



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA**



***SISTEMA DE COSECHA DE AGUA PLUVIAL Y  
REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES DE REGADERA EN  
VIVIENDA UNIFAMILIAR***

**Tesis que para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA presenta:**

**ING. ABAD POSADAS BEJARANO**

**Tutor académico:**

**Dr. Daury García Pulido**

**Tutor adjunto:**

**Dr. Carlos Díaz Delgado**

**Toluca, Estado de México**

**Enero 2015**



**UAEM** | Universidad Autónoma  
del Estado de México

**Facultad de Ingeniería**

Ciudad Universitaria, Toluca, México; a 17 de diciembre de 2014

**Ing. Abad Posadas Bejarano**  
**Presente.**

A continuación transcribo el tema y capitulado aprobado por esta Institución para el desarrollo de su tesis dirigida por el Dr. Daury García Pulido y el Dr. Carlos Díaz Delgado de la Maestría en Ciencias del Agua, siendo de la siguiente manera:

**“SISTEMA DE COSECHA DE AGUA PLUVIAL Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS  
GRISES DE REGADERA EN VIVIENDA UNIFAMILIAR”**

	Resumen
	Abstract
Capítulo 1.	Introducción
Capítulo 2.	Antecedentes y marco teórico
Capítulo 3.	Planteamiento de la investigación
Capítulo 4.	Materiales y método
Capítulo 5.	Resultados y discusión
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones
Capítulo 7.	Referencias
	Anexos

Asimismo, para la aprobación de la tesis y demás trámites deberá sujetarse al reglamento respectivo de la Institución.

**Atentamente,**  
**Patria, Ciencia y Trabajo**

*2014, 70 Aniversario de la Autonomía de UAEM*

**M. en I. Raúl Vera Noguez**  
**Director**



c.c.p. Archivo.



[www.uaemex.mx](http://www.uaemex.mx)

Cerro de Coatepec S/N, Ciudad Universitaria; Toluca México  
Tel. (722) 2-14-08-55 / 2-15-13-51

## DEDICATORIA

*A Dios*

*A mi familia*

## RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la posibilidad de emplear un sistema de cosecha de agua pluvial y reutilización de aguas grises en vivienda unifamiliar de nivel medio ubicada dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Se realizó un análisis volumétrico de disponibilidad hídrica basado en distintos niveles de precipitación, considerando además diferentes niveles de demanda y áreas de captación, con el fin de calcular las eficiencias potenciales de ahorro de agua potable, alcanzando porcentajes en un rango del 2 al 49% anual.

En lo referente a la calidad del agua pluvial, se realizó su caracterización con el fin de proponer un sistema de acondicionamiento de bajo costo de construcción y mantenimiento, para lo cual se recurrió a una filtración lenta con arena. La buena calidad fisicoquímica del agua de lluvia evidenció una baja efectividad de remoción biológica por parte del sistema de acondicionamiento, ya que el bajo contenido de nutrientes y materia orgánica presentes en el agua propiciaron un lento desarrollo de la capa biológica encargada de degradar los microorganismos presentes en el agua colectada; alcanzando porcentajes de remoción del  $32\pm 8\%$  de CT y del  $47\pm 11\%$  de CF, por lo que un proceso de desinfección es requerido para garantizar el cumplimiento de normas con respecto a su calidad para uso doméstico en regadera, inodoro y lavadora.

Por su parte, la propuesta del sistema de tratamiento de aguas grises procedentes de la regadera consistió en un proceso de filtración gruesa con grava, seguida por una filtración lenta con arena y finalmente una adsorción sobre carbón activado granular, con lo que se obtuvieron eficiencias de remoción del  $88\pm 4\%$ ,  $75\pm 11\%$ ,  $52\pm 21\%$ ,  $34\pm 12\%$  y  $53\pm 6\%$  en lo referente a turbiedad, DQO, SDT, CT y CF respectivamente. A pesar de obtener una remoción parcial de los contaminantes, procesos adicionales como la desinfección son requeridos para cumplir con la normatividad referente a su reutilización en inodoros.

Finamente, se realizó una propuesta de diseño arquitectónico de una vivienda de nivel medio en la que se plantea el uso de esta clase de sistemas, obteniendo un ahorro de agua potable del 39% anual, considerando una precipitación media anual de 1,010 mm y 80 m<sup>2</sup> de captación.

Palabras clave: cosecha de agua pluvial, reutilización de aguas grises, filtración lenta con arena.

## ABSTRACT

In this work, the possibility of using a system of rainwater harvesting and a process of greywater conditioning in mid-level single family home located within the Metropolitan Area of the Valley of Toluca was evaluated. A volumetric analysis of water availability based on different levels of precipitation was performed, also considering different levels of demand and catchment areas, in order to calculate the potential efficiencies of saving water, reaching percentages ranging from 2 to 49% per year.

Based on the quality of rainwater and its characterization, it has been considered a slow sand filter as an efficient treatment system design because of its low-cost of construction and maintenance. The good physicochemical quality of rainwater is the reason of low effectiveness of biological removal from the conditioning system. In fact, because of the low concentration in nutrients and organic matter present in the collected water a slow development of the biological film in charge of degrading microorganisms has been occurred thereby reaching removal percentages of  $32\pm 8\%$  for TC and  $47\pm 11\%$  of FC. Moreover, a disinfection process is required to ensure compliance with standards for quality for domestic use in shower, toilet and washing machine.

On the other hand, the proposed graywater treatment system from the shower consisted of a coarse filtration process with gravel, followed by slow sand filter and finally adsorption on granular activated carbon (GAC), with removal efficiencies obtained from  $88\pm 4\%$ ,  $75\pm 11\%$ ,  $52\pm 21\%$ ,  $34\pm 12\%$  and  $53\pm 6\%$  with respect to turbidity, COD, TDS, TC and FC respectively. Although these processes have partially removed contaminants, additional processes are required such as disinfection, in order to comply with regulations concerning greywater reuse in toilets.

Finally, a proposed architectural design for a mid-level housing in which the use of such systems arises has been presented, obtaining approximately savings of drinking water of 39% per year, considering an average annual rainfall of 1,010 mm and  $80\text{ m}^2$  as water collection area.

Keywords: rainwater harvesting, greywater reuse, slow sand filters.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Cosecha de agua pluvial.....	11
2.2. Reutilización de aguas grises domésticas.....	21
2.3. Filtración lenta con arena.....	29
3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
3.1. Justificación.....	38
3.2. Hipótesis.....	39
3.3. Objetivos.....	39
4. MATERIALES Y MÉTODO.....	40
4.1. Delimitación de la zona de estudio.....	40
4.2. Diseño del sistema de cosecha de agua pluvial en vivienda unifamiliar.....	41
4.3. Balance entre oferta de agua pluvial y demanda.....	46
4.4. Eficiencia en el ahorro de agua potable.....	47
4.5. Sistema de acondicionamiento de agua pluvial.....	48
4.6. Sistema de tratamiento de aguas grises de regadera.....	54
4.7. Medición de parámetros.....	59
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
5.1. Dimensionamiento del sistema de cosecha de AP en vivienda unifamiliar.....	60
5.2. Evaluación del sistema de acondicionamiento de agua pluvial.....	67
5.3. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas grises de regadera.....	72
5.4. Propuesta arquitectónica de los sistemas de cosecha de AP y reutilización de AG..	76
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
6.1. Conclusiones.....	80
6.2. Recomendaciones.....	81
7. REFERENCIAS.....	82
ANEXOS.....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización del agua de lluvia y criterios de reutilización.....	19
Tabla 2. Caracterización de las aguas grises domésticas y criterios de reutilización.....	24
Tabla 3. Granulometría de la capa de soporte de un filtro lento de arena.....	33
Tabla 4. Velocidad de filtración de acuerdo con el número de procesos preliminares.....	34
Tabla 5. Criterios de selección de procesos en función de la calidad de la fuente.....	36
Tabla 6. Componentes del filtro lento de arena.....	53
Tabla 7. Componentes del filtro grueso de grava.....	55
Tabla 8. Componentes del filtro de carbón activado granular.....	56
Tabla 9. Parámetros considerados para la evaluación de los sistemas de depuración.....	59
Tabla 10. Eficiencia de ahorro anual de agua potable.....	66
Tabla 11. Caracterización del agua de lluvia almacenada.....	68
Tabla 12. Caracterización de las aguas grises provenientes del aseo personal.....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas de cosecha de agua pluvial empleados en la antigüedad..	12
Figura 2. Componentes de un sistema de cosecha de AP en vivienda..	13
Figura 3. Dispositivo interceptor de primeras lluvias.....	14
Figura 4. Sistema empleado para la potabilización de agua pluvial.....	16
Figura 5. Sistema automatizado de cosecha de agua pluvial.....	17
Figura 6. Abastecimiento de AP en función de la capacidad de almacenamiento..	20
Figura 7. Características de las AG domésticas provenientes de distintos usos..	23
Figura 8. Sistema de desvío para reutilizar el agua proveniente del lavabo.....	25
Figura 9. Sistema electromecánico para el tratamiento de aguas grises.....	28
Figura 10. Elementos básicos de un filtro lento de arena.....	31
Figura 11. Filtro lento de arena para uso doméstico..	35
Figura 12. Ubicación geográfica de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca..	40
Figura 13. Dotación de agua potable para vivienda unifamiliar de nivel medio.....	42
Figura 14. Localización de las estaciones climatológicas consideradas..	44
Figura 15. Distribución diaria de la precipitación efectiva..	46
Figura 16. Proceso de acondicionamiento de agua pluvial..	48
Figura 17. Sistema de captación e intercepción de agua pluvial.....	49
Figura 18. Tanques de almacenamiento de agua pluvial.....	49
Figura 19. Sistema de depuración de agua pluvial.....	52
Figura 20. Tren de tratamiento de las aguas grises domésticas.....	54
Figura 21. Sistema de tratamiento de aguas grises.....	58
Figura 22. Utilización anual de AP considerando distintos niveles de precipitación..	61
Figura 23. Volúmenes máximos de almacenamiento dependiendo el nivel de demanda..	63
Figura 24. Ahorro anual de agua potable dependiendo el nivel de demanda.....	65
Figura 25. Remoción de turbiedad y contaminación microbiológica del AP cosechada..	71
Figura 26. Remoción de turbiedad, DQO y SDT de las aguas grises de regadera.....	74
Figura 27. Remoción de contaminación microbiológica de las aguas grises.....	75
Figura 28. Propuesta del sistema de acondicionamiento de agua pluvial..	77
Figura 29. Utilización anual de AP dentro de una vivienda unifamiliar nivel medio..	78
Figura 30. Propuesta del sistema de tratamiento de aguas grises.....	79

## NOMENCLATURA Y UNIDADES

AG	Aguas grises
AP	Agua pluvial
At	Área transversal (m <sup>2</sup> )
CAG	Carbón activado granular
Ce	Coefficiente de escurrimiento
CE	Conductividad eléctrica (μS/cm)
CF	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
COT	Carbono orgánico total (mg/L C)
CT	Coliformes totales (NMP/100 mL)
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L O <sub>2</sub> )
D	Demanda (L/hab*d)
DQO	Demanda química de oxígeno (mg/L O <sub>2</sub> )
E <sub>ahorro</sub>	Eficiencia de ahorro de agua potable (%)
FLA	Filtro lento de arena
P <sub>d</sub>	Precipitación interceptada (mm)
Pe	Precipitación efectiva (mm)
pH	Potencial de hidrógeno
P <sub>i</sub>	Precipitación media diaria (mm)
P <sub>n</sub>	Precipitación neta (mm)
Q	Gasto (m <sup>3</sup> /h)
SDT	Sólidos disueltos totales (mg/L SDT)
SST	Sólidos suspendidos totales (mg/L SST)
ST	Sólidos totales (mg/L ST)
V <sub>f</sub>	Velocidad de filtración (m/h)
V <sub>i</sub>	Volumen almacenado (L)

## 1. INTRODUCCIÓN

Factores tales como el incremento poblacional, la contaminación de fuentes naturales superficiales y subterráneas, así como el cambio climático, han ocasionado que el abastecimiento de agua apta para consumo humano se vea mermado tanto en cantidad como en calidad alrededor del mundo. Para enfrentar estos problemas de escasez, la sociedad actual busca fuentes alternas de suministro de agua, empleando para tal propósito sistemas de depuración de aguas residuales domésticas, así como el aprovechamiento de agua pluvial.

La cosecha de agua pluvial a nivel vivienda es una técnica empleada desde la antigüedad para proveer agua de uso humano; aunque a mediados del siglo XVIII esta práctica fue relegada a zonas rurales. Hoy en día, a causa de los problemas hídricos, se ha retomado como una práctica sustentable de abastecimiento incluso en zonas urbanas.

