



Universidad Autónoma del estado de Baja California

Facultad de Ciencias



Maestría en Manejo de Ecosistemas de Zonas Áridas



Modelo de simulación de reuso de aguas grises en nuevos desarrollos habitacionales
en Ensenada, Baja California, México

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS

Presenta

Miriam Julieta Salamanca Sánchez

Ensenada B. C. 2010.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS

MAESTRIA EN MANEJO DE ECOSISTEMAS DE ZONAS ÁRIDAS

“MODELO DE SIMULACIÓN DE REUSO DE AGUAS GRISES EN NUEVOS
DESARROLLOS HABITACIONALES EN ENSENADA B.C. MÉXICO”

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS

Presenta

MIRIAM JULIETA SALAMANCA SÁNCHEZ

Aprobado por

Dr. Leopoldo Guillermo Mendoza Espinosa

M. C. Bernardino Ricardo Eaton

Dr. Luis Walter Daesslé Heuser

RESUMEN

En México el reciclaje de aguas grises no es practicado y no se encuentra legislado, a pesar de que el agua debe ser considerada como un bien económico finito que debe ser valuado y manejado de manera racional. Debido a lo anterior el objetivo de este estudio fue estimar el ahorro de agua potable al reusar agua gris en nuevos desarrollos habitacionales en la ciudad de Ensenada, Baja California. Para el análisis en el suministro de agua dentro de un nuevo fraccionamiento se desarrolló un modelo programado en el software Stella. Dicho modelo permitió la creación de ocho escenarios diferentes controlados por interruptores y así se estimó un porcentaje mínimo de ahorro del 0.3% y un porcentaje máximo del 30.5%. Para cada escenario se realizaron simulaciones para 40, 60, 80 y 100 casas con un consumo de agua de 150 L/hab y 207 L/hab, donde el mínimo ahorro mensual estimado fue de 3.11 m³ y 105.35 pesos, y el máximo fue de 756.88m³ y 25,139.05 pesos. En éste estudio se mostró que a pesar de que el tiempo de recuperar la inversión puede tardar de 18 a 30 años, el ahorro de agua generado es constante desde el primer mes, al reusar 5m³/casa/mes. Mientras un sistema convencional tiene un costo aproximado de 1.5 millones de pesos para un complejo de 40 casas y uno no convencional 2.7 millones de pesos, en un sistema convencional el ahorro de agua no se encuentra contemplado, y por lo tanto no existe tampoco un ahorro monetario por lo que la inversión del sistema hidráulico no se recupera. Si bien aparentemente puede ser costoso el sistema hidráulico, la disponibilidad y manejo adecuado del recurso puede atenuar la escasez actual. Cuando se implementan los sistemas no convencionales de reuso de aguas grises en WC, los ahorros de agua aumentan 97 veces en comparación a que si sólo se reusara para riego de jardines.

Índice

Introducción	6
Marco Teórico.....	7
Antecedentes.....	8
Reuso en la agricultura	8
Reuso urbano.....	9
Otras visiones del reuso de aguas grises	9
El reuso de aguas grises en México.	10
Objetivos.....	10
Objetivo General.....	10
Objetivos Particulares	11
Área de estudio.....	11
Metodología	13
Resultados y Discusión.....	17
Desarrollo del modelo	17
Simulaciones	21
Los escenarios y el abastecimiento de agua.	27
El manejo del agua.....	30
Conclusión.....	32
Bibliografía.....	33
Anexos.....	¡Error! Marcador no definido.

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa del área de estudio.....	12
Figura 2. Mapa conceptual.....	14
Figura 3. Esquema del sistema hidráulico dentro de la casa (sistema no convencional)	14
Figura 4. Función gráfica para el cálculo de la tarifa del agua en Stella a partir de los datos CESPE de octubre del 2009.....	16
Figura 5. . Ejemplo de componentes del modelo (extracto).....	20
Figura 6. Gráficas de los escenarios de simulación de ahorro de agua mensual que no consideran el reuso de agua gris, solo el reuso de agua negra.	22
Figura 7. Gráficas de los escenarios de simulación de ahorro de agua mensual considerando el reuso de agua gris y agua negra.....	22

Figura 8. Gráfica de ahorro de agua a 25 años en los ocho escenarios de simulación considerando un consumo de 207 L / hab.	23
Figura 9. Gráfica de ahorro de agua a 25 años en los ocho escenarios de simulación considerando un consumo de 150 L / hab.	24
Figura 10. Gráficas del tiempo de recuperación de la inversión monetaria en escenarios de reuso de agua negra.....	24
Figura 11. Gráficas del tiempo de recuperación de la inversión monetaria en escenarios de reuso de agua negra y reuso de agua gris.....	25
Figura. 12. Gráficas de ahorro monetario mensual en los ocho escenarios de simulación.....	26
Figura 13. Modelo de simulación.	37
Figura 14 Submodelo de simulación con el cual se estimó la cantidad de agua que se puede reusar en m ³	40
Figura 15 Submodelo de simulación con el cual se estimó el ahorro monetario al reusar agua	41
Figura 16. Submodelo de simulación con el cual se estimó el costo de construcción hidráulica	42
Figura 17 Submodelo de simulación con el cual se estimó el tiempo en el que el ahorro monetario que se genera mes tras mes se equipara con la inversión	43
Figura 18. Submodelo con el cual se estimó el porcentaje de reuso de agua	45

Índice de Tablas

Tabla 1. Variables que definen el sistema convencional y el sistema no convencional en el modelo de simulación.....	15
Tabla 2. Tarifa del costo (en pesos) de agua potable proporcionada por la CESPE para octubre del 2009	15
Tabla 3. Tipo de tubo y precio (CEA Querétaro, 2010).	17
Tabla 4. Lista de indicadores y variables del modelo base para la obtención de cantidades de agua gris, agua negra y agua potable que se utilizan en un nuevo fraccionamiento.	18
Tabla 5. Escenarios de simulación y porcentajes de reuso.	21
Tabla 6. Costos de inversión (pesos) del sistema hidráulico en pesos para diferente número de casas en cada escenario de simulación propuesto.	25
Tabla 7. Ejemplos de consumos y usos de agua en el mundo.....	28
Tabla 8. Consumo de agua para diferentes usos en el mundo.	30
Tabla 9. Fórmulas aplicadas al modelo de simulación.	38
Tabla 10. Fórmula aplicada al submodelo de simulación con el cual se estimó la cantidad de agua que se puede reusar en m ³	41
Tabla 11. Fórmulas aplicadas al submodelo de simulación con el cual se estimó el ahorro monetario al reusar agua.....	41
Tabla 12. Fórmulas aplicadas en el submodelo de simulación con el cual se estimó el costo de construcción hidráulica	43
Tabla 13. Fórmulas aplicadas al submodelo de simulación con el cual se estimó el tiempo en el que el ahorro monetario que se genera mes tras mes se equipara con la inversión.	43

Tabla 14. Fórmula aplicada al submodelo de simulación con el cual se estimó el porcentaje de reuso de agua	45
--	----

Introducción

El agua es considerada como un bien económico finito que debe ser valorado y manejado de manera racional. El suministro de agua como necesidad básica presenta un precio muy bajo, sin embargo debido al crecimiento poblacional y a la creciente escasez del recurso, el costo para seguir brindando este servicio ha ido en aumento. El concepto de obtener beneficio de aguas negras tratadas municipales e industriales aunado al aumento de presiones sobre el agua ha incitado la aparición del reuso como un componente integral en el manejo del agua. En este sentido es necesario que se promueva su uso eficiente para obtener un beneficio social, político, ambiental y económico.

En las zonas áridas del país la escasez de agua superficial limita el aprovechamiento de este recurso, principalmente el crecimiento poblacional y económico del estado de Baja California implicará que en el futuro se requieran grandes volúmenes de abastecimiento de agua potable por nuevas fuentes, particularmente en la zona costa comprendida en los municipios de Tijuana, Tecate, Playas de Rosarito y Ensenada (Mendoza-Espinosa y Ramirez-Acosta, 2005). Por lo anterior es necesario desarrollar nuevas formas de abastecimiento de agua potable que contribuyan a un ahorro sustancial del recurso. Para mejorar el abastecimiento y almacenamiento de agua en la zona, existen diferentes alternativas: la construcción de plantas desaladoras, recarga de acuíferos y el reuso de aguas.

El reuso de aguas residuales es una alternativa últimamente muy estudiada para áreas urbanas y rurales con poca precipitación en donde además de analizar los aspectos técnicos y biofísicos del reciclaje del agua para un uso efectivo y una implementación exitosa, la economía y aceptación social también deben de tomarse en consideración para una mayor efectividad (Jiménez y Asano, 2008).

El presente estudio consiste en la construcción de un modelo como herramienta para la planeación sustentable del agua en los nuevos desarrollos habitacionales en la ciudad de Ensenada, el cual mostrará en sus diferentes escenarios de aplicación, el reuso de aguas grises que podría significar un ahorro del 37% o más en el consumo de agua con su correspondiente ahorro monetario en el suministro y tratamiento de agua (Mendoza-Espinosa et al, 2006).

Un modelo es una representación simplificada de un sistema del mundo real, y consiste en una serie de ecuaciones simultáneas o de operaciones lógicas contenidas dentro de un programa de cómputo. Los modelos tienen parámetros los cuales son medidas numéricas de una propiedad o característica que son constantes bajo condiciones específicas. Un modelo cíclico es aquel en donde los parámetros, entradas y salidas son espacialmente promediadas y toman un valor simple de todo el conjunto (Wheater et al, 2008). Para este modelo se considerarán variables derivadas de los aspectos económicos y ambientales.

El modelo busca estimar el ahorro financiero anual al reusar agua gris en nuevos desarrollos habitacionales en Ensenada, así como definir y explicar los componentes del sistema habitacional convencional (sin reuso de agua gris) y los componentes del sistema habitacional no convencional (con reuso de agua gris).

El estudio facilitará la toma de decisiones a los funcionarios, empresarios, inversionistas y público en general al incorporar sistemas de reuso de agua gris en nuevos fraccionamientos habitacionales, con la alternativa de un uso inmediato o a futuro así como incorporar éstos sistemas en la política ambiental como parte del desarrollo sustentable. La realización de este estudio ayudará a mejorar el sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Ensenada ya que, de llevarse a cabo, ejercerá menor presión sobre las fuentes actuales de agua potable de la ciudad, permitiendo la recuperación de los acuíferos, así como ahorro económico para todos los usuarios. El estudio se enfoca a los nuevos desarrollos habitacionales de la ciudad de Ensenada y podrá ajustarse a otras localidades, particularmente las que se encuentren en zonas áridas.

Marco Teórico

Para este estudio se considera el ahorro como la parte del ingreso no gastada y el reuso es el uso de la misma agua más de una vez, para así de esta manera definir el modelo de simulación.

La simulación son los ensayos de alternativas que se realizan a partir de la construcción de un modelo. Un modelo es una simplificación de la realidad que surge del análisis de todas las variables que intervienen en un sistema (conjunto de elementos que interactúan entre si) así como las interacciones que existen entre ellas

(Bertalanffy, 1993). A medida que se conoce más el sistema y se alimenta el modelo, este se acercará más a la realidad aún siendo una abstracción de la misma.

Dentro del análisis de sistemas existen varios tipos de modelos, los modelos dinámicos que funcionan para representar los sistemas a través del tiempo, los modelos estáticos donde el tiempo no varía, los modelos matemáticos que son los que representan la realidad de la forma más abstracta, los modelos físicos que representan la realidad a escala, por ejemplo, en una maqueta, los modelos determinísticos que muestran una sola condición en el sistema y determina una respuesta que no varía, los modelos estocásticos donde los hechos de los sistemas son al azar, entre otros (Grant et al, 2001). En el presente trabajo se desarrolló un modelo dinámico construido desde el punto de vista estocástico ya que representará los diferentes escenarios de optimización del uso de agua grises a lo largo del tiempo en la ciudad de Ensenada.

Las aguas grises se definen como todas aquellas aguas usadas que se originan de regaderas, máquinas de lavado, lavabos y lavaderos. Las aguas que se originan de los excusados se conocen como aguas negras. Las aguas grises poseen propiedades significativas en favor del reuso en diferentes aplicaciones más que las aguas negras (Jamrah et al, 2008). Dependiendo de las costumbres de la población, las aguas grises comprenden del 50 al 80% del total del consumo residencial de agua potable, la cual puede ser reusada, especialmente para riego de jardines (Jamrah et al, 2008) y para las descargas de las tazas de excusados. El reuso de agua gris en la caja del baño se debe a que es menos contaminada que las aguas residuales convencionales y no implica riesgos a la salud además de que en muchos países el agua que actualmente es utilizada en la caja del baño posee la calidad de agua potable.

Antecedentes

El reuso y reciclado de aguas grises ha sido practicado en diferentes países debido a los beneficios obvios en términos de ahorro y manejo de agua potable.

Reuso en la agricultura

En la ciudad de Los Ángeles, Sheikh (1993) efectuó un estudio en el cual el reuso de aguas grises en riego tuvo un ahorro del 12 al 65% de agua potable además de un ahorro del 50% total de agua en el uso individual por casa.

De acuerdo con Juanico y Salgot en 2008 en la mayoría de los países mediterráneos del norte, del 70-80% de la demanda de agua esta destinada a la agricultura y al riego de jardines, por lo tanto el riego con aguas residuales (sobre todo agua negras) se ha vuelto una práctica común, aun sin tener el tratamiento adecuado. Sin embargo, solo en Chipre e Israel se ha desarrollado una política oficial que define las aguas tratadas como parte integral en el manejo del recurso agua.

