indoor-water-use-in-the-us.pdf>
32. Paulo, P., Azevedo, C., Begosso, L., Galbiati, A., Boncz, M. (2013). Natural systems treating greywater and backwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. *Ecological Engineering*. 50: 95-100.
33. 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.
34. 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.
35. Hong, K., Guen, K. (1999). Treatment of domestic wastewater using microfiltration for reuse wastewater. *Desalination*. 126: 7-14.
36. TEBBUTT T.H.Y. (1977) Principles of water quality control. 2a . Ed., Oxford.
37. JORDÃO E, PESSOA C (1975) Tratamento de esgotos domésticos. Concepções clássicas de tratamento de esgotos, 1, BNH/ABES/CETESB, 544 p.
38. Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering: Treatment and reuse. 4th ed. USA. McGraw-Hill International. Editions, China.
39. 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.
40. Sostar-Turk, S., Petrinic, I., Simonic, M. (2005). Laundry wastewater treatment using coagulation and membrane filtration. *Resources, Conservation and Recycling*. 44(2): 185–196.
41. Liberti, L., Notarnicola, M. (1999). Advanced treatment and disinfection for municipal wastewater reuse in agriculture. *Water Science and Technology*. 40: 235-245.
42. 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.
43. NOM-011-CONAGUA-2015. Norma Oficial Mexicana. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/94218/NOM-011-CONAGUA-2015.pdf>
44. Sistema Meteorológico Nacional (2015) <http://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Diarios/16081.txt>
45. Periódico oficial del gobierno del estado (2016) * http://transparencia.oopas.gob.mx/documentos/l.%20Normatividad/Normatividad_2016/Acuerdo%20para%20el%20cobro%20de%20servicios%202016.pdf.

5.3 APÉNDICE A.

Tabla 9. Demanda anual en m3 de usuarios domésticos.

Mes \ Sink	1	2	3	4	5	6	7	8
Enero	177758.5	130690	142752	110738.4	119764.7	31928.5	173337.1	31928.51
Febrero	165573.4	121731.5	132966.6	132966.6	111555	29739.9	161455.1	29739.86
Marzo	188868.4	138858.2	151674	117659.6	127249.9	33924	184170.7	33924.04
Abril	188151.6	138331.2	151098.4	117213.1	126767	33795.3	183471.8	33795.3
Mayo	199978.3	147026.3	160596	124580.8	134735.2	35919.6	195004.3	35919.58
Junio	204278.9	150188.2	164049.7	127259.9	137632.8	36692	199197.9	36692.04
Julio	222198.1	163362.6	178440	138423.1	149705.8	39910.6	216671.4	39910.64
Agosto	211088.2	155194.4	169518	131501.9	142220.5	37915.1	205837.8	37915.11
Septiembre	193527.4	142283.5	155415.5	120562	130388.9	34760.9	188713.8	34760.88
Octubre	194423.3	142942.2	156135	121120.2	130992.6	34921.8	189587.5	34921.81
Noviembre	182775.8	134378.9	146781.3	113864.1	123145.1	32829.7	178229.7	32829.72
Diciembre	177758.5	130690	142752	110738.4	119764.7	31928.5	173337.1	31928.51

Tabla 10. Demanda anual en m3 de usuarios industriales.

Mes \ Industria	AAK	HARMICH	QUIMIC
Enero	217513.244	108756.622	108756.622
Febrero	217513.244	108756.622	108756.622
Marzo	217513.244	108756.622	108756.622
Abril	217513.244	108756.622	108756.622
Mayo	217513.244	108756.622	108756.622
Junio	217513.244	108756.622	108756.622
Julio	217513.244	108756.622	108756.622
Agosto	217513.244	108756.622	108756.622
Septiembre	217513.244	108756.622	108756.622
Octubre	217513.244	108756.622	108756.622
Noviembre	217513.244	108756.622	108756.622
Diciembre	217513.244	108756.622	108756.622

Tabla 11. Costo de tubería y bombeo de las fuentes naturales a los usuarios domésticos en US\$.