Asimismo, el agua potable, una vez que ha sido empleada en distintas actividades dentro de la vivienda, es desechada a través de los sistemas de alcantarillado. Al ocurrir una disminución en el suministro de agua, se presenta la necesidad de optimizar dicho recurso implementando técnicas de reutilización de aguas residuales, supliendo así el uso en aquellas actividades donde no se requiera agua de calidad potable. Teniendo en cuenta lo anterior, se proponen sistemas separados de eliminación de aguas negras y aguas grises, con el fin de tratarlas por separado. Dentro de las prácticas de reutilización de aguas residuales, se les da mayor atención a la reutilización de aguas grises, debido a que presentan una menor carga contaminante. Al implementar sistemas combinados de cosecha de agua pluvial (AP) y reutilización de aguas grises (AG) dentro de una vivienda, se reduce la demanda de agua potable proveniente de la red municipal y las descargas al sistema de alcantarillado, trayendo consigo diversos beneficios económicos y ambientales.

En el presente trabajo se analizó la posibilidad de emplear sistemas de filtración con arena, destinados al acondicionamiento de agua pluvial y el tratamiento de aguas grises domésticas provenientes del aseo personal, debido a su simplicidad y bajo costo de construcción y mantenimiento. Datos referentes a demanda de agua potable y la precipitación fueron determinados tomando como base una vivienda de nivel medio, ubicada en Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

## **2. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO**

El crecimiento poblacional, aunado a la contaminación y sobreexplotación de las fuentes naturales de agua, han propiciado que el abastecimiento de agua potable en los asentamientos urbanos presenten una notoria disminución tanto en calidad como en cantidad del suministro.

Una alternativa para afrontar la escasez del recurso hídrico, es considerar fuentes alternas de suministro; para satisfacer la demanda se contempla el uso eficiente del agua empleando los recursos disponibles y de fácil acceso. El agua pluvial es un recurso importante del cual se puede disponer para satisfacer la demanda de agua por parte de las comunidades que presenta situaciones de escasez.

Asimismo, las aguas residuales domésticas (especialmente las aguas grises) se consideran también como una fuente alterna de suministro. Este tipo de aguas pueden ser empleada, tras recibir tratamiento, en aquellos usos que no requieran agua de calidad potable (Li et al., 2009).

Al emplear estas técnicas, tanto independientes como combinadas, se tiene menor dependencia al sistema municipal de agua potable, conllevando una menor explotación de las fuentes naturales de suministro y reduciendo con ello las descargas de aguas residuales (Furumai, 2008; Ghisi y Mengotti, 2007; Li et al., 2010; Muthukumaran et al., 2011).

### **2.1. Cosecha de agua pluvial**

Un sistema de cosecha de agua pluvial (AP) se refiere a las estructuras empleadas para la captación, recolección, conducción y almacenamiento del agua pluvial para su uso posterior (Helmreich y Horn, 2009; Li et al., 2010).

Desde la antigüedad, el hombre ha empleado el agua de lluvia para abastecer sus requerimientos diarios, mediante la construcción de estructuras destinadas a la captación (en patios y tejados) y almacenamiento de agua pluvial. Ejemplo de ello son los aljibes construidos en la antigua Roma, además del chultún (contracción de chulub=agua de lluvia, tun=piedra) implementado por la cultura maya en la península de Yucatán, los cuales consistían en depósitos subterráneos en forma de botellón teniendo las paredes recubiertas con

varios aplanados de estuco para hacerlas impermeables. Dichos sistemas eran empleados para obtener agua para uso y consumo humano dentro de las viviendas (Figura 1). Aunque a mediados del siglo XVIII esta práctica fue relegada a zonas rurales debido a su simplicidad técnica; hoy en día, a causa de los problemas hídricos que enfrenta la sociedad, se ha retomado como una práctica sustentable de abastecimiento de agua incluso en zonas urbanas.

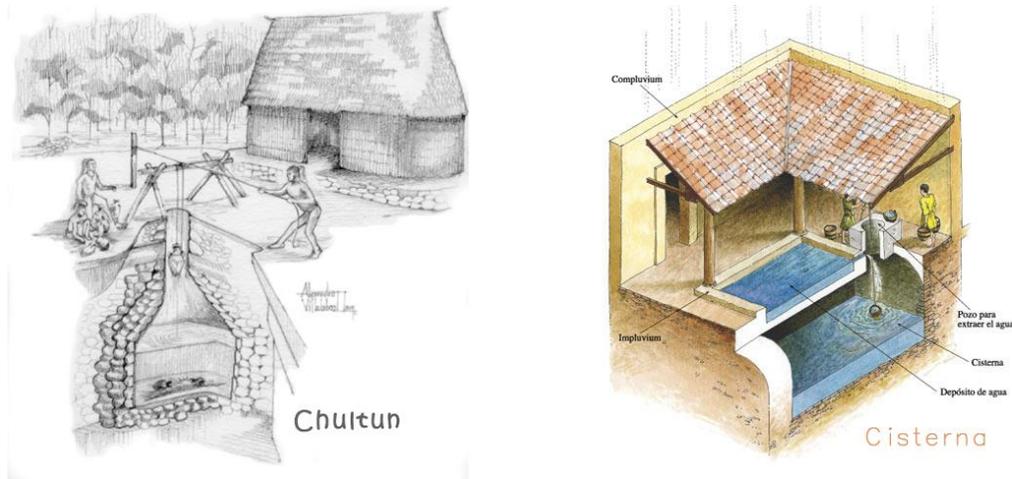


Figura1. Sistemas de cosecha de agua pluvial empleados en la antigüedad

Fuente: Hidrología Sostenible (2013)

Los sistemas de cosecha de agua pluvial a nivel doméstico consisten en captar el agua de lluvia en una superficie determinada, generalmente el techo o azotea de la vivienda, siendo conducida a través de canaletas y bajantes, para almacenarse posteriormente en un depósito o cisterna. El agua de lluvia, una vez que ha recibido tratamiento, es distribuida a través de un circuito hidráulico independiente de la red de agua potable (Li et al., 2010). Los componentes típicos de esta clase de sistemas se muestran en la Figura 2.

Los usos domésticos en los que se puede emplear el agua pluvial son aquellos que no requieren agua de calidad potable: lavadora, inodoro, limpieza de la casa, lavado de autos y riego del jardín (Ghisi y Mengotti, 2007; Li et al., 2010). Además, al ser un agua generalmente muy blanda, al emplearse en el lavado de ropa, proporciona un ahorro considerable de detergentes y jabones.

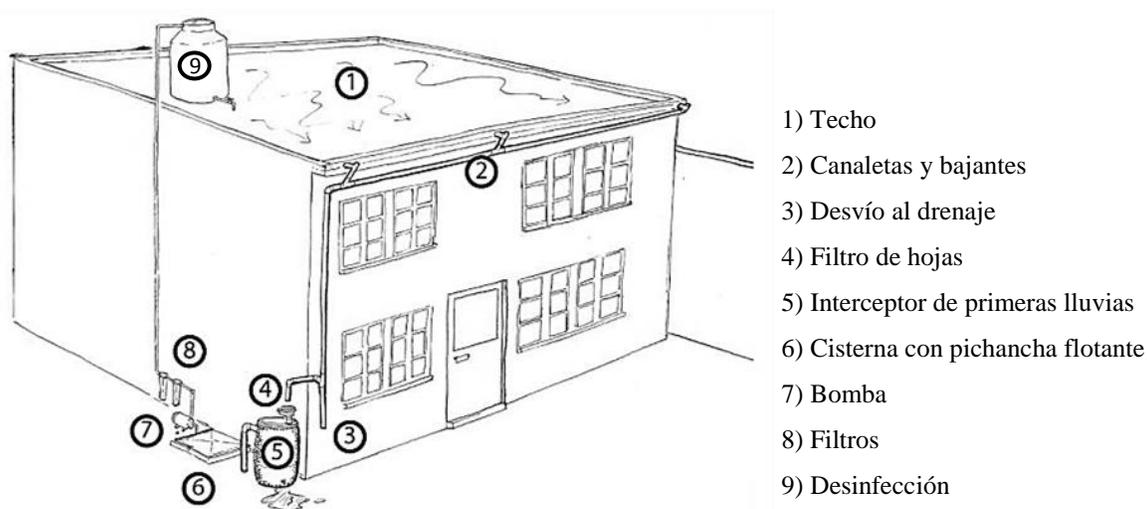


Figura 2. Componentes de un sistema de cosecha de AP en vivienda

Fuente: IRRI (2013)

El agua de lluvia es captada en el techo de la vivienda, permitiendo que el agua se dirija y baje por canales, preferentemente cubiertos con malla metálica para evitar la acumulación de hojas secas y otros sólidos; y luego descienda por tubos a un desvío de drenaje, el cual permite omitir las primeras lluvias de la temporada, ya que éstas presentan una alta carga contaminante debido a la deposición de pequeños escombros, hojas y polvo depositados durante la época de estiaje. Después de los primeros tres o cinco aguaceros, se cierra el desvío y el agua recolectada es enviada al sistema, en donde pasa por un primer filtro para quitar hojas y ramas.

Posteriormente llega a un dispositivo interceptor de primeras lluvias (Figura 3), que intercepta la parte más contaminada de cada aguacero. Entre las ventajas de instalar un interceptor de primeras lluvias están las de poder remover tanto contaminantes disueltos, como suspendidos. Por cada milímetro de las primeras lluvias separadas, la concentración de contaminantes se remueve un 50%. Es decir, por cada litro separado por metro cuadrado, se reduce la contaminación a la mitad (Isla Urbana, 2014). Esto permite que el agua de mejor calidad sea dirigida al tanque de almacenamiento (Helmreich y Horn, 2009).

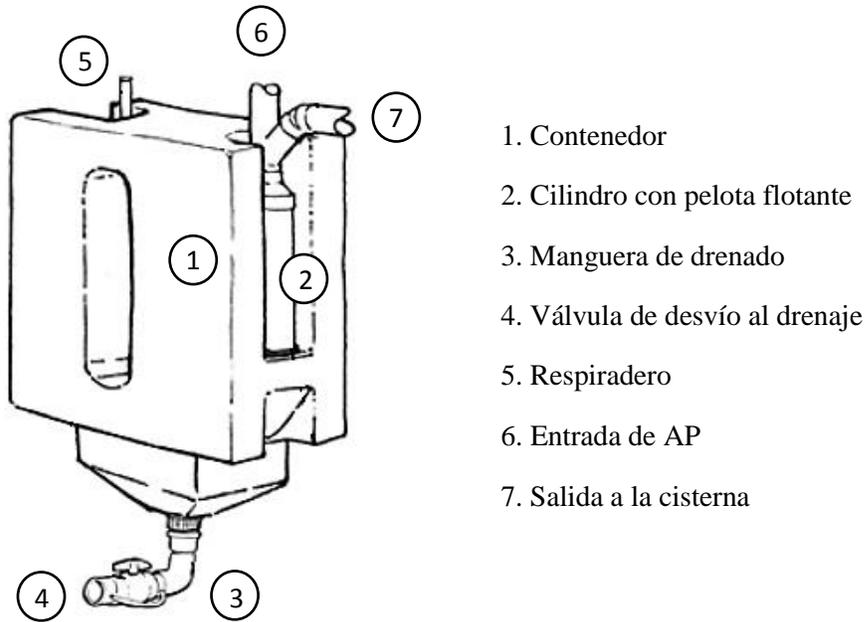


Figura 3. Dispositivo interceptor de primeras lluvias

Fuente: Isla Urbana, 2014

Los tanques de almacenamiento pueden ser cisternas de concreto, tanques de plástico o de acero galvanizado; garantizando siempre su hermeticidad para que no entre aire, luz (para evitar la proliferación de algas) ni materia orgánica, así como evitar la intromisión de animales. Para grandes volúmenes de almacenamiento, pueden emplearse tanques de polietileno, los cuales son compactos pero tienen una gran capacidad de almacenamiento (Helmreich y Horn, 2009).

Por medio de una pichancha flotante se saca el agua de la cisterna, pero sólo la que se encuentra en la parte superior, es decir, la menos contaminada evitando de esta manera bombear el agua con sedimentos acumulados en el fondo de la cisterna. Luego, el agua pasa por medio de una bomba a dos filtros más: un filtro (hilado o plisado) que elimina sedimentos de hasta 50 micras, y otro de carbón activado que remueve diversos químicos y compuestos orgánicos (sabor y olor).

El agua pasa finalmente al tinaco, donde se realiza la desinfección por medio de cloro (1 L de cloro por cada 8,000 L de agua), desde donde se distribuye en la casa para riego de jardines, limpieza, inodoros, regaderas y lavabos (Isla Urbana, 2014).

El método de desinfección más común y fácil de aplicar es la cloración, siendo efectuada una vez que el agua ha sido removida del tanque de almacenamiento, debido a que el cloro puede reaccionar con la materia orgánica sedimentada en el fondo del tanque, generando subproductos no deseados. Algunos parásitos pueden ser resistentes a bajas dosis de cloro, lo cual representa una limitante. El agua captada por este sistema no es apta para beber o cocinar (Helmreich y Horn, 2009). Gracias a la instalación de un sistema de recuperación de agua de lluvia es posible ahorrar hasta un 50% del consumo de agua potable en una vivienda (IRRI, 2013).