Reuso urbano

En Alemania el reuso de aguas grises para la caja del baño ha sido aplicado exitosamente en cuestiones técnicas, también considerando los aspectos de salud con resultados satisfactorios (Nolde, 1999), al igual que en Copenhague, Dinamarca en 2007, donde se vio que que el reuso de agua gris para los escusados no implica riesgos a la salud debido a la baja concentración de estrogénicos que se generan por los productos de higiene personal (Andersen et al, 2007).

En Madhya Pradesh India, se realizó un análisis costo-beneficio de la implementación de sistemas de reuso y de tratamiento de agua gris en escuelas para uso en el wc y riego, en donde se estimaron beneficios internos de 706 USD al año, además de una reducción en el uso de agua potable (Godfrey et al, 2009). Por lo anterior, este estudio se encuentra enfocado a la implementación de sistemas no convencionales en nuevos desarrollos habitacionales, ya que si es planeado desde su construcción se puede evitar una inversión a futuro en cambios de un sistema convencional a uno no convencional.

Otras visiones del reuso de aguas grises

Alegre et al. (2004) desarrollaron un modelo de simulación para explorar el potencial en el ahorro de agua y así plantear opciones estratégicas en el manejo de agua en nuevos desarrollos, donde concluyeron que el modelo generado puede ser usado para investigar el ahorro de agua así como sus costos e implicaciones en el reciclaje de agua gris o agua de lluvia.

En 2008 se desarrolló un modelo de simulación en donde se evaluó como el flujo de los ríos, el drenaje, los escurrimientos y los eventos de inundación pueden ser influenciados cuando se implementan los sistemas de reuso de agua gris,

concluyendo que dichos sistemas disminuyen el flujo del drenaje y por lo tanto disminuye las inundaciones en eventos de tormentas (Bertrand et al, 2008).

El reuso de aguas grises en México.

En México el reciclaje de aguas grises no es practicado y no se encuentra legislado. En el 2008, fue realizado un análisis hidro-económico de suministro de agua para la región fronteriza del estado de Baja California, en donde concluyeron que de los seis métodos propuestos para un mejor abastecimiento, el reuso es el procedimiento más adecuado para contrarrestar el problema del agua (Medellín-Azuara et al, 2008). En 2009 Hernández-Flores y Mendoza-Espinosa llevaron un estudio de percepción social para la implementación de los sistemas de reuso en nuevos desarrollos habitacionales en la ciudad de Tijuana, Baja California México, en donde concluyeron que los futuros propietarios de dichas viviendas están de acuerdo en la instalación de los sistemas de reuso.

Mendoza-Espinosa et al. (2006), desarrollaron un modelo de simulación como herramienta para el manejo integral de aguas negras, aguas grises y agua potable en nuevos desarrollos habitacionales de ciudades con estrés hídrico, donde se obtuvieron estimaciones de ahorro de agua para el año 2030 de 220,000 m³ por mes en la ciudad de Ensenada si se reusa agua gris en la caja del baño. Es por eso que en este estudio retoma este trabajo del 2006 en donde se incorporaron los diferentes costos de construcción y tratamiento de agua para así determinar el valor del sistema no convencional.

Objetivos

Objetivo General

Estimar el ahorro anual al reusar agua gris en nuevos desarrollos habitacionales en Ensenada, Baja California, así como definir y explicar los componentes del sistema habitacional convencional (sin reuso de agua gris) y los componentes del sistema habitacional no convencional (con reuso de agua gris).

Objetivos Particulares

Definir y explicar los componentes del sistema habitacional convencional (sin reuso de agua gris) y los componentes del sistema habitacional no convencional (con reuso de agua gris).

Definir la estructura del modelo de simulación.

Analizar los resultados obtenidos de las simulaciones.

Pregunta de investigación

¿Existen escenarios de reuso de aguas grises que impliquen un ahorro económico sustancial y optimización del recurso?

Área de estudio

Ensenada es el municipio más extenso de México, con una superficie de 52,510 km² (Enciclopedia de los municipios de México, 2005) La ciudad de Ensenada, el área de estudio, concentra el 60% de la población del municipio, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) del conteo del 2005.

La ciudad de Ensenada es un asentamiento costero ubicado en la costa noroeste de la Península de Baja California, en la Bahía de Todos Santos, teniendo como límites fisiográficos los siguientes: al norte Punta San Miguel; al sur la Península de Punta Banda; al oriente las Islas Todos Santos Norte y Sur; y al poniente por una cadena de lomeríos.

La ciudad de Ensenada es una ciudad favorecida por su situación geográfica ya que se encuentra con un clima tipo seco templado con lluvias de invierno también conocido como mediterráneo, que de acuerdo con la clasificación de Köpen modificada por Enriqueta García en 1981, el clima es de tipo BSk, que corresponde a un clima seco templado, lo cual la hace atractiva por la presencia de especies de importancia comercial como la vid y la aceituna, además de su fauna como el borrego cimarrón. Es una ciudad costera, con lo cual se exhibe una alta actividad turística potencial. La precipitación anual es escasa, de 266.5 mm de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) por ubicarse en una zona semiárida.

El área de estudio se localiza en la Región Hidrológica RH1 Baja California Noroeste (Ensenada); cuenca C R. Tijuana-A. de Maneadero; subcuencas de Maneadero, San Telmo y Las Ánimas. Las principales corrientes superficiales drenan hacia la costa del Pacífico, sobre la Bahía de Todos Santos; están dispuestas de manera subparalela entre sí y perpendiculares a la costa.

Los principales arroyos (intermitentes) en la Bahía de Todos Santos que desembocan en la costa del Pacífico son: San Miguel, El Sauzal, Cuatro Milpas, Ensenada, El Gallo, San Carlos y Las Ánimas. Los principales cuerpos de agua de la zona son: presa Emilio López Zamora, Estero de punta Banda, La Lagunita de El Naranjo y Lagunita El Ciprés, en donde los cauces de las principales corrientes han sido gradualmente urbanizados con vivienda.

En cuanto a la hidrología subterránea el abastecimiento de la ciudad de Ensenada depende de los acuíferos Ensenada, Guadalupe, La Misión y Maneadero, todos con problemas de sobreexplotación y salinización en diferentes grados (Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Ensenada - PDUCP, 2009).

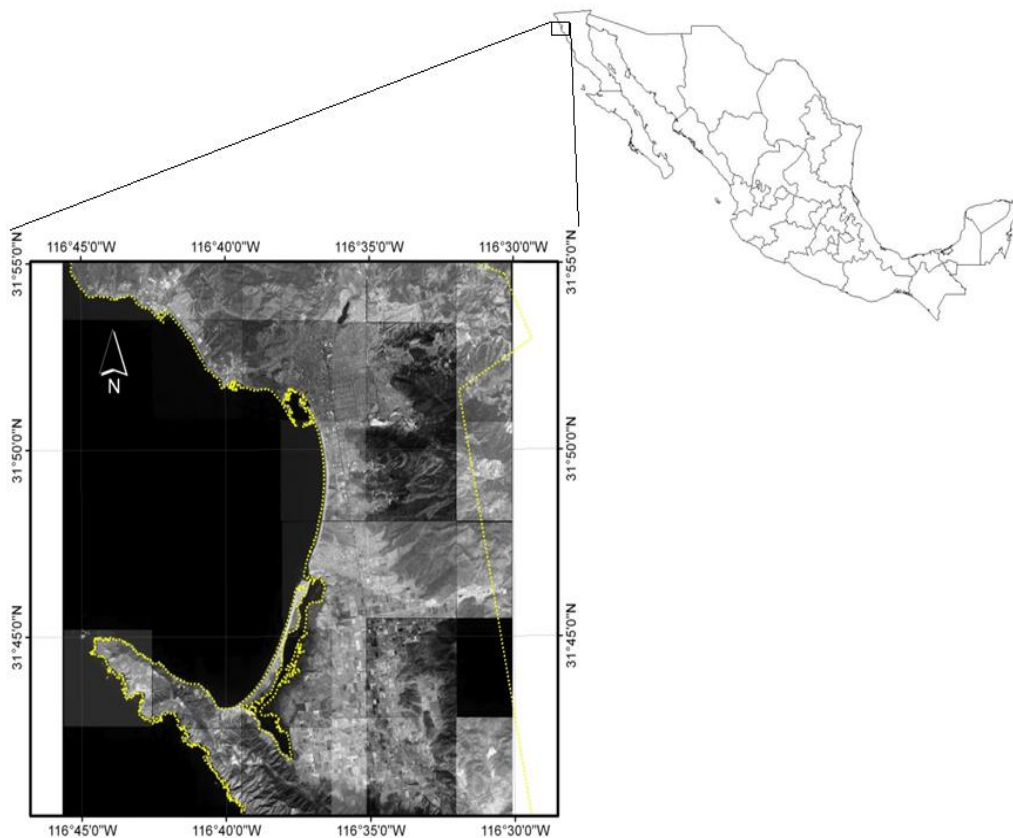


Figura 1. Mapa del área de estudio

De acuerdo con datos de INEGI para el conteo del 2005 el municipio de Ensenada tenía una población de 413,481 habitantes, estimando que para el 2010 se tendrá una población de aproximada de 473,000 habitantes con una tasa anual de crecimiento de 2.7%. Considerando los datos anteriores, la demanda de vivienda será de 5,841 viviendas anualmente hasta el 2010, por lo que también la demanda de agua potable y alcantarillado y otros servicios se verá incrementada. Por lo anterior la implementación de sistemas descentralizado y el reuso de aguas grises, podría ahorrar cantidades significativas de agua.

Metodología

Para el análisis en el suministro de agua dentro de un nuevo fraccionamiento se desarrolló un modelo para simular diferentes escenarios con y sin la implementación de sistemas de reuso de agua.

Para el desarrollo del modelo se realizó una revisión bibliográfica para la definición del sistema y obtención de parámetros a incluir en el modelo. La metodología que se empleó es la que se encuentra señalada en Grant *et al* en el 2001.

Se obtuvo un modelo conceptual en el cual se muestra que a partir del crecimiento poblacional existe una necesidad de vivienda, por lo que se generan más construcciones y, como anteriormente se planteó, la edificación de nuevas casas significa la demanda de múltiples servicios, entre ellos el suministro de agua potable, en donde el uso del agua potable genera dos tipos de agua residual, aguas grises y aguas negras; ambos tipos de agua residual pueden reusarse, las aguas grises en los escusados (WC) y riego de áreas verdes y las aguas negras solamente en riego de áreas verdes (Fig. 2). Por lo tanto, el reuso implicaría un ahorro de agua potable al implementar los sistemas no convencionales (Fig. 3)

A partir del modelo conceptual, se definieron las variables a incluir en el modelo asignándoles valores (Tabla 1). El modelo fue desarrollado en el software Stella® versión 7 (Isee Systems, Inc.) Se seleccionó esta plataforma debido a que su programación es simple y flexible además de crear un ambiente virtual de fácil entendimiento. El modelo fue empleado para estimar los litros de agua que se utilizan en un complejo habitacional a partir de la demanda de agua poblacional. Conociendo la cantidad de agua que se ocupa, se establecieron los porcentajes que pueden ser

reutilizados. Definidas las cantidades se estimaron los montos financieros que implican el reuso y el no-reuso, a partir de varios submodelos.

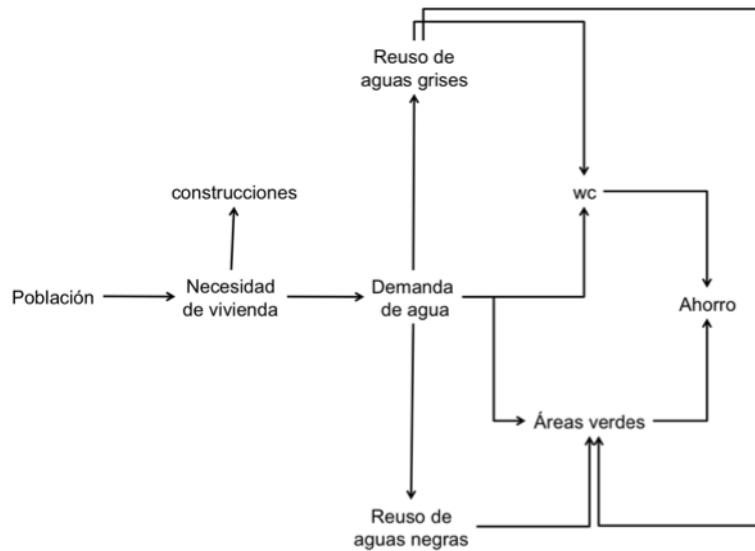


Figura 2. Mapa conceptual

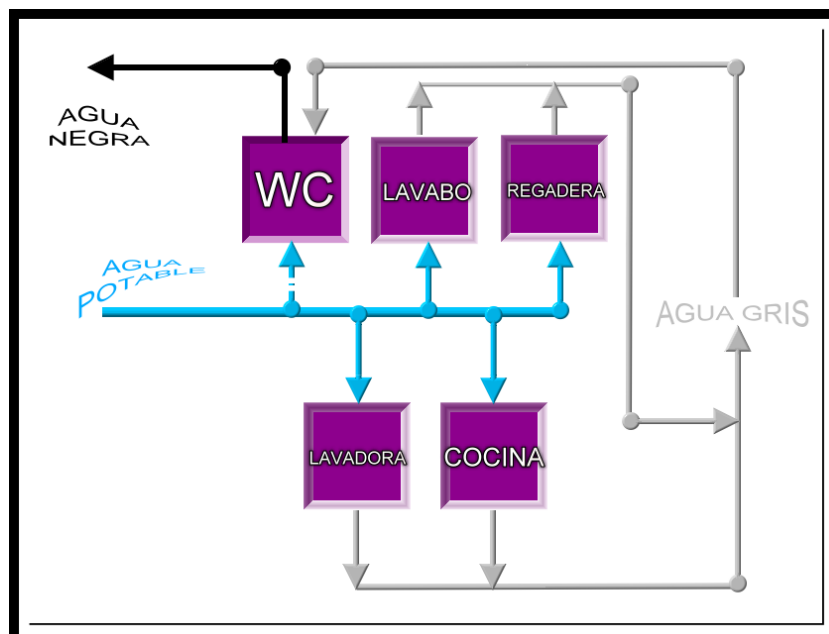


Figura 3. Esquema del sistema hidráulico dentro de la casa (sistema no convencional)

Tabla 1. Variables que definen el sistema convencional y el sistema no convencional en el modelo de simulación.