Pozo	1	2	3	4	5	6	7	Pozo	1	2	3	4	5	6	7
16	1	1	1	1	2	2	2	88	2	2	2	2	1.5	1.5	1
23	1	1.5	1.5	1.5	2	2	2	90	1.5	1.5	1	1.5	1	2	2
24	1	1	1	1	1.5	2	2	93	2	2	2	2	1.5	1	1.5
25	2	2	2	2	1	2	1	100	2	2	2	2	1	1.5	1
26	2	1.5	1.5	1	2	2	1	102	2	2	2	2	1	2	1.5
27	2	2	2	1	2	2	1	103	2	2	2	2	2	2	1
42	1.5	1.5	1	1	1	2	1.5	108	2	2	2	2	1	2	1
44	1	1	1	1	2	2	2	110	2	2	2	2	1	1	2
47	2	2	2	2	1	1.5	1	114	2	2	2	2	1.5	2	1
53	2	2	2	1.5	2	2	2	125	2	2	2	2	1	1.5	2
65	2	2	2	2	1	1.5	1.5	135	2	2	2	2	1	1	2
70	2	2	2	2	1	1.5	1	138	2	2	2	2	1.5	2	1
72	2	2	2	2	1	1.5	2	149	2	2	2	2	1	2	1.5
76	2	2	2	2	1	1.5	1.5	166	2	2	2	2	1.5	1	1

Tabla 12. Costo de tubería y bombeo de las fuentes naturales a los usuarios industriales en US\$.

Pozo	AAK	HARMICH	QUIMIC	Pozo	AAK	HARMICH	QUIMIC
16	1	1	1	88	2	2	2
23	1	1	1	90	1.5	1.5	1.5
24	1	1	1	93	2	2	2
25	2	2	2	100	2	2	2
26	1.5	1.5	1.5	102	2	2	2
27	1.5	1.5	1.5	103	2	2	2
42	1.5	1.5	1.5	108	2	2	2
44	1	1	1	110	2	2	2
47	2	2	2	114	2	2	2
53	2	2	2	125	2	2	2
65	2	2	2	135	2	2	2
70	2	2	2	138	2	2	2
72	2	2	2	149	2	2	2
76	2	2	2	166	2	2	2

Tabla 13. Distribución de los pozos de extracción a los usuarios domésticos en m3 escenario D.

POZO	1	2	3	4	5	6	7
P16	177041.696	125156.8	10936.647	4241.997			
P23							
P24	6809.296	5006.272	5468.324				
P25							
P26							
P27							
P42			27341.617	6321.098			
P44							
P47				6321.098	4587.759		26559.72
P53				53066.86			
P65							
P70					4587.759		
P72				4241.997	9175.518		
P76							
P88				4241.997			39839.58
P90			54971.041				
P93							
P100			5468.324	4241.997	22938.795		19919.79
P102	13618.592				9175.518		
P103							
P108					27526.554		59759.37
P110		5006.272		4241.997	9416.979	23302.664	
P114				4241.997			33199.65
P125							
P135							
P138		10012.554					13279.86
P149							
P166							

Tabla 14. Distribución de los pozos de extracción para los usuarios industriales en m3 escenario D.

POZO	AAK	HARMICH	QUIMIC	POZO	AAK	HARMICH	QUIMIC
P16	2806.624	7016.56	10524.84	P88	2806.624	7016.56	7016.56
P23	42099.36	7016.56	14033.12	P90			
P24	14033.12	17541.4	7016.56	P93			
P25				P100	8419.872	10524.84	3508.28
P26				P102		14033.12	14033.12
P27				P103			
P42				P108		3508.28	17541.4
P44				P110		14033.12	7016.56
P47		7016.56		P114	8419.872	3508.28	10524.84
P53				P125			
P65				P135			
P70				P138	2806.624	7016.56	3508.28
P72		3508.28	7016.56	P149			
P76				P166			

Tabla 15. Distribución de los pozos de extracción para los usuarios industriales en m3 escenario K.