Un tratamiento sencillo puede mejorar significativamente la calidad del AP colectada, mientras que el tratamiento para hacerla potable puede ser más sofisticado y costoso. Los métodos más sencillos pueden ser empleados en usos que no requieren una calidad potable (inodoros o riego). El AP sin tratamiento puede ser empleada únicamente para el riego de jardines (Kim et al., 2007). La filtración lenta con arena es un método barato para mejorar la calidad bacteriológica del agua cosechada, siendo a la vez un tratamiento biológico y un tratamiento físico. Un flujo constante de agua a través del filtro es esencial para garantizar su eficiencia (Helmreich y Horn, 2009).

El agua pluvial debe pasar por un proceso de filtración especial antes de ser empleada en usos de contacto directo (lavabo, regadera). Algunos sistemas comprenden trenes de tratamiento más complejos para potabilizar el agua pluvial. Son necesarios tratamientos más avanzados como la filtración por membrana y desinfección; son sistemas costosos y requieren de mucho mantenimiento. Se pueden utilizar diversas tecnologías asociadas al tratamiento y filtración de agua para su desinfección, entre ellas: ozonificación, luz ultravioleta, plata coloidal o filtros lentos de arena (Vélez, 2002).

Existen también sistemas de tratamiento de AP consistentes en una adsorción sobre carbón activado granular (CAG), seguido por una filtración por membrana (microfiltración de 0.5  $\mu\text{m}$ ), y finalmente una desinfección con UV. Esta clase de sistemas ocupa una prefiltración por membrana de 75  $\mu\text{m}$  de porosidad. Dicho proceso es apto para producir agua potable, en términos de calidad microbiológica, significando una barrera eficaz ante organismos patógenos y la mayoría de los contaminantes, reduciendo de igual manera la turbiedad (Naddeo et al., 2013).

La filtración por membranas (micro y nano filtración) permite obtener un agua apta para beber. A pasar por membranas con un tamaño de poro de 0.1  $\mu\text{m}$ . Protozoos, bacterias, algas y otros microorganismos pueden ser removidos eficientemente; sin embargo, el efluente puede contener ciertos virus (con tamaños menores a 100 nm); es por esto que esta clase de sistemas deben ser complementados con un proceso de desinfección. Esta clase de sistemas requieren de continuo mantenimiento (Helmreich y Horn, 2009). En la Figura 4 se esquematiza una unidad de tratamiento de AP en la que se considera un sistema de bombeo, una filtración con arena y carbón activado, un proceso de esterilización mediante UV y cloración.

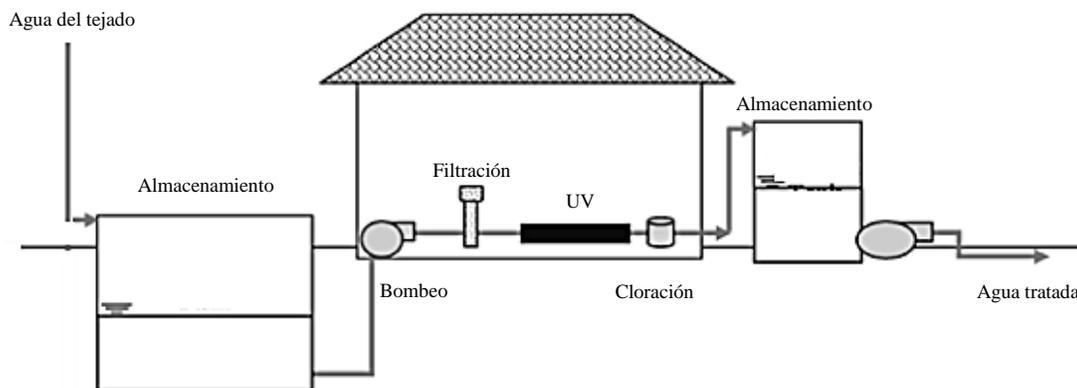


Figura 4. Sistema empleado para la potabilización de agua pluvial

Fuente: Gurung y Sharma (2014)

Existen también sistemas complejos empleados en países como Alemania, Australia y E.U.A., que emplean sistemas automatizados. El agua de lluvia se recoge en las canaletas, es conducida al depósito, posteriormente es filtrada y enviada al tanque de almacenamiento. Un control electrónico bombea el agua de lluvia para el inodoro, lavadora, limpieza o riego. Si se agota el agua de lluvia, el sistema automáticamente proporciona agua de la red hasta que vuelva a llover (Figura 5).

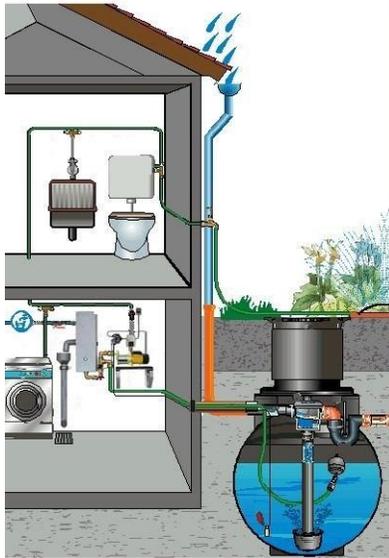


Figura 5. Sistema automatizado de cosecha de agua pluvial

Fuente: Aplaqua (2013).

El agua de lluvia, a pesar de no ser potable, posee una gran calidad, ya que contiene una concentración muy baja de contaminantes en comparación con otras fuentes de suministro. La calidad del AP cosechada depende principalmente de dos factores: las condiciones atmosféricas y las características de la superficie de captación. Dependiendo de las condiciones atmosféricas, el agua de lluvia presenta un nivel bajo de contaminantes (partículas suspendidas, metales pesados, microorganismos y sustancias orgánicas) que se encuentran suspendidos en la atmósfera, son barridos por durante la precipitación (Helmreich y Horn, 2009).

El agua de lluvia en zonas rurales, alejadas de la contaminación atmosférica e industrial, presenta una mayor calidad, excepto por algunos gases disueltos. En cambio, las zonas urbanas son caracterizadas por tener una mayor concentración de partículas suspendidas, metales pesados y contaminantes orgánicos debida a la presencia de industrias y el tránsito de automóviles. Además, estos factores tienen una gran influencia sobre el pH del agua de lluvia.

El agua de lluvia normal es ligeramente ácida, debido a que el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del aire se disuelve en el agua que cae, formando ácido carbónico, dando a la mezcla formada un pH de aproximadamente 5.6 en las concentraciones típicas atmosféricas de  $\text{CO}_2$ . Incluso en

áreas mínimamente afectas por la contaminación humana, el pH de la lluvia puede variar de 4.5 a 5.0. Las áreas volcánicas podrían experimentar más lluvia ácida debido a los compuestos en base a azufre que se liberan en la atmósfera por la actividad volcánica.

En áreas no volcánicas, la precipitación ácida suele ser causa de la contaminación humana. Las chimeneas de los complejos petroquímicos e industriales, las termoeléctricas, los motores de combustión interna de coches y aviones, vierten a la atmósfera principalmente dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxido de nitrógeno (NO), contaminantes que contribuyen en gran parte a la formación de lluvia ácida, en un 70 y 30% respectivamente. Estos contaminantes se elevan hasta alcanzar las capas superiores de la atmósfera, donde en ocasiones pasan a formar parte de las nubes como núcleos de condensación de las gotas de lluvia, para luego transformarse en ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), por medio de los procesos de oxidación e hidrólisis, lo que origina que disminuya el pH del agua de lluvia (INECC, 2014).

En zonas con la atmósfera contaminada por estas sustancias acidificantes, la lluvia tiene valores de pH de hasta 4 o 3, lo que indica un grado de acidez muy alto, esto es lo que se conoce como lluvia ácida, denominación con la que se designa cualquier agua de lluvia con un pH menor al natural (5.6). Incluso, la variación del clima (dirección y velocidad del viento) puede tener gran impacto sobre la calidad química y microbiológica del agua de lluvia cosechada, microorganismos y contaminantes químicos transportados por el aire (Evans et al., 2006).

El material con el que esté fabricada la superficie de captación (techo de la vivienda) también tiene gran influencia en la calidad del agua de lluvia cosechada (Mendez et al., 2011; Farreny et al., 2011). El agua de lluvia que escurre por el tejado hacia las canaletas y bajantes puede estar contaminada por bacterias y otros contaminantes como metales pesados y sustancias orgánicas. La presencia de microorganismos patógenos (bacterias, virus, protozoos y helmintos) puede originarse por la contaminación fecal de aves, pequeños mamíferos y reptiles que tienen acceso al área de captación.

Los techos fabricados con acero galvanizado son las más adecuadas para su aplicación en sistemas de cosecha de AP, mostrando una buena calidad fisicoquímica. Su principal inconveniente es una potencial contaminación por metales. En cuanto a la calidad

microbiológica del agua cosechada, los techos fabricados en acero galvanizado y tejas de barro presentan los mejores rendimientos (Lee et al., 2012; Mendez et al., 2011). En la Tabla 1 se muestra la caracterización del AP, así como criterios para su reutilización en usos domésticos que no requieren de calidad potable (uso en inodoros).

Tabla 1. Caracterización del agua de lluvia y criterios de reutilización

Parámetro	Unidad	Vialle et al. (2011)	Reutilización inodoro Moreira et al. (2012)
pH	-	6.5 ± 1.1	6 - 9
Temperatura	°C	14.9 ± 4.8	-
Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	3.21 <sup>a</sup>	-
Acidez	mg/L CaCO <sub>3</sub>	5.16 <sup>a</sup>	-
Conductividad	µS/cm	56.2 ± 45.5	-
Turbiedad	UNT	2.4 ± 1.4	< 5
Carbono orgánico total	mg/L C	2.3 ± 1.0	-
Cloruros	mg/L Cl <sup>-</sup>	1.9 ± 0.98	-
Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.9 ± 0.92	-
N-Nitratos	mg/L N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2.8 ± 1.6	-
Fosfatos	mg/L PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.17 ± 0.14	-
Magnesio	mg/L Mg	0.27 ± 0.15	-
Calcio	mg/L Ca	4.4 ± 4.0	-
Sodio	mg/L Na	1.1 ± 0.59	-
Coliformes fecales	NMP/100mL CF	-	< 1000

<sup>a</sup> Gallego (2010)

Los datos obtenidos por Vialle et al. (2011) corresponden a una villa rural ubicada al sureste de Francia (760 mm de precipitación media anual), la superficie de captación corresponde a un techo fabricado de tejas; mientras que Gallego (2010) se refiere al agua pluvial proveniente de un techo fabricado de acero galvanizado (818 mm de precipitación media anual), en el municipio de Toluca, Estado de México.

Por otra parte, para el diseño apropiado de un sistema de cosecha de AP es necesario considerar parámetros como el nivel de precipitación en la zona de estudio, el área disponible para realizar la captación, el volumen de almacenamiento y la demanda de agua dentro de la

vivienda que se desea suplir (Mun y Han, 2012). El resultado de este diseño es el dimensionamiento del tanque de almacenamiento, dado que su capacidad, junto con el nivel de demanda, regirá el tiempo en que será posible hacer uso del agua de lluvia para suplir determinados usos dentro de la vivienda. La Figura 6 muestra el comportamiento de la demanda de agua satisfecha en función del tamaño del tanque.

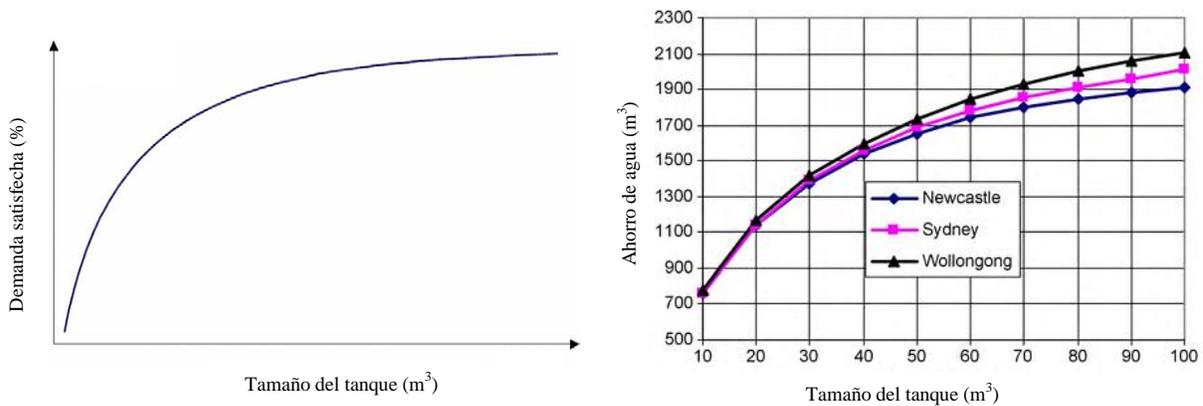


Figura 6. Abastecimiento de AP en función de la capacidad de almacenamiento

Fuente: Eroksuz y Rahman (2010)

La ventaja de un tanque no es estrictamente proporcional a su tamaño. La razón es que un tanque más pequeño será llenado y vaciado a menudo, mientras que un tanque de mayor capacidad cumplirá dicho ciclo con menor frecuencia (Helmreich y Horn, 2009).