Variables auxiliares	Valor
Área de casa (m ²)	60
Consumo de agua per capita (litros/día)	150 y 207
Área verde por casa (m ²)	15
Demanda de agua para áreas verdes (l/m ²)	5
Habitantes por casa	4
Número de casas por unidad habitacional	40, 60, 80 y 100
Porcentaje de uso de agua para WC	30
Porcentaje de uso de agua que genera agua gris	70

Las estimaciones para cada simulación fueron proyectadas a 25 años. Se consideraron desarrollos que puedan llevarse a cabo en el área de estudio, desde 40 hasta 100 casas. El consumo de agua por habitante es un dato tomado de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE) y de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California, ya que ambas cifras definen de manera diferente las simulaciones.

Para el cálculo monetario se estimaron los costos de agua potable, agua gris, agua negra, costo de planta de tratamiento y costo de tuberías, a partir de diferentes fuentes bibliográficas. El costo del agua potable se estimó a partir de la tarifa propuesta por CESPE (Tabla 2), en donde se planteó una función gráfica en el programa de Stella® (Fig. 4), ya que de esa manera se logró un cálculo más aproximado del precio del agua, dentro de la programación del modelo.

Tabla 2. Tarifa del costo (en pesos) de agua potable proporcionada por la CESPE para octubre del 2009

(m ³)	(m ³)	Importe (en pesos/m ³)
cuota mínima 0	y hasta 5	\$37.73 por primeros 5 m ³
por el excedente de 5	y hasta 10	\$8.68
por el excedente de 10	y hasta 15	\$9.88
por el excedente de 15	y hasta 20	\$11.09
por el excedente de 20	y hasta 25	\$16.96
por el excedente de 25	y hasta 30	\$18.28
por el excedente de 30	y hasta 40	\$31.66
por el excedente de 40	y hasta 50	\$34.18
por el excedente de 50	y hasta 60	\$35.71
por el excedente de 60		\$36.17

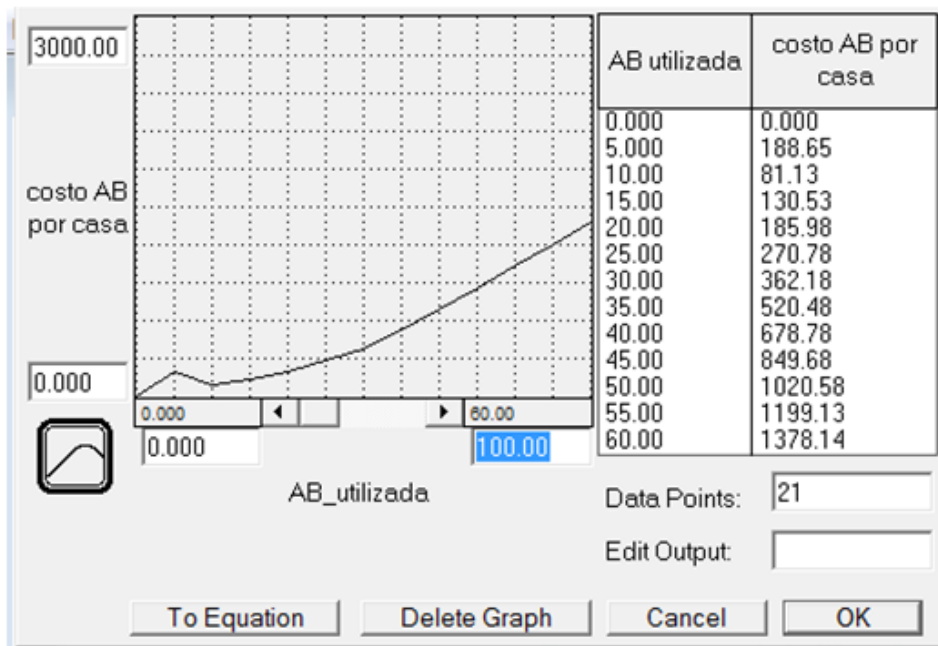


Figura 4. Función gráfica para el cálculo de la tarifa del agua en Stella a partir de los datos CESPE de octubre del 2009.

El costo de agua gris y agua negra fueron tomados del Mendoza-Espinosa et al. (2006), considerando un precio del agua gris de 1.7 pesos y para el agua negra de 2.7 pesos, para marzo del 2006. Dichos precios fueron modificados para febrero del 2010, a partir del cálculo de la inflación ocupando el índice nacional de precios al consumidor, tal como lo sugiere Puc Sánchez y Pech Pérez (2008).

$$\left(\frac{IPC_{x,y} - IPC_{x,y-1}}{IPC_{x,y-1}} \right) * 100$$

IPC_{x,y} es el índice mes actual, del año actual, febrero 2010

IPC_{x,y-1} es el índice del mes actual del año anterior, marzo 2006

El costo de la planta de tratamiento se tomo el dato para una inversión de una planta de tratamiento de 2.5 lps con tratamiento primario y secundario en el estado de Guanajuato, de acuerdo con la comisión del agua de dicho estado, obteniendo una inversión de 852,444 pesos, para abril del 2005 para la planta de tratamiento de aguas residuales de Santa Catarina, y de igual manera el precio fue ajustado de acuerdo a la inflación para febrero del 2010. Finalmente el costo de tuberías se obtuvo de la

Comisión Estatal del Agua (CEA) de Querétaro de su catálogo de artículos febrero del 2010 (Tabla 3)

Tabla 3. Tipo de tubo y precio (CEA Querétaro, 2010).

DESCRIPCION	Unidades de Medición	PRECIO UNITARIO	Longitud tubería en metros			
			40 casas	60 casas	80 casas	100 casas
TUBO DE P.V.C. DE 4" RD-26	METRO	34.42	780	1170	1560	1950
TUBO DE P.V.C. DE 6" RD-26	METRO	94.35	780	1170	1560	1950
TUBO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD RD-11 16"	METRO	1354	780	1170	1560	1950

Para el cálculo de la distancia de la tubería se estableció a partir de un fraccionamiento hipotético y aleatorio, obteniendo las distancias de 780 m para 40 casas, 1170 m para 60 casas, 1560 m para 80 casas y 1950 m para 100 casas.

Para cada casa se consideró un solo baño así como 12 desagües y 8 llaves, los costos fueron tomados de un estimado realizado por Puc Sánchez y Pech Pérez (2008), y de igual manera se les aplicó la inflación correspondiente.

Resultados y Discusión

Desarrollo del modelo

El modelo fue desarrollado para: 1) representar el sistema del flujo del agua en una unidad multifamiliar; 2) simular las demandas de agua así como su tratamiento; 3) y evaluar los ahorros al usar agua gris y/o agua reciclada.

El modelo incluye variables que son constantes ya que se encuentran basadas en la literatura, sin embargo dichas variables pueden tener variaciones en la vida real.

A partir del análisis del sistema se obtuvo el listado de variables a incluir en el modelo. Se obtuvieron cinco variables o indicadores de estado, cuatro indicadores de transferencia de material o de flujo y nueve variables auxiliares que definieron los flujos de entrada y salida de material así como la acumulación de material en los indicadores de estado (Tabla 4).

Tabla 4. Lista de indicadores y variables del modelo base para la obtención de cantidades de agua gris, agua negra y agua potable que se utilizan en un nuevo fraccionamiento.

Indicadores de estado	Transferencia de material	Variables auxiliares
Fraccionamiento	Entrada de agua potable	Área de casa
Planta de tratamiento de agua gris	Entrada de agua gris	Consumo de agua por habitante
Planta de tratamiento de agua negra	Salida de agua negra	Demanda de agua para áreas verdes
Cisterna de agua gris	Salida de agua gris	Demanda de agua por fraccionamiento
Cisterna de agua para riego de áreas verdes		Habitantes por casa
		Habitantes por fraccionamiento
		Número de casas
		Porcentaje de uso de agua para wc
		Porcentaje de uso de agua que genera agua gris

Como se mencionó anteriormente, para programar el modelo se utilizó el software STELLA en donde el sistema del flujo del agua se encuentra representado por cajas y flechas con válvula circular. Las cajas representan los indicadores de estado, y las flechas representan los flujos de materia que modifican la acumulación en las variables de estado. Las variables de estado representan los litros que son utilizados en un fraccionamiento. Los flujos son las entradas y salidas de agua en litros que pasan por cada variable de estado. Cada flujo se encuentra definido e incluso controlado por variables auxiliares (que se encuentran representadas por círculos) como es el consumo de agua per capita, el número de casas, entre otros (Figura 5).

La unidad de tiempo definida para las simulaciones es mensual, lo cual permitió la acumulación de información para cada variable de estado e incluso oscilaciones para cada flujo. Los valores iniciales en las variables de estado son igual a cero y para los flujos son a partir de las variables auxiliares. Cada simulación realizada representa un escenario futuro.

A partir de lo anterior se construyó un modelo base para la obtención de litros de agua utilizados en un fraccionamiento y posteriormente, con la información generada por este modelo principal, se construyeron submodelos para la información financiera y los diferentes ahorros en los diferentes escenarios.

La definición de los diferentes flujos de entrada y salida fueron establecidos a partir de funciones lógicas y en algunas funciones gráficas para su ejecución, dependiendo de las diferentes variables auxiliares, debido a que es una de las particularidades que presenta el programa para la creación de las simulaciones.

La inversión se definió como los gastos de instalación hidráulica los cuales son el número de llaves y desagües en la casa, así como la distancia de las diferentes tuberías que se necesitan para cada escenario propuesto. También dentro de la inversión se consideró el costo de construcción de la planta de tratamiento de agua gris. Y se consideró que los costos de operación y mantenimiento quedan integrados en el costo del agua gris y agua negra. El principio de programación fue sencillo ya que el software permitió establecer relaciones entre las variables e indicadores de estado para realizar dichas estimaciones a través de cada simulación (Anexo 1).

El modelo presenta limitaciones tecnológicas ya que no considera cuántos litros de agua se ocupan por excusado, regadera, llave etc.; pero dentro de sus ventajas se encuentra en que determina los diferentes ahorros que genera un conjunto, considera el área de la casa, distancia de la tubería de entrada y salida; número de llaves y desagües, todo dependiendo del escenario en función. Se puede hacer una estimación del ahorro del costo del agua con base en la tarifa que tiene la CESPE para la casa-habitación y muestra los resultados de manera amigable. A diferencia del trabajo realizado por Mendoza-Espinosa et al. (2006), este modelo considera los costos de construcción, operación y mantenimiento del sistema de tratamiento que se requiera según cada escenario.

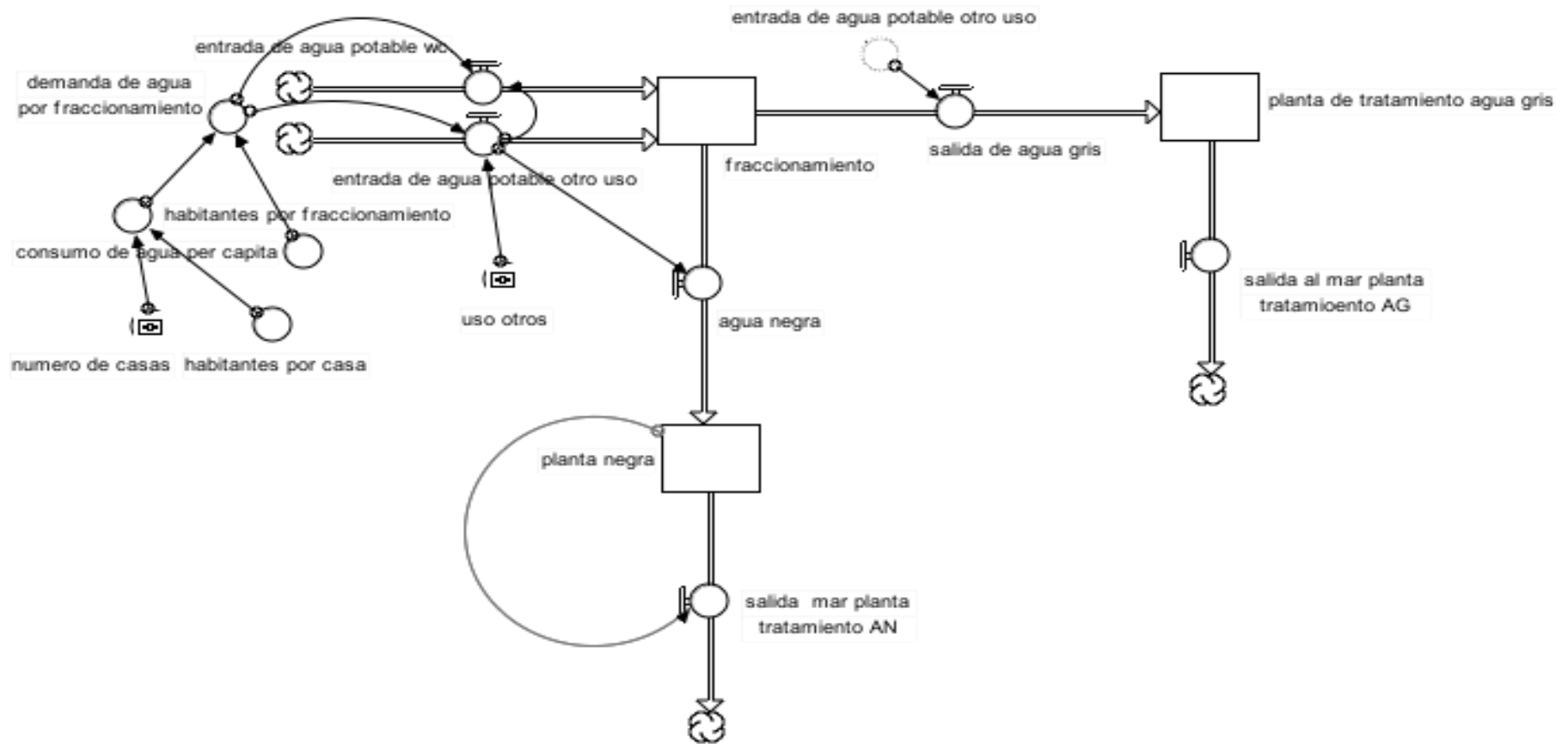


Figura 5. . Ejemplo de componentes del modelo (extracto).