POZO	SINK	AAK	HARMICH	QUIMIC	POZO	SINK	AAK	HARMICH	QUIMIC
P16		30872.864	42099.36	49115.92	P88				
P23		42099.36	18486.655	10524.84	P90				
P24		8419.872	41154.105	42099.36	P93				
P25					P100				
P26					P102				
P27					P103				
P42					P108				
P44					P110				
P47					P114				
P53					P125				
P65					P135				
P70					P138				
P72					P149				
P76					P166				

Tabla 16. Distribución de los pozos de extracción a los usuarios domésticos en m3 escenario k.

POZO	1	2	3	4	5	6	7
P16	197469.58	145181.89					
P23							
P24							
P25							
P26							
P27							
P42			54683.235	55145.961			
P44							
P47							
P53				67871.952			
P65					46119.051		
P70							
P72							
P76							
P88							
P90			49502.718				
P93						18346.02	
P100							
P102							
P103							192558
P108							
P110							
P114							
P125					41289.831		
P135						4956.644	
P138							
P149							
P166							

5.4 APÉNDICE B

Tabla 17. Costo de tubería y bombeo de tanque de almacenamiento a sink doméstico en US\$.

Tanque Sink	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	2	2	2	2	2	2	2
2	1	2	2	2	2	2	2	2
3	1	2	2	2	2	2	2	2
4	1	2	2	2	2	2	2	2
5	1	2	2	2	2	2	2	2
6	1	2	2	2	2	2	2	2
7	2	1	2	2	4	4	4	4
8	2	1	2	2	4	4	4	4
9	2	1	2	2	4	4	4	4
10	2	1	2	2	4	4	4	4
11	2	2	1	4	2	2	2	2
12	2	2	1	4	2	2	2	2
13	2	2	1	4	2	2	2	2
14	2	2	1	4	2	2	2	2
15	2	2	4	1	2	2	2	2
16	2	2	4	1	2	2	2	2
17	2	2	4	1	2	2	2	2
18	2	4	2	2	1	1	1	1
19	2	4	2	2	1	1	1	1
20	2	4	2	2	1	1	1	1

Tabla 18. Costo de tubería y bombeo del estanque artificial a los usuarios domésticos en US\$.

Estanque Sink	1	2	3	4	5	6	7	8
1	2.3	2.3	1	4.6	2.3	2.3	2.3	2.3
2	2.3	2.3	1	4.6	2.3	2.3	2.3	2.3
3	2.3	1	2.3	2.3	4.6	2.3	2.3	2.3
4	2.3	1	2.3	2.3	4.6	2.3	2.3	2.3
5	2.3	4.6	2.3	2.3	1	2.3	2.3	2.3
6	2.3	2.3	4.6	1	2.3	2.3	2.3	2.3

Tabla 19. Costo de tubería y bombeo del tanque de almacenamiento al sink industrial en US\$.

Tanque Sink	AAK	HARMICH	QUIMIC
1	2.5	2.5	2.5
2	2.5	2.5	2.5
3	2.5	2.5	2.5
4	2.5	2.5	2.5
5	2.5	2.5	2.5
6	2.5	2.5	2.5
7	1	2.5	2.5
8	1	2.5	2.5
9	1	2.5	2.5
10	1	2.5	2.5
11	2.5	1	5
12	2.5	1	5
13	2.5	1	5
14	2.5	1	5
15	2.5	5	1
16	2.5	5	1
17	2.5	5	1
18	5	2.5	2.5
19	5	2.5	2.5
20	5	2.5	2.5

Tabla 20. Costo de tubería y bombeo del estanque artificial a los usuarios industriales en US\$.