Así pues, la cosecha de AP presenta las siguientes ventajas:

- El agua de lluvia provee una fuente de agua cuando en temporada de estiaje
- Son sistemas de sencilla instalación y requieren de bajo mantenimiento.
- Ahorro en el consumo de agua potable proveniente de la red municipal
- Uso de un recurso gratuito
- Reduce los escurrimientos de agua pluvial en calles y en el sistema de drenaje. Lo cual conlleva una menor probabilidad de inundaciones en zonas urbanas
- Ahorra recursos en la extracción, purificación y transporte de agua potable obtenida de fuentes naturales

Desventajas de la cosecha de AP:

- El costo inicial de la construcción o adecuación al sistema puede llegar a ser una inversión fuerte; 50-70% del costo se refiere al tanque de almacenamiento (Li et al., 2010).
- La disponibilidad del agua es limitada por la cantidad de precipitación pluvial en cada ciudad, por el tamaño de la superficie de captación y por el tamaño de la cisterna. Pueden ser necesarias fuentes suplementarias de agua en algunas temporadas del año (Furumai, 2008).

## **2.2. Reutilización de aguas grises domésticas**

Las aguas residuales domésticas se dividen en dos grandes clases: aguas negras (AN) y aguas grises (AG). Las aguas negras son aquellas provenientes de inodoros y mingitorios, las cuales contienen una alta carga contaminante (organismos patógenos). Las AG representan un 50-80% de las aguas residuales domésticas (Al-Jayyousi, 2003; Instituto Nacional de Ecología, 2009).

Las aguas grises o jabonosas se generan en las actividades cotidianas de aseo personal y del hogar. Las AG son aquellas que provienen de lavaplatos, fregaderos, lavabos, regaderas, tinas, lavaderos y lavadoras (Winward et al., 2008; Hernández Leal et al., 2011). Otros autores las subdividen en dos clases: AG con baja carga contaminante: lavabo y regadera (50-60% de las AG), y alta carga contaminante: provenientes de la cocina y el lavado de ropa (Ramon et al., 2004; Friedler, 2004). Las aguas jabonosas suelen contener cabello, champús, tintes, pasta de dientes, pelusas, aceites corporales, residuos sólidos, cloro, detergentes y demás productos de limpieza, también pueden contener contaminación de virus y bacterias.

Según Al-Jayyousi (2003), las características de las AG varían en función de la fuente donde provengan; presentan una alta variación dependiendo de los estilos de vida de una persona, su edad, los productos que emplea en sus actividades diarias, sus usos y costumbres; además de la geografía y el clima de la región. Adicionalmente, el uso de cada fuente se caracteriza por su frecuencia y duración de descarga, existiendo una variabilidad de volumen y carga

contaminante. En general, el agua proveniente del aseo personal (regadera y lavabo), contribuyen en un 51% del volumen de AG reutilizable, mientras que el agua proveniente del lavado de ropa contribuye a un 42% de dicho volumen.

El agua residual proveniente de la cocina también puede considerarse como una fuente de AG, aunque presenta una alta carga de contaminantes: partículas de comida, aceites de comida, grasa, detergentes y otros productos de limpieza.

Normalmente, las aguas grises no son tan peligrosas para la salud o el medio ambiente como las aguas negras (provenientes de los inodoros), pero sí contienen cantidades significativas de nutrientes (10-50% del fósforo y 10% del nitrógeno presente en las aguas residuales domésticas), materia orgánica (40% de la DQO) y bacterias (Li et al., 2009).

Las aguas grises domésticas, según la actividad de la cual provengan, tienen calidad variable; las AG más aceptadas para su reutilización son aquellas provenientes del aseo personal, casi siempre son las menos contaminadas (Al-Jayyousi, 2003). Un ejemplo de las características físicoquímicas y biológicas de las AG provenientes de una vivienda de nivel medio es el presentado por Vakil et al. (2014), el cual se muestra en la Figura 7.

Un factor que se debe tener en cuenta es el tiempo de almacenamiento de las aguas grises. La calidad de las aguas grises tiende a mantenerse estable durante las primeras 24 horas de almacenamiento. Las aguas grises no tienen mal olor inmediatamente después de ser descargadas, el problema inicia cuando las aguas quedan estancadas por un lapso mayor, ya que los microorganismos consumen rápidamente el oxígeno disponible y aumenta la presencia de bacterias anaeróbicas, que además de dar mal olor, podrían crear un ambiente propicio para el desarrollo de patógenos humanos (Instituto Nacional de Ecología, 2009).

Microorganismos patógenos como bacterias, virus, protozoos y parásitos pueden estar presentes en altas concentraciones en las AG, lo cual representa un riesgo para la salud. El riesgo para la salud asociado con la reutilización de AG puede ser minimizado al no permitir el contacto directo con las AG crudas, o bien mediante su tratamiento hasta llevarlas a un nivel adecuado para los usos previstos.

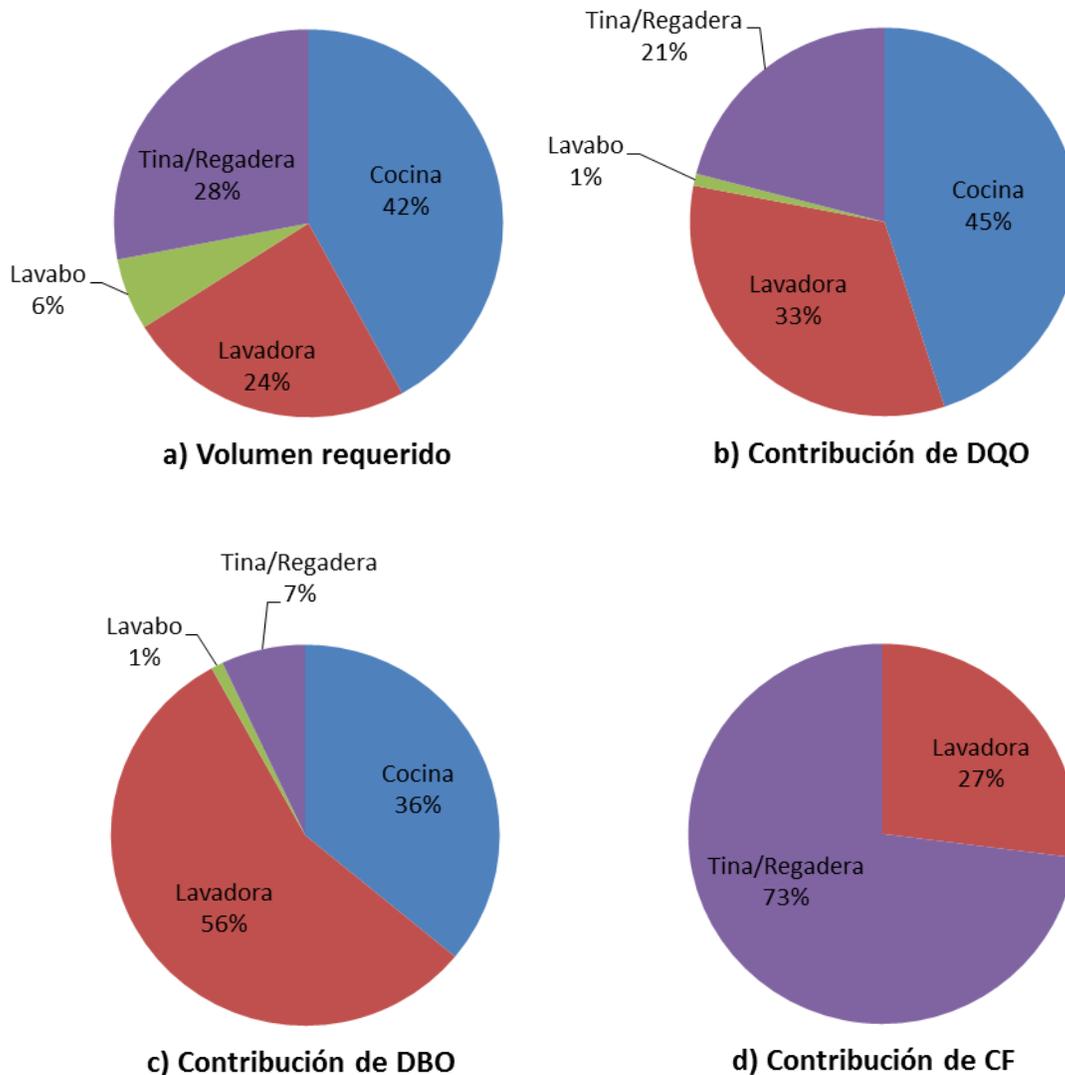


Figura 7. Características de las AG domésticas provenientes de distintos usos

Fuente: Vakil et al. (2014)

Las AG, tras recibir un tratamiento biológico o fisicoquímico, pueden ser reutilizadas en diversos usos que no requieren agua de calidad potable. A nivel vivienda, el más común de estos usos es emplearla para rellenar las cisternas de los inodoros (Liu et al., 2010; March et al., 2004; Mourad et al., 2011; Friedler y Gilboa, 2010). Pero también se pueden emplear para otros usos, como el riego de jardines o limpieza de exteriores (Al-Jayyousi, 2003). Las AG son una fuente de gran valor como abono para la horticultura (producción de hortalizas destinadas al consumo); el mismo fósforo, potasio y nitrógeno que convierte a las aguas grises en una

fuente de contaminación para lagos, ríos y aguas del terreno puede utilizarse de manera beneficiosa como excelentes nutrientes para el riego de plantas (Fernández, 2006). Al reutilizar las AG dentro de la vivienda, se reduce la demanda en el suministro de agua potable y disminuye la aportación de aguas residuales vertidas al sistema de alcantarillado (Al-Jayyousi, 2003). Logrando un 30 - 45% de ahorro en el consumo de agua potable (Fernández, 2006).

La tecnología adecuada para el uso de sistemas de agua gris depende del contexto en el que se instala; interviniendo factores como el clima, las regulaciones locales, el uso final que se le vaya a dar, entre otros. La manera más económica y sencilla de reutilizar AG es recolectar el agua manualmente mediante recipientes y aprovecharla directamente en el jardín (Instituto Nacional de Ecología, 2009).

Tabla 2. Caracterización de las aguas grises domésticas y criterios de reutilización

Parámetro	Unidad	Regadera Friedler (2004)	Reutilización inodoro Li et al. (2009)
Volumen	L	28 ± 18.8	-
pH	-	7.43 ± 0.36	6 - 9
Conductividad eléctrica	µS/cm	1565 ± 485	-
Color	Pt-Co	60-100 <sup>a</sup>	-
Turbiedad	UNT	60-240 <sup>a</sup>	< 5
Sólidos suspendidos totales	mg/L SST	303 ± 205	-
Sólidos disueltos totales	mg/L SDT	-	< 1500
Demanda química de oxígeno	mg/L O <sub>2</sub>	645 ± 289	-
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L O <sub>2</sub>	424 ± 219	< 10
Carbono orgánico total	mg/L C	120 ± 70	-
Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	24-43 <sup>a</sup>	-
N-NH <sub>4</sub>	mg/L	1.2 ± 0.83	< 10
Cloruros	mg/L Cl <sup>-</sup>	284 ± 167	-
Sodio	mg/L Na	151 ± 83	-
Cloro residual	mg/L Cl	-	> 1
Coliformes totales	NMP/100mL CT	500 - 2.4x10 <sup>7</sup> <sup>a</sup>	< 10000
Coliformes fecales	NMP/100mL CF	170 - 3.3x10 <sup>3</sup> <sup>a</sup>	< 1000

<sup>a</sup> AG provenientes del cuarto de baño (Christova-Boal et al., 1996)

## Sistemas de desvío

En esta clase de sistemas no se almacenan las AG (pueden incluir o no procesos de filtración y desinfección) antes de su uso inmediato. Estos incluyen sistemas que desvían las AG hacia el tanque de descarga del inodoro (Figura 8). Estos sistemas emplean algún tipo de filtración para interceptar pelusas, pelo, grasas, aceites, entre otros. Además también pueden incluir una etapa de desinfección, por ejemplo colocar tabletas de cloro dentro del tanque del inodoro para matar las bacterias.

Existen sistemas que permiten reutilizar el agua proveniente del lavabo, bombeándola hacia el depósito del inodoro; empleados principalmente en países europeos, además de Japón, Australia y E.U.A. Otros sistemas de desvío consisten en sistemas que dirigen las AG hacia el riego de jardines, y sistemas que desvían las AG hacia humedales construidos para su depuración (Allen, 2010).



Figura 8. Sistema de desvío para reutilizar el agua proveniente del lavabo

Fuente: Allen et al. (2010).