Simulaciones

El modelo base permitió la creación de ocho escenarios diferentes controlados por interruptores (Tabla 5). Para cada escenario se realizaron simulaciones cambiando los datos de entrada como son el número de casas así como los litros de agua que consume cada habitante por día, ya que dichas variables mostraron cambios en las cantidades de ahorro de agua así como de gastos de inversión. Sin embargo independientemente del número de casas, el porcentaje que se ahorró permanece constante.

Tabla 5. Escenarios de simulación y porcentajes de reuso.

Escenario	Reuso de agua gris en wc	Reuso de agua gris en riego	Reuso de agua negra en riego	Porcentaje de reuso (%)
1	Off	off	off	0.0
2	Off	off	on	0.3
3	Off	on	off	0.3
4	Off	on	on	0.5
5	On	off	on	30.3
6	On	off	off	29.7
7	On	on	off	30.3
8	On	on	on	30.5

El ahorro mensual que se generó en cada simulación puede observarse en las figuras 6 y 7. El escenario 1 no se encuentra graficado ya que al no existir reuso, no se genera ahorro de agua. Como valor mínimo mensualmente se pueden ahorrar 3.11 m³; esta cantidad está en función de la cantidad de casas y del porcentaje de área verde que se destine por casa. Como valor máximo, se obtuvo 756.88 m³ que se acumulan mensualmente en un fraccionamiento donde habitan 400 personas que ocupen sistemas no convencionales

Para los escenarios 2, 3 y 4, al considerar únicamente el reuso de agua negra, que solamente es empleada para riego de áreas verdes, la cantidad de reuso es exactamente la misma, independientemente de la cantidad suministrada, ya que el área verde es fija y constante en cada casa, por lo que en estos escenarios no hubo variación en el ahorro de agua si se suministran 207 L/hab o 150 L/hab.

La implementación del sistema de reuso de agua gris y agua negra muestra un ahorro de agua (Figuras 6 y 7). A medida que el número de casas aumenta el ahorro de agua

es mayor. De acuerdo a las estimaciones realizadas, se puede obtener hasta un ahorro del 30.5% (Tabla 5). Dependiendo del número de casas que cuenten con un sistema de reuso quedarían disponibles para el resto de la población 757 m³ por mes, que en 25 años serían 224,000 m³.

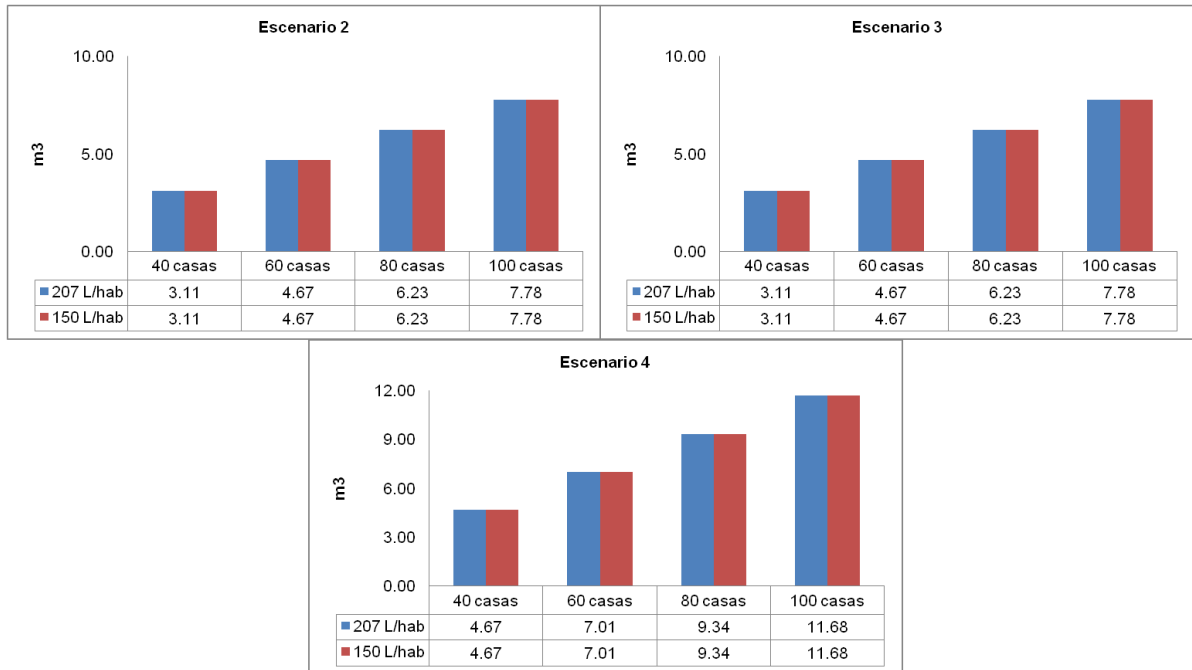


Figura 6. Ahorro de agua mensual resusando sólo aguas negras, sin considerar el reuso de agua gris,

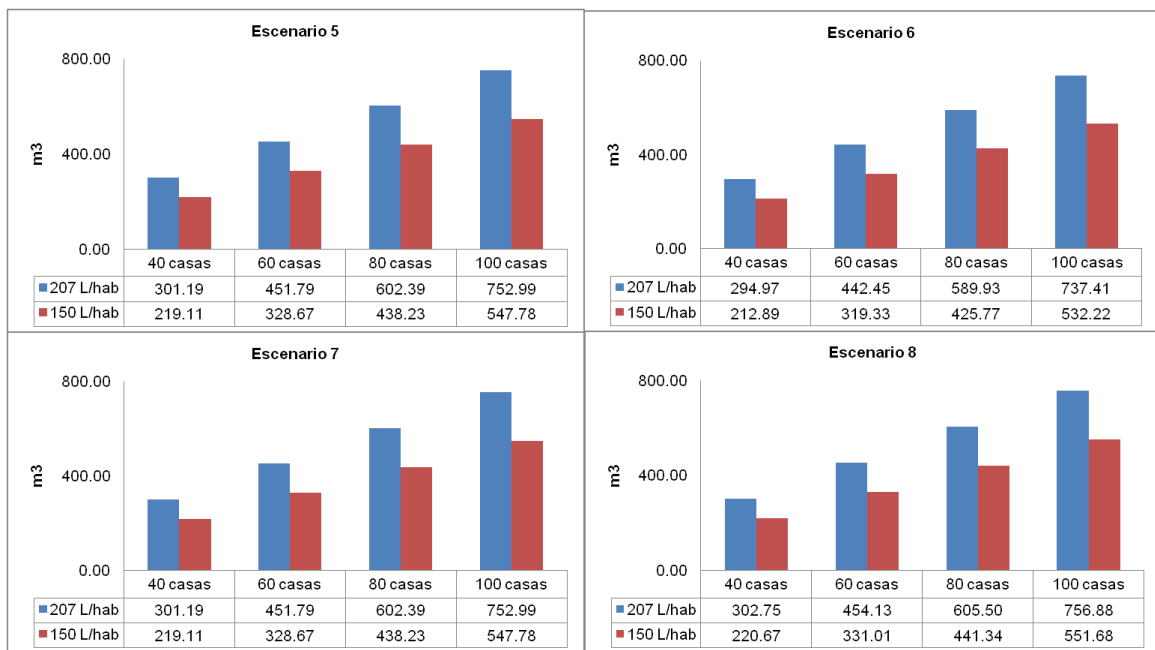


Figura 7. Ahorro de agua mensual considerando el reuso de agua gris y agua negra.

En un conjunto de 40 casas, donde de acuerdo con datos de CESPE se distribuyen diariamente por persona 207 litros de agua (IMIP et al., 2008), en un escenario de no reuso o sistema convencional, no existe ahorro. Cuando se empieza a considerar un reuso de agua negra (escenario 2) se ahorra a 25 años 925 m³, de igual manera si sólo se reusa agua gris para riego (escenario 3). Cuando se implementan los sistemas no convencionales de reuso de aguas grises en WC, los ahorros de agua aumentan 97 veces en comparación a que si sólo se reusara para riego.

De la misma manera si se considera un consumo de 207 L por persona al día en 60, 80 y 100 casas se muestra un comportamiento similar a las estimaciones realizadas para 40 casas, variando únicamente las cantidades, ya que implica un mayor número de personas así como de infraestructura (Fig. 8).

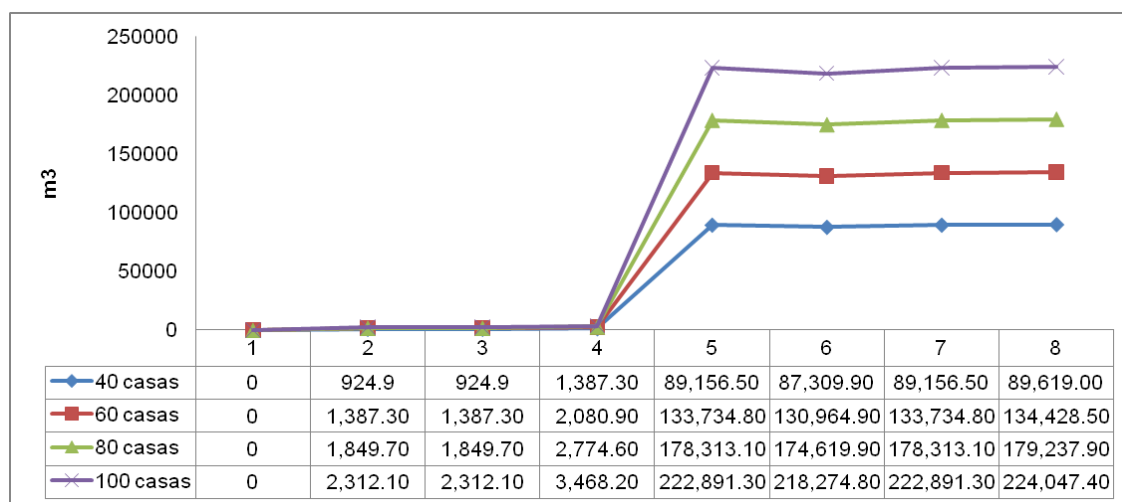


Figura 8. Ahorro de agua a 25 años en los ocho escenarios de simulación considerando un consumo de 207 L / hab.

Por otro lado, si se considera el consumo de 150 L per capita como lo establece la Ley de Construcción, el ahorro de agua es menor debido precisamente a que el consumo que se le destina es menor al que propone CESPE (Fig. 9). Sin embargo, el comportamiento de la gráfica de ahorro a 25 años en el consumo de 150 L/hab muestra un comportamiento similar a la Figura 7 donde el consumo es de 207 L/hab.

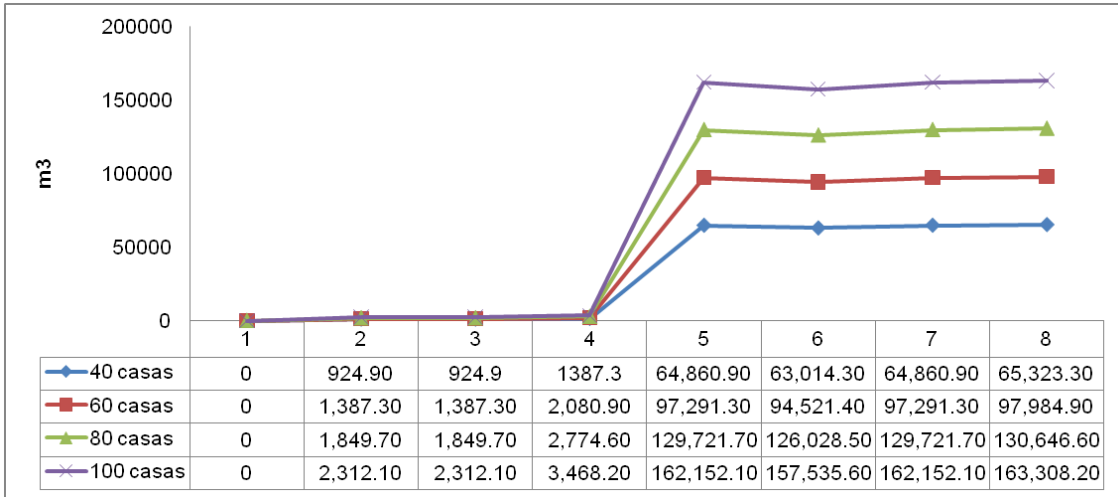


Figura 9. Ahorro de agua a 25 años en los ocho escenarios de simulación considerando un consumo de 150 L / hab.