Estanque Sink	AAK	HARMICH	QUIMIC
1	2.5	1	5
2	2.5	1	5
3	1	2.5	2.5
4	1	2.5	2.5
5	8	2.5	2.5
6	2.5	5	1

Tabla 21. Capacidad máxima de tanques de almacenamiento en m3.

Tanque	Cap. Max. (m3)	Tanque	Cap. Max. (m3)
1	1477.84	11	1477.84
2	630.72	12	1987.44
3	2140.32	13	2497.04
4	2395.12	14	2242.24
5	1576.76	15	1834.56
6	1783.6	16	1274
7	1681.68	17	1885.52
8	3159.52	18	3414.32
9	1274	19	1274
10	1324.96	20	1477.84

Tabla 22. Capacidad máxima de los estanques artificiales en m3

Estanque artificial	Cap. Max. (m3)
1	12522
2	12283
3	8334
4	13000
5	8051
6	13559

Tabla 23. Distribución de los estanques artificiales a los usuarios industriales en m3.

Estanque artificial	AAK	HARMICH	QUIMIC
1		8211	
2		8382	
3	7446		
4	10363		
5		6589	
6			8638

Tabla 24. Distribución de tanques de almacenamiento a los usuarios industriales en m3. Escenario D en m3.

Tanque Sink	AAK	HARMICH	QUIMIC	Tanque Sink	AAK	HARMICH	QUIMIC
1	187.82	556.8	818.96	11	477.9	235.5	774.5
2	696.28	51.2	882.52	12	984.2	15.2	984.8
3	1200	300	640	13	2497		
4	394.2	856.2	1142.4	14	2242		
5	579.5	425.2	675.3	15	1800.58	15.6	2.4
6	681.9	325.2	675.5	16	275.9	153.6	842.9
7	1681			17	884.25	750.5	249.5
8		3159		18	415.85	1725.25	1225.75
9	1274			19	274.56	145.6	855.4
10			1324	20	477.856	500.565	499.565

Tabla 25. Costo de almacenamiento de estanques artificiales en US\$.

Tanque	Costo de almacenamiento	Tanque	Costo de almacenamiento
1	15759.915	11	15758.915
2	16037.148	12	16684.024
3	16961.256	13	17608.132
4	17423.311	14	17146.078
5	15944.737	15	16406.791
6	16314.38	16	15390.272
7	16129.559	17	16499.202
8	18809.474	18	19271.528
9	15390.272	19	15390.272
10	15482.682	20	15759.915

Tabla 26. Costo de almacenamiento para tanques en US\$.

Estanque artificial	Costo de almacenamiento
1	123110
2	121140
3	119140
4	123530
5	121120
6	124030

Tabla 27. Distribución de los pozos de extracción para los usuarios industriales escenario D en m3. Reúso y captación de agua.

POZO	SINK	AAK	HARMICH	QUIMIC	POZO	SINK	AAK	HARMICH	QUIMIC
P16		24741.168	36989.8	33672.312	P88				
P23			2059.675	1496.48	P90				
P24					P93		14033.12	10524.84	7016.56
P25		14763.168	21605.125	30362.624	P100				
P26					P102				
P27					P103				
P42					P108				
P44					P110				
P47					P114		2292.608	3508.28	2806.624
P53					P125				
P65					P135				
P70					P138				
P72					P149				

Tabla 28. Distribución de los pozos de extracción a los usuarios domésticos escenario D en m3. Reúso y captación de agua pluvial.

POZO	1	2	3	4	5	6	7
P16	81711.552	92926.885	38278.264	29693.979			
P23	13618.592						
P24							
P25	54474.368	20025.088	16404.971				39839.58
P26				4241.997			
P27				38177.973			
P42							
P44							
P47							
P53				50903.964			
P65							
P70							
P72							
P76					4587.759		
P88							
P90			38566.071				
P93	34046.48	30037.632	18410.392			18410.392	
P100					13763.277		92959.02
P102							
P103							6639.93
P108							
P110							
P114							46479.51
P125							
P135							
P138							
P149							
P166	13618.592	2192.283	5468.354			4892.272	6639.93

Tabla 29. Capacidad máxima de los tanques de almacenamiento en m3.