Cuando se requiere tratar agua grises con una mayor carga contaminante, tales como las aguas provenientes de la cocina y la lavadora, son requeridos sistemas más complejos para su tratamiento. En general, el tren de tratamiento que se emplea para la depuración de AG consiste en un pretratamiento, un tratamiento físico (filtración), químico (coagulación-

floculación) o biológico (humedal construido, bioreactor de membrana), y finalmente una desinfección (Li et al., 2009).

El pretratamiento comprende una prefiltración (mallas finas o filtros gruesos de grava), en la cual se separan las partículas de mayor tamaño (pelo, pelusas, etc.) además de un desengrasador-desarenador, el cual, por diferencia de densidades, separa por la parte superior las grasas y aceites y por la parte inferior las arenas y lodos (Kim et al., 2007).

En lo referente a la desinfección, el método más común para la desinfección del agua tratada es la cloración (Winward et al., 2008). Se realiza una etapa de cloración para su uso en riego; mientras que para su uso en la cisterna de inodoros se realiza una doble cloración. La esterilización mediante lámparas de luz ultravioleta (UV), elimina bacterias, virus y protozoos (Friedler et al., 2011); el agua tratada queda libre de olores y es apta para su conservación a largo plazo (Gilboa y Friedler, 2008; Friedler y Gilboa, 2010).

### **Sistema de bio-filtros**

El filtro jardinera es un pequeño humedal construido con fragmites (plantas de pantano) que permite la reutilización del agua para riego. Las hay de muchos tipos, pero de los más fáciles de construir, son las llamadas bio-jardineras o bio-filtros con adecuaciones sencillas para su instalación en la vivienda (Paulo et al., 2013).

El agua gris contiene nutrientes como nitrógeno y fósforo, que vienen principalmente de los detergentes y jabones. Los fragmites toman estos nutrientes del agua y los aprovechan para su crecimiento (Dallas y Ho, 2005). Incorporando el sistema de filtros-jardinera, se puede reutilizar hasta un 70% del agua que ingresa al filtro. El efluente puede ser utilizado para riego de árboles, jardines o plantas de ornato. Del 30% restante, las plantas utilizan una parte para su crecimiento y otra parte se pierde por evaporación (Paulo et al., 2013).

Estas características hacen de los bio-filtros jardinera una opción eficiente, sencilla y de bajo costo para el ahorro y aprovechamiento del agua en los hogares. Estos sistemas naturales tienen la ventaja respecto de los sistemas electromecánicos de tratamiento de que requieren de poca o ninguna energía para funcionar (Liu et al., 2010). Los tiempos largos del proceso de depuración, así como el hecho de que el proceso se limita a la profundidad de penetración de

las raíces (aguas poco profundas, 0.5 m), son sus limitaciones; además, puede existir proliferación de mosquitos debido a su mal diseño u operación (Kivaisi, 2001).

### **Sistema básico de dos etapas**

Otro sistema empleado para tratar aguas grises residuales, usado comúnmente en el Reino Unido, es la filtración con arena seguido por una desinfección por cloro, ya sea en gránulos o en solución (Li et al., 2010). Sin embargo, debe poner especial atención cuando el agua tratada por el filtro presenta una alta carga orgánica y turbidez, lo que limita la eficiencia del proceso químico de desinfección (Liu et al., 2010). Estos sistemas emplean tiempos de residencia cortos. Debido a la presencia de materia orgánica en el efluente, pueden generarse subproductos de desinfección (Al-Jayyousi, 2003; Winward et al., 2008). Dicho sistema presenta valores de remoción de sólidos suspendidos, DQO, DBO del 65,38 y 10% respectivamente (Friedler et al., 2006).

### **Filtración directa**

Sistema electromecánico en el cual el proceso de filtración se realiza mediante una membrana de microfiltración, la cual retiene las partículas suspendidas mayores a 0.5  $\mu\text{m}$ , presentándose baja turbidez y bajos niveles de coliformes en el efluente, además existen otros procesos de ultrafiltración (0.05  $\mu\text{m}$ ) y nanofiltración (Ramon et al., 2004; Li et al., 2009). La demanda de energía por parte de estos sistemas de membrana es alta (Jefferson et al., 2000), la cual se incrementa debido a la colmatación de la superficie de la membrana por los contaminantes (Nghiem et al., 2006). Este sistema presenta dificultades en su limpieza, ocasionando una disminución en la calidad del agua tratada (Al-Jayyousi, 2003). El agua, una vez filtrada, debe ser desinfectada para su almacenamiento y posterior reutilización.

### **Bioreactor de membrana (MBR)**

Este es un sistema electromecánico que combina un proceso de degradación biológica aerobia (típicamente un sistema de lodos activados) con una filtración por membrana (membranas de microfiltración: 0.5  $\mu\text{m}$ ). La membrana retiene prácticamente la totalidad de los sólidos en suspensión y la biomasa, logrando de esta manera un efluente de alta calidad. Presentan una alta calidad en el efluente, con valores de DQO < 10 mg/L (Merz et al., 2007; Hocaoglu et al.,

2013; Santasmasas et al., 2013). Su elevado costo energético limita su utilización en viviendas unifamiliares (Al-Jayyousi, 2003).

En países como E.U.A., Japón, Australia, Alemania, Canadá y Reino Unido, se han desarrollado sistemas electromecánicos destinados a la reutilización de aguas grises dentro de las viviendas (Al-Jayyousi, 2003). Estas instalaciones constan de unas tuberías independientes por donde circulan las aguas grises procedentes del aseo personal (lavabo, regadera) hasta llegar a unos depósitos que recolectan y tratan el agua. Tras recibir un tratamiento, el agua depurada es enviada a tanques de almacenamiento, desde los cuales se suministran a las cisternas de los inodoros, para el riego del jardín o la limpieza de exteriores (Fernández, 2006). Estos sistemas automatizados (Figura 9) requieren de tratamiento con filtros y desinfección, y de bombas para su distribución, haciendo que la instalación y el mantenimiento de estos sistemas sea costoso (Marsilli, 2005; Instituto Nacional de Ecología, 2009).



Figura 9. Sistema electromecánico para el tratamiento de aguas grises

Fuente: Pontos (2010)

Los equipos electromecánicos de reutilización de aguas grises se instalan principalmente en los sótanos o azoteas y por lo general funcionan de manera automatizada, dando un servicio continuo y con poca intervención de un operador. Dichos sistemas pueden llegar a conseguir ahorros en consumo de agua hasta un 90% (Apliaqua, 2013).

### **2.3. Filtración lenta con arena**

La filtración es el proceso mediante el cual la materia en suspensión es separada del agua haciéndola pasar a través de un medio poroso, generalmente arena. Las partículas pueden separarse de las aguas crudas mediante filtros rápidos o filtros lentos. La diferencia entre ellos va más allá de la velocidad de la tasa de filtración, puesto que la filtración lenta con arena es, en esencia, un proceso biológico, mientras la filtración rápida es un proceso físico. El principal carácter distintivo de los filtros rápidos de arena, consiste en la eliminación de sólidos suspendidos, empleando velocidades de filtración por arriba de los 20 m/h.

Los filtros lentos de arena (FLA) operan con bajas velocidades de filtración (0.1 – 0.5 m/h) (Zheng et al., 2009). Para evitar la pronta colmatación del medio filtrante, la filtración lenta requiere bajos niveles de turbiedad en el influente (por debajo de 20 UNT, preferentemente por debajo de 10 UNT), para lo cual puede requerir de cierto pretratamiento para reducir la carga de sólidos suspendidos, tal es el caso de filtros gruesos de grava. Pueden tolerarse en el agua cruda turbiedades de 100 a 200 UNT solo por unos pocos días. Turbiedades de más de 50 UNT son aceptables solo para unas pocas semanas (Montgomery, 1985). Si el agua cruda presenta altos niveles de turbiedad (> 50 UNT), pueden utilizarse prefiltros con medio de filtración de grava gruesa o piedras machacadas. La prefiltración consiste en un proceso físico diseñado para remover sólidos suspendidos relativamente grandes y para reducir la turbidez.

La arena fina, y la lenta tasa de filtración, facilitan el establecimiento de una comunidad de microorganismos en la capa superior del filtro. Considerando que el mecanismo de purificación en un filtro lento de arena es esencialmente un proceso biológico, su eficiencia depende de una comunidad biológica denominada *schmutzdecke* (World Health Organization, 2006), la cual requiere de los nutrientes y oxígeno disuelto presentes en el agua residual; por lo tanto, los filtros deben operar a un nivel (flujo) constante manteniendo húmedo el lecho de arena (totalmente sumergido). Cuando la operación se detiene, los microorganismos causantes de degradación bacteriológica de las impurezas atrapadas, pierden su efectividad. Operaciones intermitentes perturban la continuidad necesaria para una actividad biológica eficiente, aunque algunos estudios han mostrado la eficiencia de los filtros lentos de arena aun trabajando en batch: remoción de turbiedad (89%), virus (71%) y bacterias 96% (Jenkins, 2011).

Cuando el agua circula a través del filtro, la capa biológica recibe oxígeno en la parte superior de la arena por medio del oxígeno disuelto en el agua. Durante los tiempos de descanso, cuando el agua no está circulando, el oxígeno se obtiene por la difusión del aire y la mezcla conectiva lenta de la capa de agua sobre la arena. Si esta capa se mantiene poco profunda, el oxígeno necesario puede pasar a los microorganismos para mantenerlos vivos.

La capa biológica (*schmutzdecke*) conocida como biofilm o biopelícula, está constituida por algas filamentosas, diatomeas, protozoarios (amebas, flagelados, ciliados), rotíferas y bacterias. El desarrollo de estos organismos responsables de la acción biológica se concentra casi exclusivamente en la superficie del lecho de arena, alcanzando como máximo una profundidad de 2 a 3 cm (Ellis y Aydin, 1995). La capa de *schmutzdecke* se forma en la superficie del lecho de arena, donde las partículas suspendidas son retenidas y la materia orgánica es degradada biológicamente. A medida que la capa biológica trabaja durante el ciclo de filtración, ésta asume el rol dominante en la filtración más que en el medio granular.

Las aguas con muy bajo contenido de nutrientes pueden perjudicar el retiro de la turbiedad, puesto que algunos nutrientes deben de estar presentes para promover el crecimiento del ecosistema biológico dentro de la cama de filtro. La maduración del filtro (desarrollo de la capa *schmutzdecke*) puede llevarse a cabo en plazo de unos cuantos días o hasta meses, dependiendo de la cantidad de nutrientes y materia orgánica presentes en el agua cruda (World Health Organization, 2006).

Los filtros lentos son eficientes en el retiro de partículas suspendidas, presentando niveles por debajo de 1.0 unidades nefelométricas de turbiedad (UNT) en el efluente; además, reducen considerablemente el número de microorganismos (bacterias, virus y quistes) presentes en el agua. Alcanzando tasas de eliminación del 99.5% para bacterias, 99% para virus, 99% para protozoos y del 100% para helmintos, bajo condiciones óptimas de maduración, limpieza y con ausencia de cortocircuitos. Ofreciendo además un retiro virtualmente completo de los quistes *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium oocyst* (Montgomery, 1985). Cuando estos sistemas están bien diseñados, operados y bajo un mantenimiento adecuado, el efluente requiere de dosis muy bajas de cloro como última barrera; prácticamente sólo para asegurar que el agua conserve su calidad bacteriológica durante el almacenamiento y distribución del agua. Es por esto que la desinfección con cloro se hace como una medida de seguridad, por si

algún microorganismo logró superar el filtro. De ahí, que la dosis que se aplica es baja, máximo, del orden de 0,5 –1,0 mg/L (Prada, 2001).

Con el tiempo, los intersticios de la capa superficial de la arena se van obstruyendo, y se hace necesaria su renovación, mediante el raspado de la capa de arena. Periódicamente, se retiran y sustituyen los 5 centímetros de la superficie de arena que contienen los sólidos acumulados. Un filtro lento de arena debe ser limpiado cuando la arena fina se obstruya, lo cual es medido por la pérdida de presión. El periodo de tiempo entre las limpiezas (carrera del filtro) puede variar desde varias semanas a meses, dependiendo de la calidad del agua que se quiere tratar.

Esta capa suele tornarse con el tiempo de color más oscuro, diferente al del comienzo del proceso, indicador que la capa superior se aproxima a la colmatación. La reposición total del lecho filtrante se hace después de 20 a 30 raspados cuando se llega a un espesor mínimo de 0.70 m. Cada 5 años se recomienda sacar el filtro, lavar el tanque y hacer un llenado con arena nueva (Montgomery, 1985).

Los componentes de un filtro lento de arena (Figura 10) son: un tanque o reservorio, una capa sobrenadante de agua cruda, un lecho filtrante (arena), una capa de soporte, un sistema de drenaje y dispositivos de regulación y control.