En cuanto a la inversión, la relación que se muestra entre el número de casas es inversamente proporcional, a mayor número de casas menor el tiempo en recuperar la inversión. Sin embargo las diferencias se hacen más evidentes en este aspecto, ya que si el consumo se realiza con datos CESPE el tiempo de recuperación de la inversión es relativamente más rápido, a que si el consumo que se realiza es de acuerdo a la Ley de Edificaciones (Figs. 10 y 11).

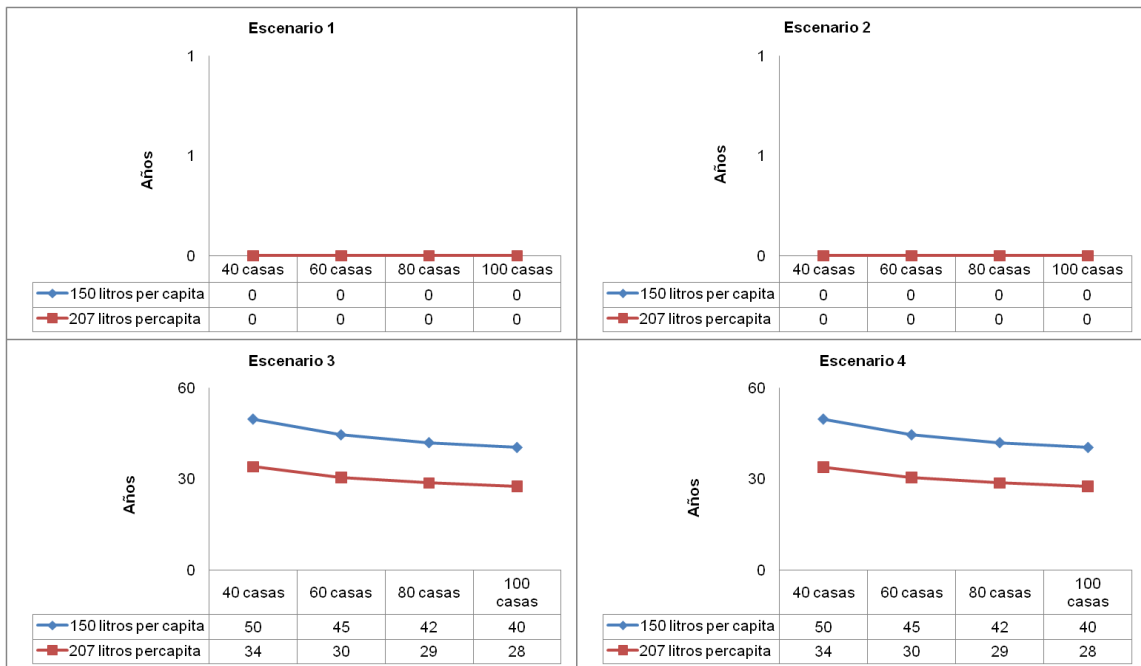


Figura 10. Tiempo de recuperación de la inversión monetaria en escenarios de reuso de agua negra.

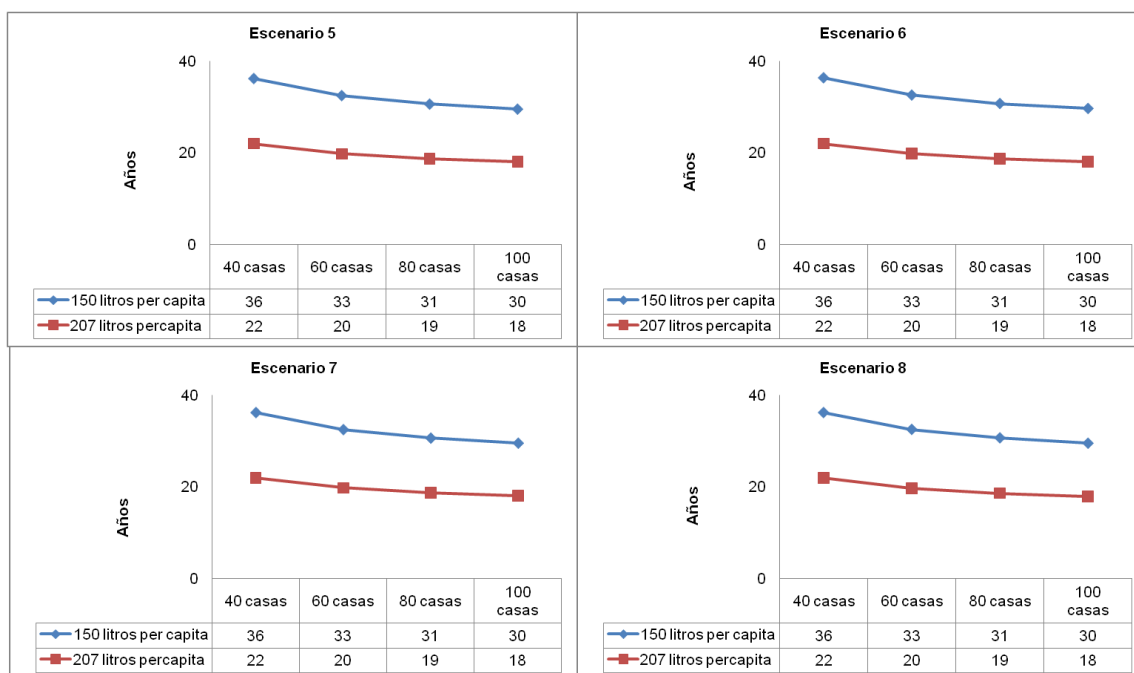


Figura 11. Tiempo de recuperación de la inversión monetaria en escenarios de reuso de agua negra y reuso de agua gris.

El comportamiento de las gráficas para ambas situaciones muestra un comportamiento similar aunque en diferente cantidad. Se muestra que los cambios drásticos en el tiempo de recuperación de la inversión se dan a partir de la implementación de los sistemas no convencionales, es decir, en el reuso en el WC (Figs. 10 y 11). Para el escenario 1 y 2 difícilmente se podría recuperar la inversión inicial (Tabla 6), ya que la cantidad que se reusa es mínima (Fig. 6). Las diferencias entre los consumos de agua muestran una diferencia en el tiempo de recuperación de 10 años.

Tabla 6. Costos de inversión (pesos) del sistema hidráulico en pesos para diferente número de casas en cada escenario de simulación propuesto.

Escenario	40 casas	60 casas	80 casas	100 casas
1	-	-	-	-
2	1,653,431.60	2,453,924.90	3,254,418.20	4,054,911.50
3	2,600,617.60	3,474,703.90	4,348,790.20	5,222,876.50
4	2,600,617.60	3,474,703.90	4,348,790.20	5,222,876.50
5	2,654,312.80	3,555,246.70	4,456,180.00	5,357,114.50
6	2,654,312.80	3,555,246.70	4,456,180.60	5,357,114.50
7	2,654,312.80	3,555,246.70	4,456,180.60	5,357,114.50
8	2,654,312.80	3,555,246.70	4,456,180.60	5,357,114.50

Los costos de inversión fueron calculados a partir de los datos generados por Puc Sánchez y Pech Pérez (2008) con su método de estimación paramétrica en construcción de viviendas de interés social. Además, dicha información fue complementada con el listado de precios de tubos de PVC y polietileno de la Comisión Estatal del Agua (CEA) del estado de Querétaro.

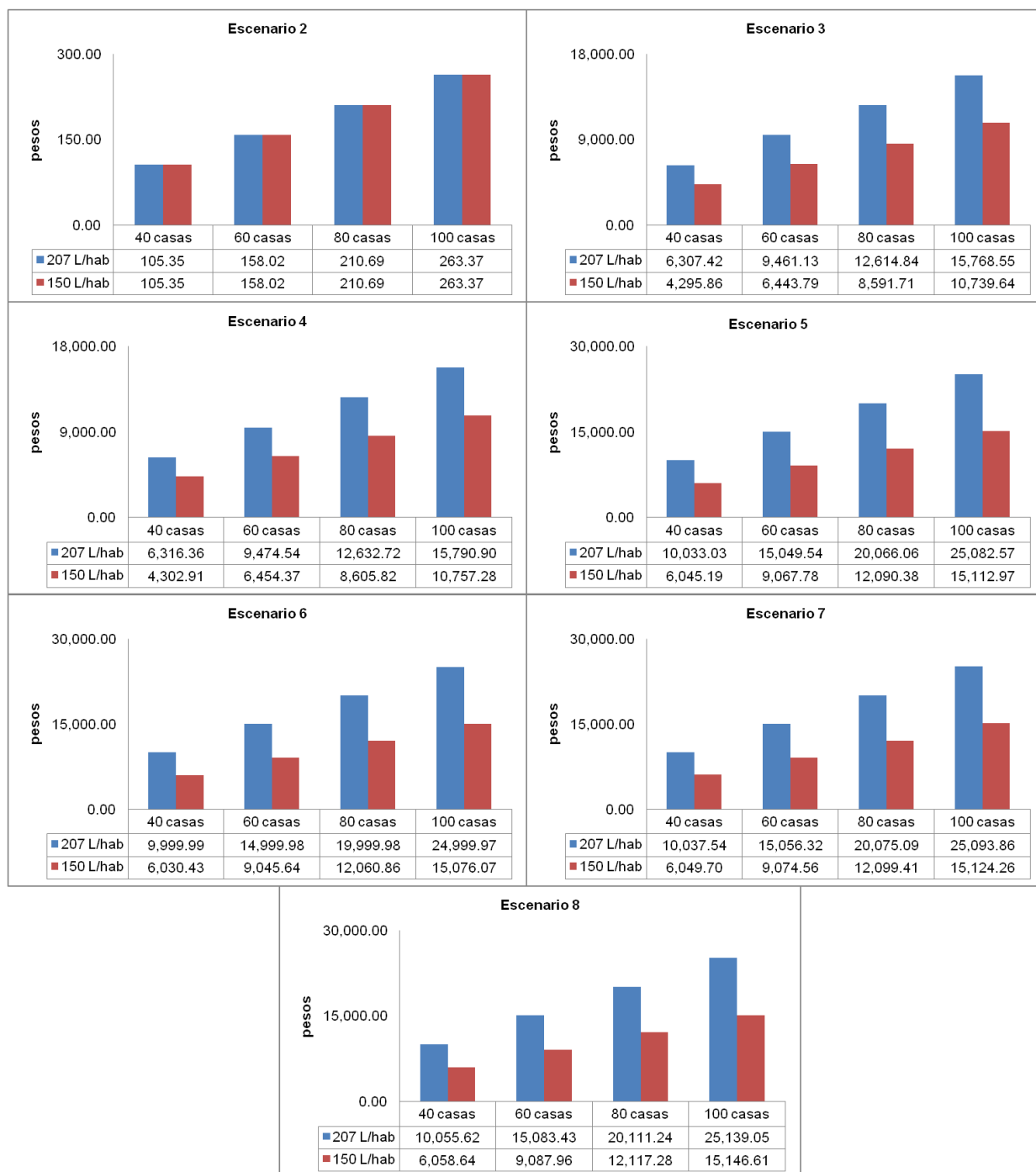


Figura. 12. Ahorro monetario mensual en los ocho escenarios de simulación.

Los cálculos para estimar el tiempo de recuperación de la inversión se hicieron a través del ahorro de agua. El cálculo del ahorro monetario de agua potable fue estimado con base en la tarifa de agua propuesta por CESPE (Tabla 2) menos el agua que es reutilizada según el escenario en función; con una modificación a los datos del modelo de Mendoza-Espinosa et al (2006), el precio estimado para el agua gris fue de 2.04 pesos por metro cúbico y para el agua negra fue de 3.24 pesos por metro cúbico. El ahorro monetario estimado se acumuló mes tras mes para así estimar el tiempo en que la cantidad ahorrada equipara la inversión. Dicho ahorro mensual se muestra en la Figura 12, en donde se obtuvo como valor mínimo \$105.35 pesos en un escenario de reuso de agua negra solamente en un conjunto habitacional de 40 casas. Como valor máximo se obtuvo \$25,139.05 pesos en la implementación de sistemas no convencionales para 100 casas con un suministro de agua de 207 L/hab. Ambos valores reflejan el ahorro que se obtuvo por todo el conjunto habitacional.

Los escenarios y el abastecimiento de agua.

Al igual que el trabajo de Alegre (2004), los diferentes escenarios permiten que se investigue las múltiples posibilidades en el reuso de agua gris en nuevos desarrollos habitacionales, con la diferencia que en el presente trabajo no se considera el reuso de agua de lluvia.

Dentro de los ocho escenarios de simulación se encontraron resultados interesantes con respecto al número de casas y la cantidad de agua que se proporcionaría a cada habitante por día. De acuerdo con las Figuras 6, 7, 10 y 11 a mayor uso de agua por habitante mayor es el ahorro de agua que se presenta y por lo tanto la inversión se puede recuperar en menor tiempo que en los escenarios donde el reuso solo se lleva a cabo para riego. Por otro lado si a los habitantes se les proporciona una ración menor de agua, el agua que se ocupa es menor así como el ahorro de agua y monetariamente implica que la inversión tarda más en recuperarse.

Ante estos escenarios, es notorio que aunque las simulaciones fueron realizadas con datos oficiales queda la incógnita acerca de cuánta agua se usa realmente, ya que en el área de estudio las cantidades que muestra la autoridad como suministro diario parecieran excesivas al consumo "real". Sin embargo hay que considerar que oficialmente el suministro de agua por habitante/día es mayor, debido a la pérdida que se tiene por fugas. De acuerdo con datos de la Comisión Estatal de Servicios Públicos

de Ensenada (CESPE), la ciudad de Ensenada tiene una pérdida del 25% (IMIP, 2008) cuando, en comparación, en el Distrito Federal existen pérdidas del 40% (CONAGUA, 2009), al igual que en Monterrey (CONAGUA, 2010), mientras que en Guadalajara del 20.44% (CONAGUA, 2007) Por lo tanto, Ensenada presenta un porcentaje de pérdida menor al de otras ciudades del país.