Tanque	Cap. Max. (m3)	Tanque	Cap. Max. (m3)
1	1477.84	11	1477.84
2	630.72	12	1987.44
3	2140.32	13	2497.04
4	2395.12	14	2242.24
5	1576.76	15	1834.56
6	1783.6	16	1274
7	1681.68	17	1885.52
8	3159.52	18	3414.32
9	1274	19	1274
10	1324.96	20	1477.84

Tabla 30. Capacidad máxima de los estanques artificiales en m3.

Estanque artificial	Cap. Max. (m3)
1	12522.32
2	12283.04
3	8334.68
4	13000
5	8051.68
6	13559.2

Tabla 31. Distribución de los estanques artificiales a los usuarios industriales en m3. Escenario K.

Estanque artificial	AAK	HARMICH	QUIMIC
1		5416.36	
2		7983.36	
3	7426.16		
4	6611.28		
5		3407.84	4858.72
6			8894.4

Tabla 32. Distribución de los tanques de almacenamiento a los usuarios industriales en m3. Escenario K.

Tanque Sink	AAK	HARMICH	QUIMIC	Tanque Sink	AAK	HARMICH	QUIMIC
1	468.5	200.5	799.3	11	1477.84		
2		630		12		1987.44	
3	2140			13			2497.04
4	396.25	1000.25	999.75	14	2242.04		
5	579.258	210.23	790.2	15	500.55	834.56	499.45
6	783.6	500	500	16	1274		
7	684.25	123.58	885.3	17	885.52	400	600
8	159.52	1500	1500	18	414.32	1900	600
9	274.25	251.23	749.25	19	1274		
10	324.6		1000	20			1477.84

Tabla 33. Costo de almacenamiento de tanques en US\$.

Tanque	Costo de almacenamiento	Tanque	Costo de almacenamiento
1	15759.915	11	15758.915
2	16037.148	12	16684.024
3	16961.256	13	17608.132
4	17423.311	14	17146.078
5	15944.737	15	16406.791
6	16314.38	16	15390.272
7	16129.559	17	16499.202
8	18809.474	18	19271.528
9	15390.272	19	15390.272
10	15482.682	20	15759.915

Tabla 34. Costo de almacenamiento de estanques artificiales en US\$.

Estanque artificial	Costo de almacenamiento
1	123110
2	121140
3	119140
4	123530
5	121120
6	124030

Tabla 35. Distribución de los pozos de extracción para los usuarios industriales escenario K en m3. Reúso y captación de agua.

POZO	AAK	HARMICH	QUIMIC	POZO	AAK	HARMICH	QUIMIC
P16	40883.104	44270.48	52976.08	P88			
P23	14032.272	19556.4	21423.52	P90			
P24				P93			
P25				P100			
P26				P102			
P27				P103			
P42				P108			
P44				P110			
P47				P114			
P53				P125			
P65				P135			
P70				P138			
P72				P149			
P76				P166			

Tabla 36. Distribución de los pozos de extracción a los usuarios domésticos escenario K en m3. Reúso y captación de agua pluvial.

POZO	1	2	3	4	5	6	7
P16	163423.104	145181.888					
P23	34046.48						
P24							
P25					45877.58		172638.18
P26				10686.746			
P27				74153.194			
P42			5468.324				
P44							
P47							
P53				38177.973			
P65							
P70							
P72							
P76							
P88							
P90			98717.629				
P93						3669.204	
P100							
P102							
P103							19919.79
P108							
P110					41531.292	19633.46	
P114							
P125							
P135							
P138							
P149							
P166							