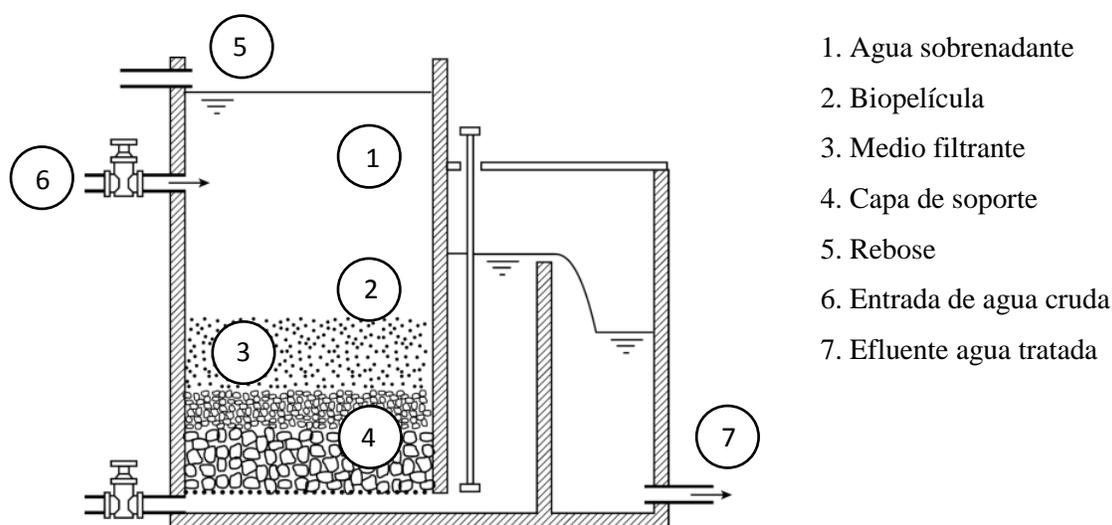


Figura 10. Elementos básicos de un filtro lento de arena

Fuente: World Health Organization (2006).

## **Tanque**

Las paredes del reservorio deben tener una altura suficiente como para dejar libre de 0.2 a 0.3 metros sobre el nivel del agua. Así mismo, el filtro debe contar con un vertedero de derrame o rebose que drene el exceso de agua. El nivel mínimo en el filtro se controla mediante el vertedero de salida, cuyo nivel deberá ser igual o mayor (0.10 -0.20 m) que el nivel del lecho filtrante. Esto con la finalidad de proteger la película biológica y evitar la proliferación excesiva de algas al producirse una descarga accidental del lecho durante la operación, al igual que para evitar la formación de presiones negativas. Las paredes interiores de la caja, en el tramo ocupado por el lecho filtrante, deberán presentar un acabado rugoso que impida la formación de cortocircuitos.

## **Capa sobrenadante de agua cruda**

Sirve para dos propósitos; primero, proporciona una carga suficiente para hacer que el agua cruda pase a través del medio filtrante; segundo, origina un tiempo de retención de varias horas, periodo durante el cual las partículas pueden sedimentar. Normalmente, la altura de la capa sobrenadante es de un metro. Se acostumbra mantener el nivel del agua sobrenadante a una altura constante. La altura del agua sobre el lecho filtrante podrá variar entre 1.0 y 1.5 m.

## **Lecho filtrante**

El medio filtrante debe estar compuesto por material granular inerte y durable. Normalmente se usa arena exenta de arcilla y libre de materia orgánica. La arena debe lavarse previamente, de manera que se eliminen los granos más finos, disminuyendo el coeficiente de uniformidad y elevando el diámetro promedio de los granos de arena. No debe contener más de 2% de carbonato de calcio y magnesio para evitar que se produzcan cavitaciones en el medio filtrante al ser atacados estos elementos por aguas con alto contenido de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Idealmente, el diámetro efectivo de la arena ( $D_{10}$ ) debe ser lo suficientemente pequeño para asegurar un efluente de buena calidad y para prevenir que la materia orgánica penetre a tal profundidad que no sea posible retirarla mediante el raspado de la superficie. Diámetro efectivo sea del orden de 0.15-0.35 mm. Se recomienda un diámetro efectivo mínimo de 0.10

mm para tratar aguas con alto contenido bacteriológico. Para aguas muy turbias, en cambio, se recomienda un diámetro efectivo de 0.40 mm.

Se recomienda un coeficiente de uniformidad (CU) menor de 3, para que los poros sean lo bastante regulares. Lo ideal es diseñar en un rango de 1.8 a 2.0, normalmente 1.5. El espesor mínimo del lecho filtrante es de 0.70 m. Se recomienda una altura de diseño de 1.20 a 1.40 m.

### **Capa de soporte**

Su función es evitar que se pierda el material a través del drenaje y asegurar una abstracción uniforme del agua filtrada, sobre todo cuando se ha previsto un número muy limitado de drenes. La capa de grava graduada debe diseñarse teniendo en cuenta dos valores límite: el tamaño de los granos de arena en contacto con ésta, para decidir el diámetro de la grava más fina, y las características del drenaje, para seleccionar el tamaño de la grava más gruesa. Las piedras deben ser duras y redondeadas, con un peso específico de por lo menos 2.5, libre de arena, limo y materia orgánica.

El sistema de drenes está cubierto por capas de grava, las cuales se tienden en capas, comenzando con los granos de mayor diámetro en el fondo y reduciendo progresivamente su tamaño hacia arriba. La grava impide que el material granular del lecho filtrante sea acarreado hacia el sistema de drenaje. En la Tabla 3 se presenta un tabulado en el que se muestran los diámetros y las alturas de las capas de grava que conforman la capa de soporte.

Tabla 3. Granulometría de la capa de soporte de un filtro lento de arena

Capas	Diámetro (mm)		Altura (cm)
	Mínimo	Máximo	
1	0.5 – 2.0	1.5 – 4.0	5
2	2.0 – 2.5	4.0 – 15.0	5
3	5.0 – 20.0	10.0 – 40.0	10

Fuente: Prada (2001)

## Sistema de drenaje

La recolección del agua filtrada se efectúa mediante el sistema de drenaje, el cual puede estar conformado por drenes principales y laterales contruidos de tuberías perforadas, bloques o ladrillos de concreto, etc. El dimensionamiento de los drenes se efectuará con el criterio de que la velocidad límite en cualquier punto de éstos no sobrepase de 0.30 m/s. La pérdida de carga producida por lo drenes no debe exceder de un 10% (5-15% como límites máximos) de la pérdida de carga del medio filtrante, cuando la arena está limpia y su altura es mínima (después de sucesivos raspados). Se podrán considerar velocidades mayores a medida en que se vayan considerando procesos preliminares al filtro (Tabla 4).

Tabla 4. Velocidad de filtración de acuerdo con el número de procesos preliminares

Procesos	$V_f$ (m/h)
Filtración lenta con arena (FLA)	0.10 – 0.20
Sedimentación (S) + FLA	0.15 – 0.30
Prefiltración (PF) + FLA	0.15 – 0.30
S + PF + FLA	0.30 – 0.50

Fuente: Prada (2001)

## Dispositivos de regulación y control

Normalmente se emplean los siguientes elementos: entrada de agua cruda al reservorio de agua sobrenadante hasta un nivel constante dentro del tanque del filtro; eliminación del exceso de agua por medio de un vertedero de derrame o rebose; drenaje del agua sobrenadante antes de efectuar la limpieza del filtro; regulación de la velocidad de filtración; ingreso de agua limpia para llenar de forma ascendente el lecho filtrante después de efectuar la limpieza del filtro; dispositivo de prevención de presiones negativas en el lecho filtrante; descarga del agua tratada al tanque de almacenamiento o al desagüe.

La disposición de los elementos en un filtro doméstico se muestra en la Figura 11.

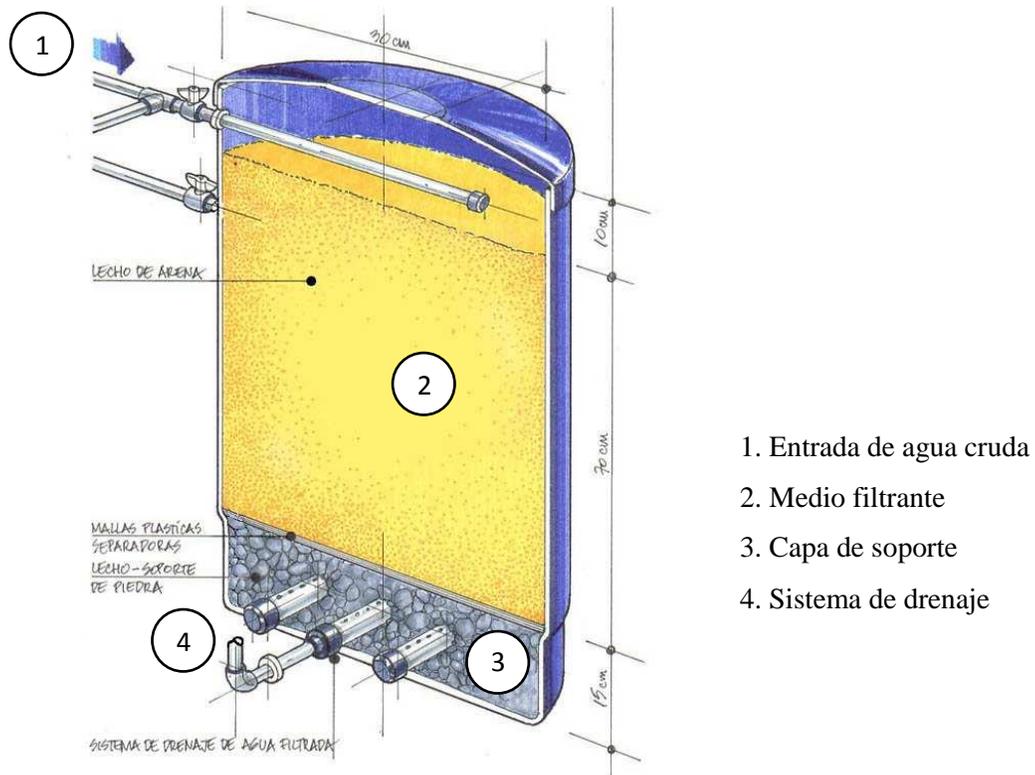


Fig. 11. Filtro lento de arena para uso doméstico

Fuente: Prada (2001)

### Condiciones del agua cruda

Las condiciones del agua cruda que más afectan la eficiencia del filtro son la temperatura, la concentración de nutrientes y de sustancias tóxicas y los afluentes con turbiedad y color altos.

*Temperatura:* Dado que en el filtro se desarrolla un proceso biológico, se ve afectado por las variaciones de temperatura; a medida que la temperatura decrece, la actividad biológica dentro de la cama de filtro disminuye. Puede reducir 50% de su eficiencia cuando se opera a menos de 5° C.

*Concentración de nutrientes:* La velocidad de desarrollo de la formación biológica en el filtro depende de la concentración de nutrientes en el agua, debido a que ésta es la fuente de alimentación de los microorganismos.

*Concentración de algas:* Las algas son importantes en la formación del schmutzdecke. Pero su crecimiento excesivo debido a la elevada disponibilidad de luz y nutrientes, como presencia de fosfatos y nitratos en el agua, puede crear serios problemas de operación y en la calidad de agua tratada. El control de la formación de algas es difícil, pero puede solucionarse mediante el control de nutrientes en la fuente y del efecto de la luz que cubre los reservorios de agua cruda.

*Concentraciones altas de turbiedad:* La capacidad de los filtros lentos para reducir la turbiedad cuando ésta es muy elevada es limitada. Ello se debe a que una alta turbiedad causa enlodamiento de la superficie del filtro, disminuye la capacidad de formación de la capa biológica y reduce drásticamente la duración de la carrera de filtración, lo cual además de afectar la calidad del agua producida, incrementa los costos de operación y mantenimiento. La Tabla 5 muestra algunos procesos que pueden ser implementados para la reducción de la turbiedad.

Tabla 5. Criterios de selección de procesos en función de la calidad de la fuente

Alternativas	Límites de calidad del agua cruda aceptables		
	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Filtro Lento de Arena (FLA)	$T_o \leq 50$ UNT $C_o \leq 50$ Pt-Co $CF \leq 10^4/100$ mL	$T_o \leq 20$ UNT $C_o \leq 40$ Pt-Co	$T_o \text{ max} \leq 100$ UNT
FLA + Prefiltro de grava (PG)	$T_o \leq 100$ UNT $C_o \leq 60$ Pt-Co $CF \leq 10^4/100$ mL	$T_o \leq 60$ UNT $C_o \leq 40$ Pt-Co	$T_o \text{ max} \leq 150$ UNT
FLA + (PG) + Sedimentador	$T_o \leq 300$ UNT $C_o \leq 60$ Pt-Co $CF \leq 10^4/100$ mL	$T_o \leq 200$ UNT $C_o \leq 40$ Pt-Co	$T_o \text{ max} \leq 500$ UNT

$T_o$  Turbiedad del agua cruda

$C_o$  Color del agua cruda

CF Coliformes Fecales

Fuente: Prada (2001)

Finalmente, la filtración lenta con arena presenta las siguientes ventajas:

- Es un método de tratamiento relativamente sencillo y poco costoso.
- Pueden tratar el agua y reducir la presencia de microorganismos (virus, bacterias) sin necesidad de productos químicos, presentan una buena calidad del efluente.
- No precisan energía eléctrica para funcionar ya que funcionan por gravedad (flujo descendente).
- La construcción, puesta en marcha, y el mantenimiento no requieren de personal altamente capacitado, siendo el usuario mismo quien realice dichas acciones.
- Los sistemas pueden hacer uso de materiales y de mano de obra local.
- Mínimos problemas de manejo de lodo.