Comparando el consumo de agua de la ciudad de Ensenada con diferentes consumos de agua que existen alrededor del mundo (Tabla 7), se puede observar que en países de zonas áridas, como Kuwait, Jordan y Oman, se obtiene una gran cantidad de ahorro de agua potable al implementar el reuso de aguas grises. Sin embargo, el reuso no es exclusivo de zonas áridas, ya que en países de clima templado como Dinamarca, Gran Bretaña e Irlanda, la preocupación por la escasez del recurso los han conducido a proponer el reuso como la solución al problema. En su mayoría el porcentaje de aguas grises generadas en los hogares es del 50-80%, por lo que el agua que podría ahorrarse oscila entre dichos porcentajes. Dependiendo del número de casas y/o personas que lo implementen, el ahorro de agua potable al año podría ser de millones de metros cúbicos. Para el caso de estudio, los parámetros utilizados en las simulaciones concuerdan con los de otras regiones de características climáticas análogas a nivel mundial, ya que las necesidades domésticas son similares.

Tabla 7. Ejemplos de consumos y usos de agua en el mundo.

Autor	Año	País	Consumo de agua
Abusam	2008	Kuwait	<ul style="list-style-type: none"> -el agua gris comprende del 50-80% del total del agua de uso doméstico -el reuso de agua gris puede ahorrar del 30-40% en casas y un ahorro del 60-70% en edificios comerciales -Kuwait genera 183 millones m³/ año de agua gris -Si se reusa aunque sea la mitad del agua gris generada, se podrían ahorrar 90 millones m³ de agua potable anualmente; el tratamiento de agua residual se reduciría en un 30%
Al-Jayyousi.	2003	Jordania	<ul style="list-style-type: none"> -el agua gris comprende del 50%-80% del total del agua de uso doméstico -el reuso de agua gris puede ahorrar más del 38% de agua potable -Se ha documentado que en Arizona que en promedio una casa puede generar de 113.562 a 151.416 m³ de agua gris por año -El excusado requiere de un 30% del total del uso doméstico

Bertrant, et al.	2008	Irlanda	-el 57% del flujo del drenaje se reduciría en un período de 10 años cuando se reciclen 50 litros de agua gris por habitante
Eriksson, et al	2002	Dinamarca	-el 75% del total de agua residual doméstica es agua gris -30% del consumo doméstico puede ser ahorrado si se reusa -en Alemania se ha reusado agua gris exitosamente
Ghunmi, et al.	2008	Jordania	-El agua gris comprende del 64 - 85% del total del flujo de agua en las áreas urbanas y rurales
Jamrah, et al.	2008	Oman	Diariamente: -La producción de agua gris es del 80 al 83% del total del consumo de agua potable. -del 55 al 57% del agua gris generada en una casa omaní se origina de la regadera -del 28 al 33% del agua gris es generada en la cocina -del 6 al 9% del agua gris se origina de la lavadora -del 5 al 7% del agua gris se origina de los lavabos. -existe una aceptación del 66% del público para el reuso en excusados
Jefferson, et al	2001	Gran Bretaña	-el reuso de agua gris para el excusado o riego ofrece un potencial del 30% menos en el uso de agua potable
Lillibridge	2003	Texas, Estados Unidos	-una casa de 4 habitantes genera 606 litros de agua gris por día -lavadora 57 litros por día -baño en regadera 44 litros por día -baño 4.5 litros por día -grifos 41 litros por día -105 litros de agua gris generados por persona por día
Voorthuizen., et al	2005	Holanda	-35 m ³ /año/persona de agua gris -14 m ³ / año/persona de agua negra

Por otro lado, el consumo *per capita* por día, fue uno de los factores determinantes en las diferentes simulaciones, donde al comparar con el consumo que se tiene en las zonas áridas del mundo, la ciudad de Ensenada presenta cantidades mayores a las que se consumen en otras partes del mundo, tales como Oman, Adelaida (Australia), España, India e Israel (Tabla 8). Sin embargo, en comparación con otras regiones áridas del mundo, como por ejemplo Xi'an (China) y Kuwait, donde el consumo es de

500 L/hab/día, el consumo de agua *per capita* es mucho menor en Ensenada, ya que los datos de CESPE estiman un consumo de 207 L/hab/día (IMIP et al, 2008).

Tabla 8. Consumo de agua para diferentes usos en el mundo.

Autor	Año	País	Datos de consumo L/hab/día
Voorthuizen et al.	2005	Holanda	972
Abusam	2008	Kuwait	500
Wang et al.	2008	Xi'an, China	500
Espino, et al	2004	Chihuahua, México	453
Haruvy	1998	Israel	215
Godfrey, et al.	2009	India	184
Friedler	2008	Israel	161
Barton y Argue	2009	Adelaida, Australia	150
Jamrah, et al	2008	Oman	136
Ghunmi, et al	2008	Jordania	84
Gistau.	1997	España	28

A partir de la tabla anterior, los diferentes consumos que se llevan a cabo en el mundo en promedio se calcula en 288.3 L/hab/día. Si bien comparando con otras zonas áridas del mundo, la ciudad de Ensenada presenta un consumo de agua por habitante por debajo de la media mundial. Sin embargo, cabe destacar que el problema de escasez aun persiste, y el reuso de agua gris como solución se presenta como una opción óptima en el manejo adecuado del agua potable.

El manejo del agua

Ante el problema de escasez que existe en la ciudad de Ensenada, se han planteado diferentes alternativas para disminuir el déficit en el suministro, entre ellas: la construcción de una planta desalinizadora y la implementación de sistemas de reuso. A partir de éstas propuestas se realizó un análisis hidroeconómico, concluyendo que la construcción del acueducto, además de ser costosa provocaría un aumento en el déficit de suministro en los municipios de Tijuana y Playas de Rosarito; la construcción de una planta desalinizadora presenta un incremento en el costo del agua así como en su construcción, operación y mantenimiento; finalmente la implementación de sistemas de reuso en la ciudad, principalmente para agricultura, implican también un costo, sin embargo es mucho menor a las otras alternativas (Medellin-Azuara et al., 2008). En el estudio actual la alternativa analizada ante la problemática actual fue el reuso, mostrando que a pesar de que el tiempo de recuperar la inversión puede tardar hasta 32 años, el ahorro de agua generado es constante desde el primer mes, al

reusar 5 m³/casa/mes. Si bien aparentemente puede ser costoso el sistema hidráulico, la disponibilidad y manejo adecuado del recurso puede atenuar la escasez actual.

De acuerdo con el programa integral del agua de Ensenada (PIAE) realizado por el IMIP, CESPE, et al (2008), el 97% de las tomas son domésticas y existe un déficit del 30 L/seg en el suministro de agua para la población de la ciudad, que equivale a que a cada habitante le falten 5 L/día de su suministro diario. Con los resultados obtenidos, debido a que fue enfocado a los nuevos desarrollos habitacionales, el ahorro de agua estimado para cada habitante dentro del nuevo fraccionamiento equivale a 62 L/día, lo que implica que esta cantidad quedaría disponible para el resto de la población.

La planeación en el uso y manejo del agua potable así como del agua residual, son llevados a cabo actualmente a nivel mundial. Mendoza-Espinosa et al (2006), el IMIP (2008), Hernández-Flores et al. (2009), entre otros, se han enfocado al manejo del agua en la ciudad de Ensenada, concluyendo que es importante aplicar el reuso como parte de la solución al problema de escasez. Sin embargo los estudios en México en materia de reuso de agua gris para uso doméstico son muy pocos.

Las políticas e instrumentos ambientales en materia de reuso de agua que actualmente existen no son específicos, se encuentra mencionado en el Programa Nacional Hídrico (PNH) 2006-2012, en la Ley de Aguas Nacionales y en el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. Las especificaciones en cuanto su aplicación, manejo y administración no se encuentran definidos para el reuso en especial. Es por esta razón que la implementación de sistemas no convencionales se encuentra restringida o incluso arriesgada. Sin embargo, al revisar la ley de edificaciones y los diferentes reglamentos de construcción de casa-habitación de diferentes estados, como por ejemplo el “Reglamento del Organismo Público Descentralizado denominado Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Municipio de Purísima del Rincón, Gto” (1998), donde el ahorro de agua se encuentra contemplado, sería posible llevar a cabo la implementación de los sistemas no-convencionales. Finalmente cabe destacar que se requiere revisar la capacidad institucional para implementar con efectividad un marco normativo, cualquiera que sea en materia de reciclaje de agua, revisar la representatividad de la sociedad y los mecanismos de decisión en los comités y revisar la forma en la cual se elaboran las normas para que tengan un mejor sustento técnico, en todos los aspectos.

Conclusión

La implementación de sistemas de reuso de agua gris y agua negra muestra un ahorro de agua que, de acuerdo a las estimaciones realizadas, puede alcanzar hasta un ahorro del 30.5%. Dependiendo del número de casas que cuenten con un sistema de reuso quedarían disponibles para el resto de la población hasta 757 m³ por mes, que en 25 años serían 224,000 m³. A medida que el número de casas aumenta el ahorro de agua es mayor. Cuando se implementan los sistemas no convencionales de reuso de aguas grises en WC, los ahorros de agua aumentan 97 veces en comparación a que si sólo se reusara para riego de jardines.

En cuanto a la inversión, a mayor número de casas menor el tiempo en recuperar la inversión. Mientras un sistema convencional tiene un costo aproximado de 1.5 millones de pesos para un complejo de 40 casas y uno no convencional 2.7 millones de pesos, en un sistema convencional el ahorro de agua no se encuentra contemplado, y por lo tanto no existe tampoco un ahorro monetario por lo que la inversión del sistema hidráulico no se recupera. Por el contrario, un sistema no-convencional, a pesar de ser más costoso que el convencional, sí contempla un ahorro de agua y por lo tanto existiría un ahorro monetario que implica la recuperación de la inversión de la instalación hidráulica. Sin embargo, para recuperar la inversión el consumo de agua *per capita* es indispensable por lo que cuando dicho consumo es de 207 L/día el tiempo promedio estimado de recuperación de la inversión es de 20 años para un sistema no convencional, y cuando el consumo es de 150 L/día el promedio para recuperar la inversión se estima en 32 años. Finalmente, para ambas situaciones los cambios drásticos en el tiempo de recuperación de la inversión se dan a partir de la implementación de los sistemas no convencionales, es decir, en el reuso en el WC.

A partir del resultado obtenido, el reuso de agua gris presenta aun un largo camino que recorrer en México. La comparación realizada con diferentes regiones áridas del mundo hacen evidente que el uso y repartición del agua en México aun no es eficaz y su manejo presenta un gran reto para aprovechamiento óptimo. La ciudad de Ensenada fue el sitio de estudio ideal para la aplicación del modelo de simulación, ya que al contar con un sistema del 100% de sus aguas residuales y ser un centro de población en desarrollo, los datos estimados reflejaron que la mejor opción para un manejo ideal del recurso agua se encuentra en el reuso de las aguas grises y negras en los nuevos desarrollos habitacionales.

Bibliografía

- Abusam, A. (2008). Reuse of greywater in Kuwait. *International Journal of Environmental Studies* , 65 (1), 103-108.
- Alegre, N., Jeffrey, P., Thomas, J. S., Hardwick, I., & Riley, S. (2004). Strategic options for sustainable water management at new developments: the application of a simulation model to explore potential water savings. *Water Science and Technology* , 50 (2), 9-15.
- Andersen, H. R., Lundsbye, M., Eriksson, E., y Ledin, A. (2007). Estrogenic personal care products in a greywater reuse system. *Water Science & Technology* , 56 (12), 45-49.
- Barton, A. B., y Argue, J. R. (2009). Integrated urban water management for residential areas: reuse model. *Water Science and Technology-WST* , 60 (3), 813-823.
- Bertalanffy, L. v. (1993). *Teoría General de los Sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones.* (9a. Ed.). México: Fondo de Cultura Económica.
- Bertrand, N., Jefferson, B., y Jeffrey, P. (2008). Cross sectoral and scale-up impacts of greywater recycling technologies on catchment hydrological flows. *Water Science & Technology—WST* , 57 (5), 741-746.
- CONAGUA Comisión Nacional del Agua. (15 de enero de 2009). Se invertirán 2,500 millones de pesos en obras de rehabilitación del Sistema Cutzamala: Conagua. Comunicado de Prensa No. 002-09 . D.F, México.
- CONAGUA Comisión Nacional del Agua. SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA URBANA. (19 de julio de 2007). Siapa. Recuperado el 22 de agosto de 2010, de www.siapa.gob.mx/transparencia/pdf/SAPAS-SIAPA%202006.pdf
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (27 de mayo de 2010). Comisión Nacional del Agua CONAGUA. Recuperado el 22 de agosto de 2010, de www.conagua.gob.mx/CONAGUA07//.../CP-Entrega%20de%20titulodeconcesion_a_Puebla_Verde100527.pdf
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., y Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban water* , 4, 85-104.
- Espino, M. S., Navarro, C. J., y Pérez, J. M. (2004). Chihuahua: a water reuse case in the desert. *Water Science and Technology* , 50 (2), 323-328.
- Friedler, E. (2008). The water saving potential and the socio-economic feasibility of greywater reuse within the urban sector -Israel as a case study. *International Journal of Environmental Studies* , 65 (1), 57-69.

- Ghunmi, L. A., Zeeman, G., Lier, J. v., y Fayed, M. (2008). Quantitative and qualitative characteristics of grey water for reuse requirements and treatment alternatives: the case of Jordan. *Water Science & Technology* , 58 (7), 1385-1396.
- Godfrey, S., Labhassetwar, P., y Wate, S. (2009). Greywater reuse in residential schools in Madhya Pradesh, India. A case study of cost-benefit analysis. *Resources, Conservation & Recycling* , 53 (5), 287-293.
- Grant, W. E., Marín, S. L., y Pedersen, E. K. (2001). *Ecología y Manejo de Recursos Naturales: Análisis de Sistemas y Simulación*. San José, Costa Rica: AGROAMERICA.
- Haruvy, N. (1998). Wasawater reuse- regional and economic considerations. *Resources, Conservation and Recucling* , 23, 57-66.
- Hernández-Flores, F., y Mendoza-Espinosa, L. G. (2009). Greywater Reuse and Householders Perception in Tijuana. IWA's 1st Development Congress Water and Sanitation services. Ciudad de México.
- IMIP Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada, CESPE Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada. (19 de marzo de 2008). IMIP- Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada. Recuperado el 15 de FEBRERO de 2010, de <http://www.imipens.org/planesyprogramas.htm>
- Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Ahmed, M., Prathapar, S., Al-Harrasi, A., y Al-Abri, A. (2008). Biological treatment of greywater using sequencing batch reactor technology. *International Journal of Enviroment Studies* , 65 (1), 71-85.
- Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Prathapar, S., y Al Harrasi, A. (2008). Evaluating greywater reuse potential for sustainable water resources management in Oman. *Environ Monit Assess* , 137, 315-327.
- Janusz, N. (1999). "Urban hydrology and water management – present and future challenges." *Urban Water* 1(1): 1-14.
- Jimenez, B., y Asano, T. (2008). *Water Reuse An International Survey of current practice, issues and needs*. Gran Bretaña: IWA Publishing.
- Lillibridge, B. (2003). Potential for graywater use from single family residences inthe San Antonio Texas Area. *Water Reuse Association Symposium*.
- McCuen, R. (2003). *Modeling Hydrologic Change. Statistical Methods*. Estados Unidos: Lewis Publishers.
- Medellín-Azuara, J., Mendoza-Espinosa, L. G., Lund, J. R., y Howitt, R. E. (2008). Hydro-economic analysis of water supply for the binational transboundary region of Baja California, Mexico. *Water Science & Technology: Water Supply–WSTWS* , 8 (2), 189-196.

- Mendoza-Espinosa, L. G, Figueroa-Nolasco, M.O. y Lopez-Calva, E.(2006) Systems Modeling for the planning of greywater management in new housing developments in the city of Ensenada, Baja California, Mexico Proceedings 79th Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference, Dallas, Texas, 6053-6066.
- Mendoza-Espinosa, L. G., y Ramírez-Acosta, R. d. (2005). Economía del agua en Baja California. Reuso de aguas residuales tratadas bajo mecanismos de mercado. Mexicali Baja California: Universidad Autonoma de Baja California.
- Puc Sánchez, E., & Pech Pérez, J. (2008). Método de estimación paramétrica de costos en construcción de viviendas de interés social. Ingeniería , 12 (1), 51-59.
- Simón, A. (9 de octubre de 2006). Reconocen pérdida de casi 35 por ciento de agua por las fugas . El Universal .
- Voorthuizen, E. M., Zwijnenburg, A., y Wessling, M. (2005). Nutrient removal by NF and RO membranes in a decentralized sanitation system. Water Research , 39, 3657-3667.
- Wang, X. C., Chen, R., Zhang, Q. H., y Li, K. (2008). Optimized plan of centralized and decentralized wastewater reuse systems for housing development in the urban area of Xi'an, China. Water Science and Technology- WST , 58 (5), 969-975.
- Wheeler, H., Sorooshian, S., y Sharma, K. D. (2008). Hidrological Modeling in Arid and Semi-arid Areas. Cambridge University Press.

Anexo 1

El modelo de simulación, fue el modelo base para la creación de los submodelos y así estimar los diferentes montos financieros y cantidades de agua posibles de reusar en los diferentes escenarios propuestos. En la tabla 6 se muestran los diferentes indicadores de estado con sus respectivos flujos de entrada y salida así como las variables auxiliares dependientes e independientes que definieron al modelo. Las fórmulas generadas son resultado de la programación del software Stella. Los valores iniciales de los indicadores de estado se encuentran denotados con la palabra "INIT". En algunas de las variables y/o transferencias de material se establecieron funciones lógicas denotadas como "if...then...else". Las variables auxiliares con el nombre de "switch" presentan dos valores, uno o cero, ya que al estar activados (valor = uno) permiten el flujo de material, de lo contrario impiden su transferencia.

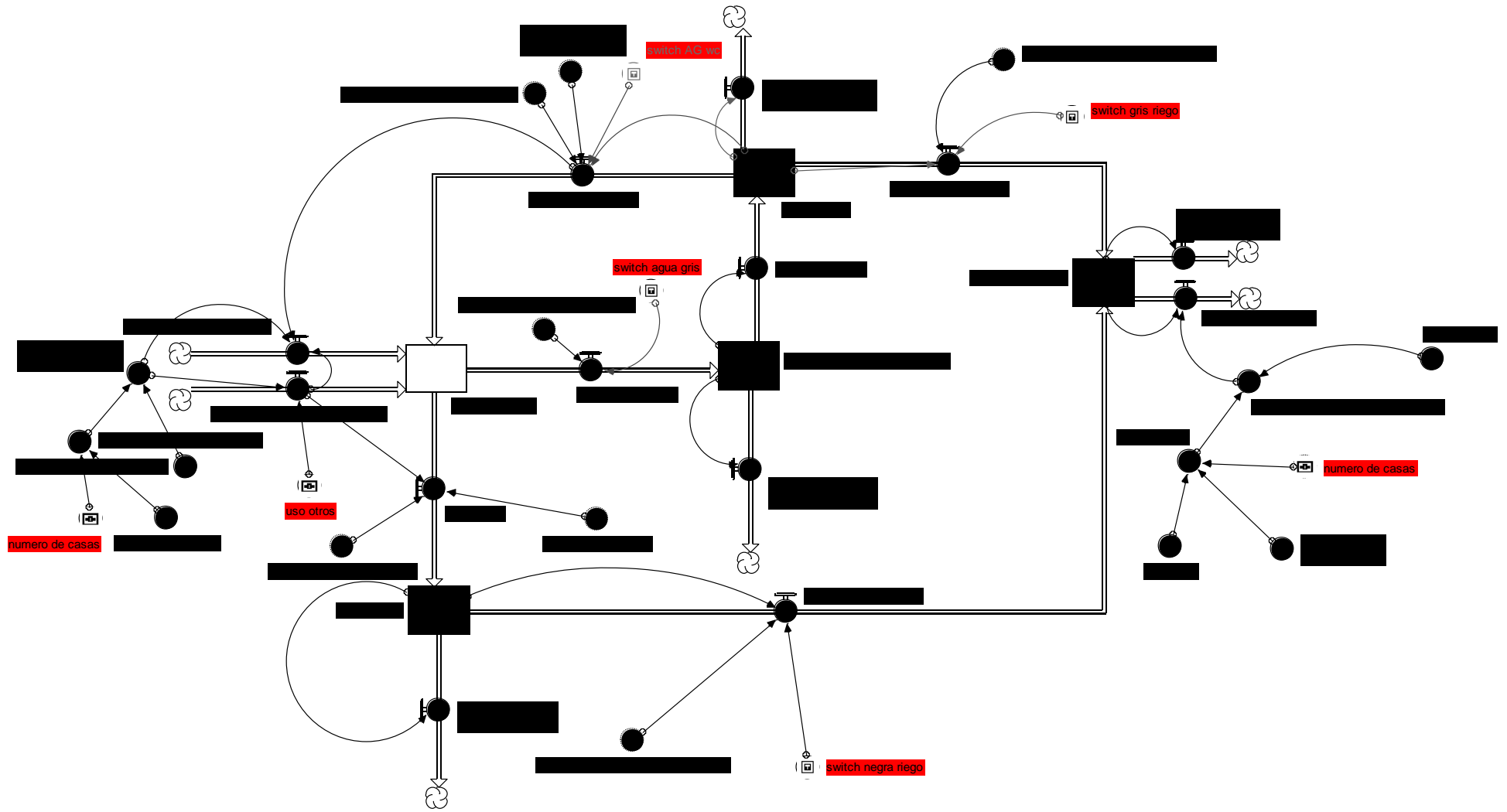


Figura 13. Modelo de simulación.

Tabla 9. Fórmulas aplicadas al modelo de simulación.

Indicador de estado	
$\text{fraccionamiento}(t) = \text{fraccionamiento}(t - dt) + (\text{entrada_de_agua_potable_wc} + \text{agua_gris_tratada_wc} + \text{entrada_de_agua_potable_otro_uso} - \text{salida_de_agua_gris} - \text{agua_negra}) * dt$ <p>INIT fraccionamiento = 0</p>	
Transferencia de material. Entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ $\text{entrada_de_agua_potable_wc} = (\text{if } \text{agua_gris_tratada_wc} \geq (\text{demanda_de_agua_por_fraccionamiento} - \text{entrada_de_agua_potable_otro_uso}) \text{ then } 0 \text{ else } (\text{demanda_de_agua_por_fraccionamiento} - \text{entrada_de_agua_potable_otro_uso}))$ ○ $\text{agua_gris_tratada_wc} = (\text{if } \text{reserva_agua} \geq (\text{demanda_de_agua_por_fraccionamiento} - \text{entrada_de_agua_potable_otro_uso}) \text{ then } \text{demanda_de_agua_por_fraccionamiento} - \text{entrada_de_agua_potable_otro_uso} \text{ else } 0) * \text{switch_AG_wc}$ ○ $\text{entrada_de_agua_potable_otro_uso} = \text{if } (\text{switch_negra_riego} + \text{switch_gris_riego}) = 0 \text{ then } ((\text{demanda_de_agua_por_fraccionamiento} * \text{uso_otros}) / 100) + \text{demanda_de_agua_para_areas_verdes_else} (\text{demanda_de_agua_por_fraccionamiento} * \text{uso_otros}) / 100$
Transferencia de material. Salida	<ul style="list-style-type: none"> ○ $\text{salida_de_agua_gris} = \text{entrada_de_agua_potable_otro_uso} * \text{switch_agua_gris}$ ○ $\text{agua_negra} = \text{if } \text{agua_gris_tratada_wc} > 0 \text{ then } \text{agua_gris_tratada_wc} \text{ else } \text{entrada_de_agua_potable_wc} + \text{entrada_de_agua_potable_otro_uso}$
Indicador de estado	
$\text{planta_de_tratamiento_agua_gris}(t) = \text{planta_de_tratamiento_agua_gris}(t - dt) + (\text{salida_de_agua_gris} - \text{agua_gris_tratada} - \text{salida_al_mar_planta_tratamiento_AG}) * dt$ <p>INIT planta_de_tratamiento_agua_gris = 0</p>	
Transferencia de material. Entrada	<ul style="list-style-type: none"> ○ $\text{salida_de_agua_gris} = \text{entrada_de_agua_potable_otro_uso} * \text{switch_agua_gris}$
Transferencia de material. Salida	<ul style="list-style-type: none"> ○ $\text{agua_gris_tratada} = \text{planta_de_tratamiento_agua_gris}$ ○ $\text{salida_al_mar_planta_tratamiento_AG} = \text{if } \text{planta_de_tratamiento_agua_gris} \geq 25920000 \text{ then } \text{planta_de_tratamiento_agua_gris} * 0.2 \text{ else } 0$
Indicador de estado	
$\text{planta_negra}(t) = \text{planta_negra}(t - dt) + (\text{agua_negra} - \text{riego_areas_verdes_AN} - \text{salida_al_mar_planta_tratamiento_AN}) * dt$ <p>INIT planta_negra = 0</p>	

Transferencia de material. Entrada	<ul style="list-style-type: none"> o agua_negra = if agua_gris_tratada_wc > 0 then agua_gris_tratada_wc else entrada_de_agua_potable_wc + entrada_de_agua_potable_otro_uso
Transferencia de material. Salida	<ul style="list-style-type: none"> o riego_areas_verdes_AN = (if planta_negra >= demanda_de_agua_para_areas_verdes_ then demanda_de_agua_para_areas_verdes_ else 0)*switch_negra_riego o salida_mar_planta_tratamiento_AN = if (planta_negra > 12960000) then planta_negra else (planta_negra*0.30)
Indicador de estado	
<p>reserva_agua(t) = reserva_agua(t - dt) + (agua_gris_tratada - agua_gris_tratada_wc - riego_areas_verdes_AG - salida_al_mar_reserva_de_agua_gris) * dt INIT reserva_agua = 0</p>	
Transferencia de material. Entrada	<ul style="list-style-type: none"> o agua_gris_tratada = planta_de_tratamiento_agua_gris_
Transferencia de material. Salida	<ul style="list-style-type: none"> o agua_gris_tratada_wc = (if reserva_agua >= (demanda_de_agua_por_fraccionamiento-entrada_de_agua_potable_otro_uso) then demanda_de_agua_por_fraccionamiento-entrada_de_agua_potable_otro_uso else 0) *switch_AG_wc o riego_areas_verdes_AG = (if riego_areas_verdes_AN=0 then demanda_de_agua_para_areas_verdes_ else demanda_de_agua_para_areas_verdes_*0.5)*switch_gris_riego_ o salida_al_mar_reserva_de_agua_gris = if reserva_agua >= 5000000 then reserva_agua*0.5 else 0
Indicador de estado	
<p>riego_areas_verdes(t) = riego_areas_verdes(t - dt) + (riego_areas_verdes_AG + riego_areas_verdes_AN - salida_al_mar_riego_de_areas_verdes - riego_de_areas_verdes) * dt INIT riego_areas_verdes = 0</p>	
Transferencia de material. Entrada	<ul style="list-style-type: none"> o riego_areas_verdes_AG = (if riego_areas_verdes_AN=0 then demanda_de_agua_para_areas_verdes_ else demanda_de_agua_para_areas_verdes_*0.5)*switch_gris_riego_ o riego_areas_verdes_AN = (if planta_negra >= demanda_de_agua_para_areas_verdes_ then demanda_de_agua_para_areas_verdes_ else 0)*switch_negra_riego