Así como las siguientes desventajas:

- El agua con niveles altos de turbiedad puede tapar rápidamente la arena fina de estos filtros, requiriendo un proceso de prefiltración.
- Los filtros lentos de arena no retiran completamente todos los químicos orgánicos, sustancias inorgánicas disueltas, como metales pesados o precursores del trihalometanos, cuando se mezclan con el cloro. Incluso, el agua con arcillas muy finas no es tratada fácilmente usando filtros lentos de arena.
- El uso de biocidas o plaguicidas en el influente pueden afectar el desarrollo y funcionamiento de la capa biológica.
- Generalmente requieren de una superficie grande y de mano de obra para su limpieza.

### **3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. JUSTIFICACIÓN**

La escasez hídrica y la falta de acceso a agua de calidad adecuada para el consumo humano afectan a todos los países del mundo, de manera especial a aquellos países en vías de desarrollo. De continuar el ritmo de crecimiento poblacional y de las actividades económicas, sin adoptar medidas de conservación y de reutilización, muchas regiones se enfrentarán a problemas cada vez más graves de escasez; con especial afectación de las zonas rurales y de las urbanas con alta concentración poblacional.

Para países en vías de desarrollo, como es el caso de México, resulta imprescindible desarrollar estándares y tecnologías relacionadas con la captación, almacenamiento, potabilización y reutilización del agua en usos domésticos; tecnologías cuyo bajo costo de construcción y mantenimiento permita que sean aplicadas en los distintos niveles de vivienda.

Realizar una mejor gestión del agua a nivel doméstico implica la utilización de fuentes alternas de suministro, ya sea cosechando agua de lluvia o reutilizando aguas grises dentro de la vivienda. Al implementar esta clase de sistemas, se disminuye la explotación de fuentes naturales de agua y se reducen las descargas de aguas residuales al sistema de alcantarillado, aspectos que conllevan diversos beneficios económicos y ambientales.

Dada la variación espacial y temporal de las lluvias dentro de la zona de estudio, en el presente estudio se buscó evaluar la posibilidad de utilizar el agua pluvial durante una parte del año con el fin de abastecer usos domésticos en los que no se requiera agua de calidad potable.

Además, resulta importante conocer las características del agua pluvial y las aguas grises domésticas y probar su tratabilidad mediante sistemas sencillos de bajo costo de construcción y mantenimiento, esto con el fin de proponer criterios de reutilización, por lo que en este trabajo de investigación se evaluaron sistemas de acondicionamiento de agua pluvial y reutilización de aguas grises provenientes de la regadera basados en procesos de filtración lenta con arena.

### **3.2. HIPÓTESIS**

Es posible diseñar un sistema de cosecha de agua pluvial y reutilización de aguas grises procedentes de la regadera, empleando para ello trenes de tratamiento-acondicionamiento de bajo costo de construcción y mantenimiento, los cuales permiten satisfacer parcialmente la demanda de agua potable dentro de una vivienda unifamiliar.

### **3.3. OBJETIVOS**

#### **Objetivo general**

Diseñar y evaluar un sistema de cosecha y acondicionamiento de agua pluvial, así como un sistema de tratamiento de aguas grises provenientes de la regadera para su reutilización dentro de una vivienda unifamiliar.

#### **Objetivos particulares**

- Determinar la oferta potencial de fuentes alternas de suministro de agua (pluvial y grises procedentes de la regadera) para la reducción del consumo de agua procedente de la red municipal.
- Caracterizar y cuantificar el agua requerida en los usos a suplir (regadera, inodoros y lavadora) para determinar el potencial de reutilización y proponer el tren de tratamiento.
- Diseñar los componentes del sistema de cosecha de agua pluvial y reutilización de aguas grises para establecer los estándares de diseño de una casa habitación tipo.

## 4. MATERIALES Y MÉTODO

### 4.1. Delimitación de la zona de estudio

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se localiza en la parte central del Estado de México, entre los paralelos 18°59'07" y 19°34'47" de latitud norte y los meridianos 99°38'22" y 99°56'13" de longitud oeste (Figura 12). La ZMVT está conformada por 22 municipios, los cuales comprenden una superficie de 2,669.6 km<sup>2</sup>, que corresponde al 11.9% del territorio estatal. Para el año 2010, dichos municipios albergaban un total de 2,172,035 habitantes, lo cual representa el 14.3% de la población estatal. Contando con un promedio de hacinamiento de 4 habitantes por vivienda (INEGI, 2010).

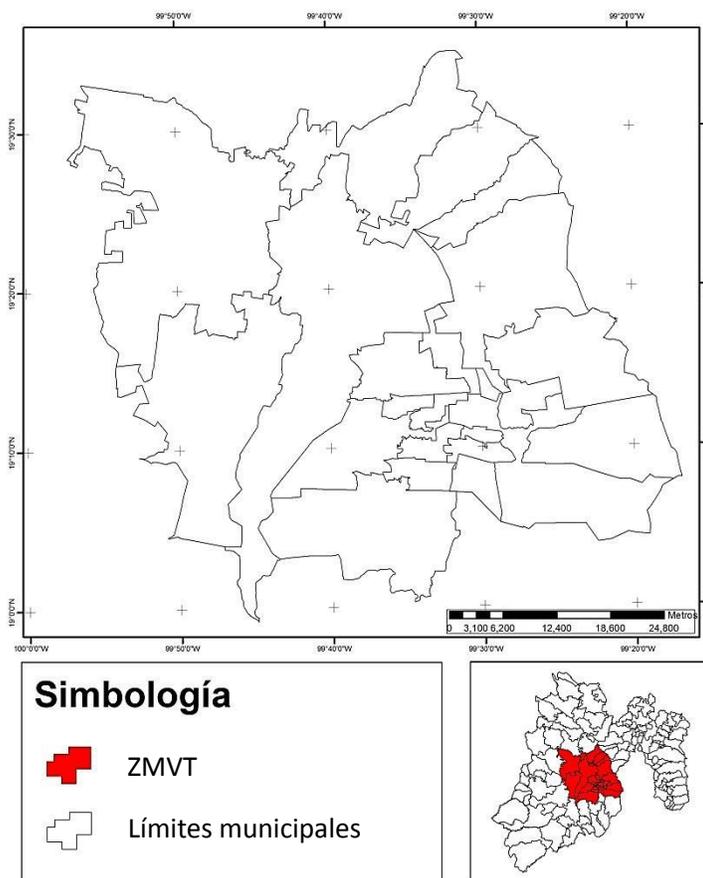


Figura 12. Ubicación geográfica de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

## 4.2. Diseño del sistema de cosecha de agua pluvial en vivienda unifamiliar

Para el diseño de un sistema de cosecha de agua pluvial es necesario considerar tres factores importantes: la superficie de captación en la que se recolecta el agua de lluvia, la precipitación que se tiene en la zona de estudio, y la demanda de agua potable que se desea suplir dentro de la vivienda.

### Área de captación

El área de captación en un sistema de cosecha de AP consiste el techo propio de la vivienda. Debido a la variada condición geográfica de la ZMVT, así como a los diferentes estilos de vida de sus habitantes, se presume difícil imponer normas universales referentes a dimensiones y áreas mínimas de una vivienda. Es por esto que en el presente trabajo de investigación se consideraron áreas de captación desde los 50 hasta los 150 m<sup>2</sup> para una vivienda unifamiliar nivel medio.

Es importante considerar que no toda el agua de lluvia que cae sobre la superficie de captación es recolectada y enviada directamente al tanque de almacenamiento (cisterna), ya que cierto porcentaje se pierde por evaporación o es retenido en el techo. El coeficiente de escurrimiento  $C_e$  es un factor que interviene en este proceso, y se define como la relación que existe entre la lámina de agua precipitada sobre una superficie, y la lámina de agua que escurre superficialmente (ambas expresadas en mm). El valor de dicho parámetro varía en función del tipo de material con el que esté fabricada la superficie de captación.

$$C_e = \frac{E_s}{P_i}$$

$C_e$  = Coeficiente de escurrimiento

$E_s$  = Lámina escurrida, mm

$P_i$  = Precipitación, mm

En el presente estudio se consideró al concreto como material de construcción del techo, ya que es el material empleado con mayor frecuencia en viviendas de nivel medio, debido a su

resistencia y durabilidad (Gobierno del Estado de México, 2005). El coeficiente de escurrimiento para este tipo de superficie es de 0.80 (CIDECALLI, 2007).

### **Demanda de agua en vivienda unifamiliar**

Una vez que se conoce la cantidad de agua de lluvia con la que se dispone, es importante determinar los usos en los que se pretende utilizar, supliendo de este modo el abastecimiento de agua potable proveniente de la red municipal. Para el presente trabajo se consideraron los valores obtenidos por Maya (2010), referentes a los consumos que se tienen para cada uno de los usos domésticos (Figura 13). Dichos valores pertenecen a una vivienda tipo de nivel medio ubicada dentro del municipio de Toluca.

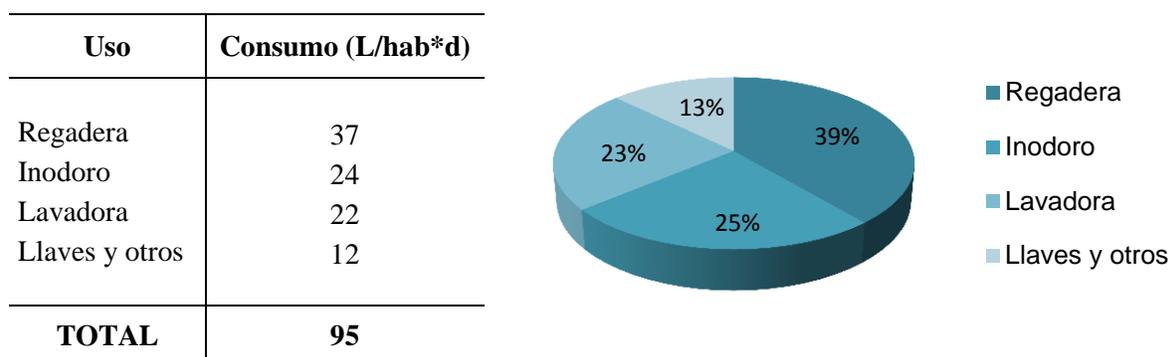


Figura 13. Dotación de agua potable para vivienda unifamiliar de nivel medio

Fuente: Maya (2010).

Dados los consumos de agua potable mostrados en la figura anterior, resulta importante resaltar la reutilización de aguas grises procedentes del aseo personal (regadera), ya que su aportación diaria (37 L/hab\*d) resultaría suficiente para abastecer la demanda en inodoros (24 L/hab\*d), recibiendo un acondicionamiento previo a su reutilización.

La demanda anual dentro de una vivienda unifamiliar nivel medio ubicada dentro de la ZMVT con un promedio de hacinamiento de 4 habitantes/vivienda (INEGI, 2010) es de 138,700 L:

$$D_{vivienda} = (95L / hab * d)(4hab)(365d) = 138,700L$$

Además de esto, se consideraron tres combinaciones de demanda, las cuales contemplan la utilización de agua pluvial en distintos usos dentro de la vivienda:

1. *Inodoro (ino)*.- uso del agua de lluvia únicamente en inodoros (24 L/hab\*d)

2. *Inodoro + Lavadora (ino + lav)*.- uso en inodoros y lavadora (46 L/hab\*d)

3. *Inodoro + Lavadora + Regadera (ino + lav + reg)*.- uso en inodoros, lavadora y regadera (83 L/hab\*d)

### **Determinación de la oferta potencial de agua pluvial**

Al realizar la delimitación de la zona de estudio, es posible ubicar geográficamente las estaciones climatológicas y, por lo tanto, conocer los niveles de precipitación. En el ANEXO 1 se muestra el tabulado de las estaciones climatológicas de la ZMVT, así como la precipitación media anual de cada una de ellas.

Para determinar la oferta potencial de agua de lluvia, en el presente trabajo se consideraron únicamente tres estaciones climatológicas (Figura 14), las cuales cuentan con los niveles de precipitación máximo, mínimo y medio dentro del territorio de la ZMVT: la estación 15045 ubicada en el municipio de Ocoyoacac presenta el nivel máximo de precipitación media anual (1,307 mm), mientras que la estación clave 15164, en municipio de Toluca, es la estación con el nivel de precipitación mínimo dentro del territorio (712 mm). La estación 15119, ubicada en el municipio de Temoaya, se consideró como un valor medio de precipitación, contando con 1,010 mm de lluvia anuales.