Transferencia de material. Salida	<ul style="list-style-type: none"> ○ salida_al_mar_riego_de_areas_verdes = if riego_areas_verdes >= 1000 then riego_areas_verdes*0.30 else 0 ○ riego_de_areas_verdes = if riego_areas_verdes >= demanda_de_agua_para_areas_verdes_ then demanda_de_agua_para_areas_verdes_ else 0
Variables auxiliares.	<ul style="list-style-type: none"> ○ agua_para_AV = 0.173*30 ○ area_casa = 56 ○ consumo_de_agua_por_persona_al_mes = consumo_per_capita_al_dia*30 ○ consumo_per_capita_al_dia = 207 ○ demanda_de_agua_para_areas_verdes_ = superficie_AV*agua_para_AV ○ demanda_de_agua_por_fraccionamiento = habitantes_por_fraccionamiento*consumo_de_agua_por_persona_al_mes ○ habitantes_por_casa = 4 ○ habitantes_por_fraccionamiento = habitantes_por_casa*numero_de_casas ○ numero_de_casas = 40 ○ razon_superficie_demanda = 0.25 ○ superficie_AV = (area_casa*razon_superficie_demanda)*numero_de_casas ○ switch_agua_gris = 1 ○ switch_AG_wc = 1 ○ switch_gris_riego_ = 1 ○ switch_negra_riego = 1 ○ uso_otros = 0.65

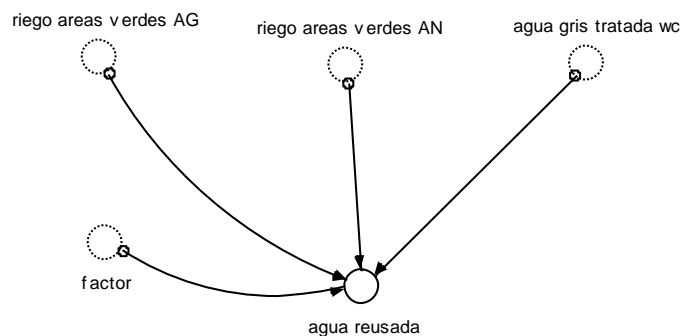


Figura 14 Submodelo de simulación con el cual se estimó la cantidad de agua que se puede reusar en m³

Tabla 10. Fórmula aplicada al submodelo de simulación con el cual se estimó la cantidad de agua que se puede reusar en m³

Variable auxiliar.	<ul style="list-style-type: none"> ○ agua_reusada = (agua_gris_tratada_wc+riego_areas_verdes_AG+riego_areas_verdes_AN)*factor ○ factor = 1/1000
--------------------	---

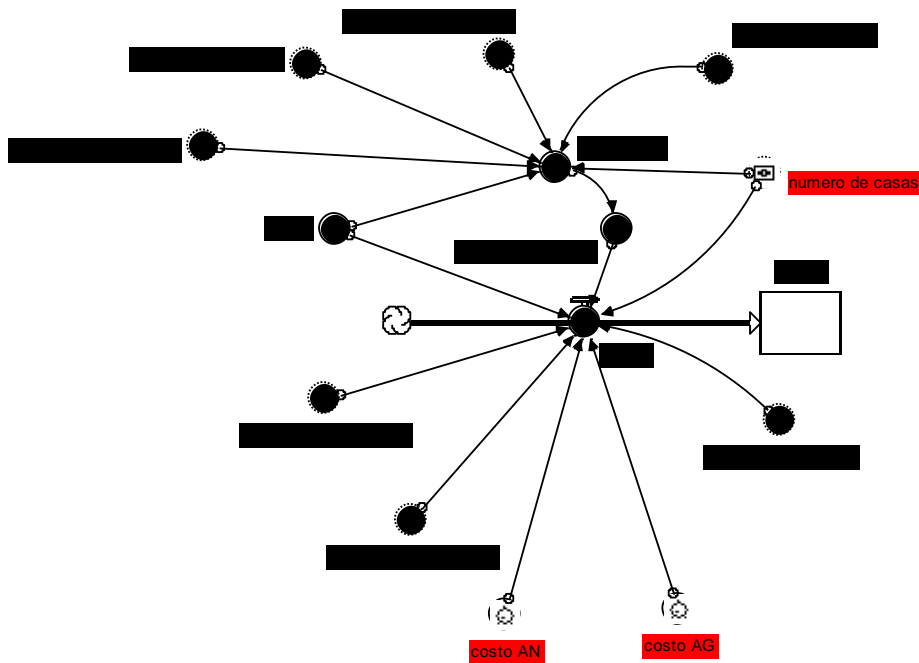


Figura 15 Submodelo de simulación con el cual se estimó el ahorro monetario al reusar agua

Tabla 11. Fórmulas aplicadas al submodelo de simulación con el cual se estimó el ahorro monetario al reusar agua

Indicador de estado
Ahorro(t) = Ahorro(t - dt) + (costos) * dt
INIT Ahorro = 0

<p style="text-align: center;">Transferencia de material. Entrada</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ $costos = (costo_AB_por_casa * numero_de_casas) - (((riego_areas_verdes_AG * factor)) * costo_AG + ((agua_gris_tratada_wc * factor) * costo_AG) + ((riego_areas_verdes_AN * factor) * costo_AN))$
<p style="text-align: center;">Variables auxiliares.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ $AB_utilizada = ((riego_areas_verdes_AG + riego_areas_verdes_AN + salida_de_agua_gris + agua_gris_tratada_wc) * factor) / numero_de_casas$ ○ $costo_AG = 2.45$ ○ $costo_AN = 3.9$ ○ $costo_AB_por_casa = GRAPH(AB_utilizada)$ ○ (0.00, 0.00), (5.00, 189), (10.0, 81.1), (15.0, 131), (20.0, 186), (25.0, 271), (30.0, 362), (35.0, 520), (40.0, 679), (45.0, 850), (50.0, 1021), (55.0, 1199), (60.0, 1378), (65.0, 1559), (70.0, 1740), (75.0, 1921), (80.0, 2102), (85.0, 2282), (90.0, 2463), (95.0, 2644), (100, 2825)

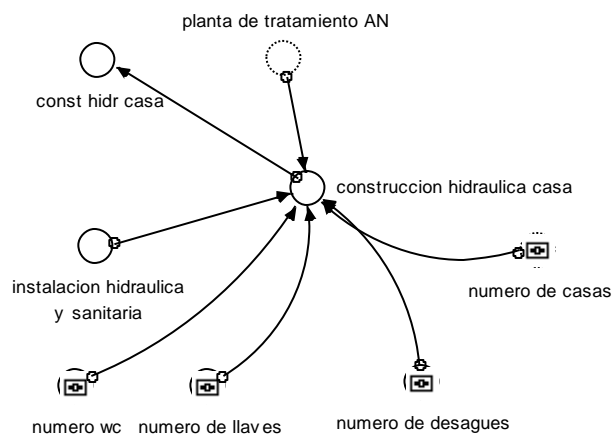


Figura 16. Submodelo de simulación con el cual se estimó el costo de construcción hidráulica

Tabla 12. Fórmulas aplicadas en el submodelo de simulación con el cual se estimó el costo de construcción hidráulica

Variables auxiliares.	<ul style="list-style-type: none"> ○ $const_hydr_casa = (construccion_hidraulica_casa - (STEP(1,2) * construccion_hidraulica_casa))$ ○ $construccion_hidraulica_casa = (((numero_de_desagues + numero_de_llaves + numero_wc) * instalacion_hidraulica_y_sanitaria) * numero_de_casas) + planta_de_tratamiento_AN$ ○ $numero_de_desagues = 1$ ○ $numero_de_llaves = 4$ ○ $numero_wc = 1$ ○ $instalacion_hidraulica_y_sanitaria = 561.04$
-----------------------	--

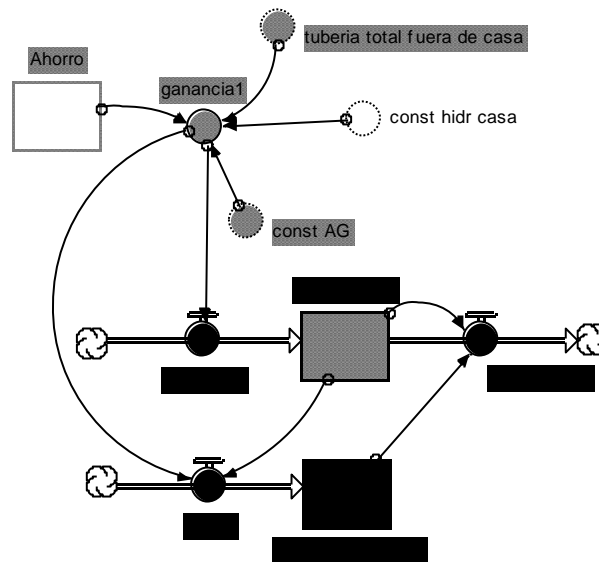


Figura 17 Submodelo de simulación con el cual se estimó el tiempo en el que el ahorro monetario que se genera mes tras mes se equipara con la inversión

Tabla 13. Fórmulas aplicadas al submodelo de simulación con el cual se estimó el tiempo en el que el ahorro monetario que se genera mes tras mes se equipara con la inversión.

Indicador de estado
$GANANCIA_NETA(t) = GANANCIA_NETA(t - dt) + (pagos) * dt$
INIT GANANCIA_NETA = 0

<p style="text-align: center;">Transferencia de material. Entrada</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ pagos = if ganancia1 < 1 then 0 else ganancia1 - INVERSION
<p>Indicador de estado</p>	
<p>INVERSION(t) = INVERSION(t - dt) + (ganancias - fin_de_deuda) * dt INIT INVERSION = 0</p>	
<p style="text-align: center;">Transferencia de material. Entrada</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ ganancias = if ganancia1 < 0 then (ABS(ganancia1)) else 0
<p style="text-align: center;">Transferencia de material. Salida</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ ganancias = if ganancia1 < 0 then (ABS(ganancia1)) else 0
<p style="text-align: center;">Variables auxiliares.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ ganancia1 = Ahorro - (const_AG + tuberia_total_fuera_de_casa + const_hidr_casa) ○ const_AG = (construccion_AG - (STEP(1,2) * construccion_AG)) * switch_agua_gris ○ construccion_AG = 800000 ○ tuberia_total_fuera_de_casa = ((drenaje + tuberia_AB + tuberia_AG) - (STEP(1,2) * (drenaje + tuberia_AB + tuberia_AG))) ○ drenaje = costo_tubo_pvc * distancia_tuberia_AN ○ costo_tubo_pvc = 94.35 ○ distancia_tuberia_AN = 780 ○ tuberia_AB = costo_tubo_AB * distancia_tuberia_AB ○ costo_tubo_AB = 1354 ○ distancia_tuberia_AB = 780 ○ tuberia_AG = ((distancia_tuberia_AG * costo_tubo_de_entrada_a_wc) * switch_AG_wc) + ((distancia_tuberia_AG * costo_tubo_salida) * switch_agua_gris) ○ distancia_tuberia_AG = 780 ○ costo_tubo_de_entrada_a_wc = 34.42 ○ distancia_tuberia_AG = 780 ○ costo_tubo_salida = 94.35

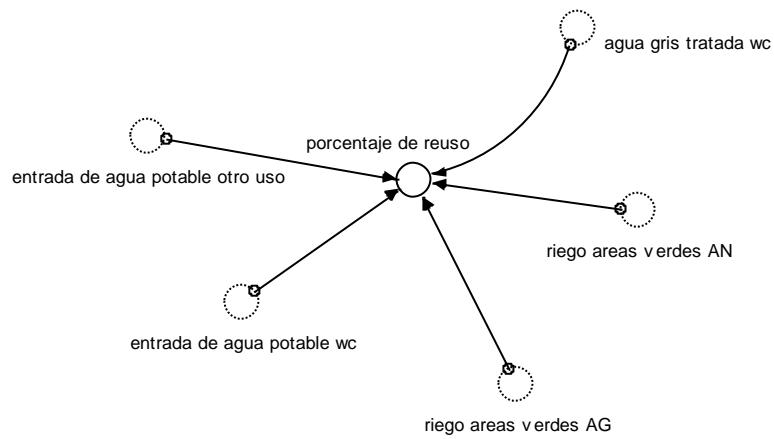


Figura 18. Submodelo con el cual se estimó el porcentaje de reuso de agua

Tabla 14. Fórmula aplicada al submodelo de simulación con el cual se estimó el porcentaje de reuso de agua

Variables auxiliares.	<ul style="list-style-type: none"> ○ porcentaje_de_reuso = $\frac{((\text{agua_gris_tratada_wc} + \text{riego_areas_verdes_AG} + \text{riego_areas_verdes_AN}) * 100)}{(\text{entrada_de_agua_potable_otro_uso} + \text{entrada_de_agua_potable_wc})}$
-----------------------	--