Para la obtención de la precipitación media diaria de cada una de las estaciones climatológicas (Servicio Meteorológico Nacional, 2013), se consideró un historial de 25 años, tal y como lo recomienda Palacios (2001). Aunque la temporada de lluvias en la ZMVT abarca los meses de mayo a octubre, los meses de junio a septiembre presentan los mayores niveles de precipitación (Gobierno del Estado de México, 2012), razón por la cual se consideraron estos cuatro meses para la determinación de la precipitación media diaria.

El mes de mayo fue descartado para el análisis debido a que, durante este mes, se presentan las primeras lluvias de la temporada, acarreado consigo una alta carga de contaminantes (Li et

al., 2010). Además, las precipitaciones durante los meses de mayo y octubre son más esporádicas, y presentan una baja probabilidad de lluvia (menor al 50%). Así, 122 es el número total de días considerados para realizar la captación y almacenamiento de agua pluvial, representando los meses de junio a septiembre.

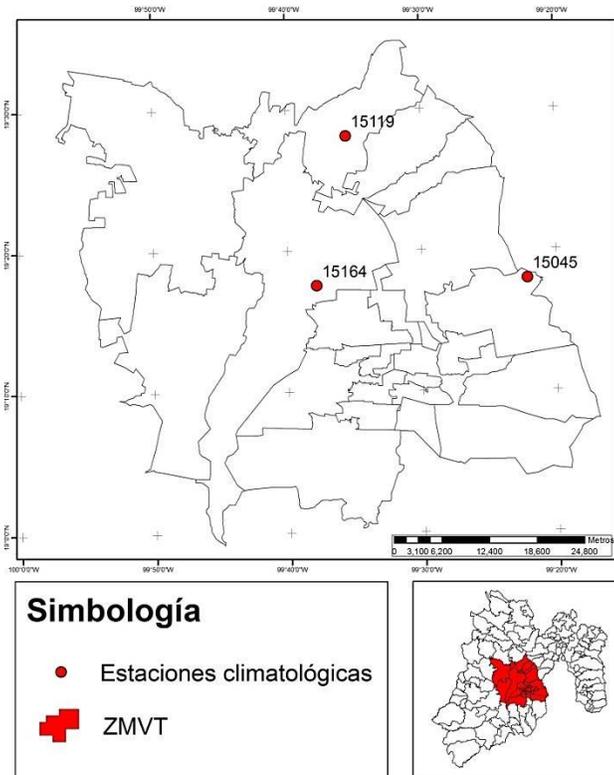


Figura 14. Localización de las estaciones climatológicas consideradas

Es importante considerar la probabilidad de que en determinado día se presente un evento de precipitación, ésta se define como el número de días en que la precipitación  $P_i > 1.25 \text{ mm}$  ( $D_{P>1.25\text{mm}}$ ), entre el número total de días considerados en la medición  $D_{\text{medidos}}$  (Li et al., 2010). La probabilidad de lluvia  $p_{\text{lluvia}}$ , expresada en forma decimal, es dada por la siguiente expresión:

$$P_{P>1.25\text{mm}} = \frac{D_{P>1.25\text{mm}}}{D_{\text{medidos}}}$$

De este modo se puede calcular la precipitación neta  $P_n$ :

$$P_n = P_i * P_{P>1.25mm}$$

Donde  $P_i$  es la precipitación media diaria del día  $i$ , (mm).

Otro factor importante a considerar es la intercepción de los primeros minutos de lluvia, ya que de esta manera se previene que sólidos depositados en el techo ingresen al tanque de almacenamiento. Palacios (2001) recomienda interceptar 1 L/m<sup>2</sup> (1 mm de lámina de escorrentía). Dado que  $P_d$  representa una lámina de precipitación, es necesario considerar el coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ), siendo de 0.80 para el techo de concreto.

$$P_d = \frac{1mm}{0.80} = 1.25mm$$

Con esto se asegura que el volumen recolectado por el dispositivo interceptor de primeras lluvias corresponde a 1 L/m<sup>2</sup> de superficie de captación.

Es así como la precipitación efectiva se obtiene restando los milímetros de la precipitación neta menos los milímetros interceptados al inicio de la precipitación:

$$Pe_i = Pn_i - P_d$$

$Pe_i$  = precipitación efectiva del día  $i$  (mm)

$Pn_i$  = precipitación neta del día  $i$  (mm)

$P_d$  = precipitación interceptada (mm)

La Figura 15 muestra la variación de la precipitación diaria efectiva para las estaciones 15045 (precipitación media anual: 1,307 mm), la estación 15119 (precipitación media anual: 1,010 mm) y 15164 (precipitación media anual: 712 mm).

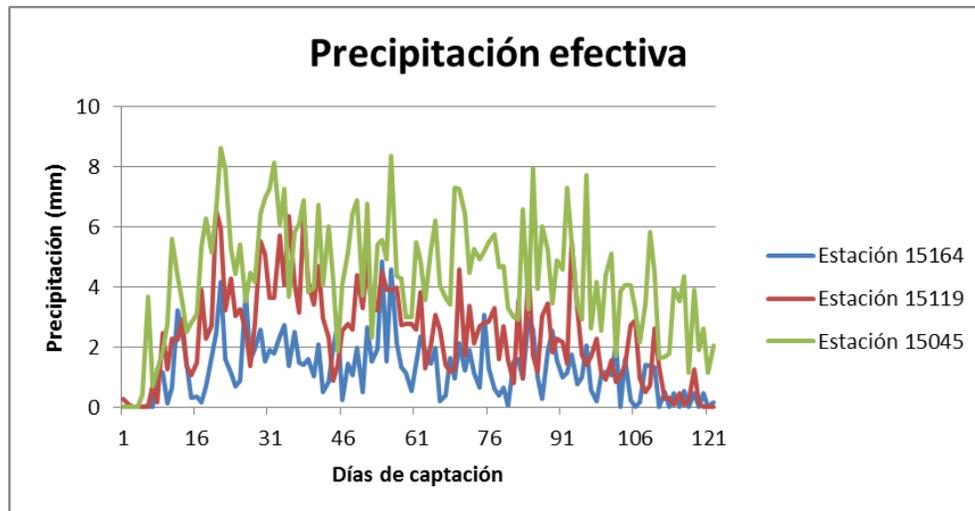


Figura 15. Distribución diaria de la precipitación efectiva

### 4.3. Balance entre oferta de agua pluvial y demanda

Una parte importante en el diseño de sistemas de cosecha de agua pluvial consiste en el dimensionamiento del tanque de almacenamiento, ya que de este depende la capacidad de suministro hacia los muebles sanitarios que empleen el agua de lluvia como abastecimiento alternativo (Khastagir y Jayasuriya, 2010).

Una vez que se han interceptado los primeros minutos de lluvia, el agua es dirigida al tanque de almacenamiento (cisterna). Según Khastagir y Jayasuriya (2010), el volumen de agua de lluvia que es posible almacenar se expresa como:

$$v_i = A * C_e * P_{e_i}$$

$v_i$  = volumen disponible de precipitación en el día  $i$  (L)

$A$  = área de captación ( $m^2$ )

$C_e$  = coeficiente de escurrimiento = 0.80 para concreto

$P_{e_i}$  = precipitación efectiva del día  $i$  (mm)

De esta manera, el balance diario de oferta-demanda del agua pluvial se expresa como:

$$V_i = v_i + V_{i-1} - D_i$$

$V_i$  = volumen de agua de lluvia almacenado al final del día  $i$  (L)

$v_i$  = volumen de precipitación del día  $i$  (L)

$D_i$  = demanda en el día  $i$  (L)

#### 4.4. Eficiencia en el ahorro de agua potable

Dadas las combinaciones de demanda para cada uno de los tres niveles de precipitación planteados en el presente estudio, es posible determinar el porcentaje de ahorro anual que se obtiene al suplir el abastecimiento de agua potable con agua de lluvia. La eficiencia ( $E_{\text{ahorro}}$ ) expresa el porcentaje de ahorro dentro de la vivienda al implementar dicho sistema (Khastagir y Jayasuriya, 2010); esta eficiencia se refiere a la relación existente entre el volumen de agua de lluvia empleada en usos domésticos, y la demanda total anual de agua potable un una vivienda de nivel medio con cuatro habitantes correspondiente a 138,700 L, dados los 95 L/hab\*d (Maya, 2010).

$$E_{\text{ahorro}} = \frac{V_{\text{ahorro}}}{138,700} * 100$$

$V_{\text{ahorro}}$  volumen anual de agua potable que se logra suplir con agua pluvial (L)

#### 4.5. Sistema de acondicionamiento de agua pluvial

El tren de tratamiento para el acondicionamiento del agua de lluvia implementado en el presente trabajo se muestra en la Figura 16.

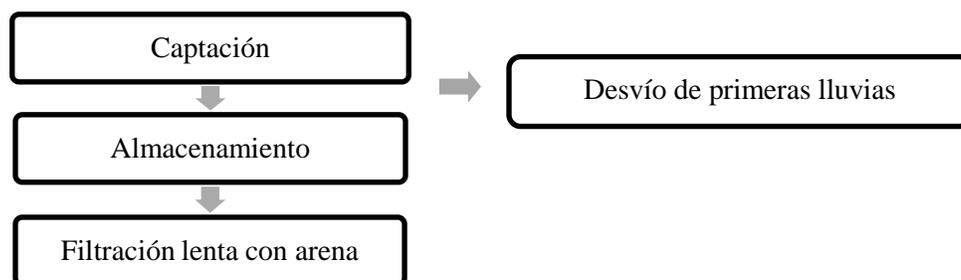


Figura 16. Proceso de acondicionamiento de agua pluvial

#### Captación y almacenamiento

Para fines del presente trabajo, se construyó un sistema de cosecha de AP (Figura 17) en el interior del Laboratorio de Modelos Hidráulicos, ubicado dentro de las instalaciones del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). La captación y recolección del AP se llevó a cabo en el techo de dicha edificación, fabricado con lámina galvanizada con una pendiente del 2%. El agua fue recolectada a través de una bajante de AP en el interior del laboratorio; el área tributaria drenada por dicha bajante corresponde a 100 m<sup>2</sup> de techo.

Se instaló un interceptor de primeras lluvias para evitar que contaminantes provenientes del techo (hojas, polvo, plumas de aves) entraran al tanque de almacenamiento. La cantidad aproximada de agua desviada a través del interceptor de primeras lluvias corresponde a 1 mm (1 L/m<sup>2</sup>). El agua derivada por el interceptor de primeras lluvias se descargó directamente en el sistema de alcantarillado.



Figura 17. Sistema de captación e intercepción de agua pluvial

El almacenaje se hizo en reservorios de plástico (tinacos) cubiertos, evitando el paso de luz hacia su interior durante el almacenamiento, lo que evitó el crecimiento de microalgas y la modificación de la calidad del AP; dos reservorios de 1,100 L de capacidad y otros dos de 600 L cada uno, obteniendo un volumen total de 3,400 L, ubicados a nivel de piso dentro del laboratorio (Figura 18). Las primeras lluvias de la temporada fueron omitidas, almacenando únicamente una parte de la precipitación transcurrida durante los meses de agosto (días 12 y 26) y septiembre (días 4, 5 y 23) del año 2013.



Figura 18. Tanques de almacenamiento de AP

## **Diseño del sistema de acondicionamiento de agua pluvial**

Para la construcción del filtro lento de arena (arena sílice con diámetro efectivo  $D_e = 0.36$  mm y coeficiente de uniformidad  $CU = 1.47$ ), se recurrió a materiales económicos y de fácil adquisición: tubería de PVC (policloruro de vinilo) y válvulas de latón.

El cuerpo del filtro se realizó con un tubo de PVC sanitario de 4" de diámetro (0.10 m).

El área transversal del filtro ( $A_t$ ) se define como:

$$A_t = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.10^2}{4} = 0.008m^2$$

La velocidad de filtración ( $V_f$ ) propuesta en el presente proyecto fue de 0.25 m/h, la cual se encuentra dentro del rango de funcionamiento apto para los filtros lentos de arena, el cual comprende velocidades de 0.1 a 0.5 m/h (Montgomery, 1985).

$$V_f = 0.25m/h$$

$$Q = V_f * A_t = 0.25 * 0.008 = 0.002m^3/h = 48L/d$$

En el ANEXO 2 se muestra con mayor detalle los componentes del filtro lento de arena.

## **Funcionamiento del sistema de depuración de agua pluvial**

El sistema de depuración de AP consistió en un filtro lento de arena que funcionaba de manera descendente. El proceso de maduración del filtro se realizó de manera continua durante los meses de febrero a junio del año 2014, empleando para ello el agua almacenada (3,400 L) durante el mes de septiembre de 2013.

Una vez que comenzó la época de lluvias en el año 2014, se mantuvo con el proceso de filtración en continuo, realizándose pruebas de tres eventos de precipitación (días 7 y 25 de agosto, 26 de septiembre) transcurridos durante la época de lluvias del mismo año. La cosecha de AP se realizó entre la 16:00 y 17:00 horas, esto con el fin de proporcionar condiciones similares del AP cosechada. El agua almacenada durante cada evento de precipitación era almacenada en un tinaco con una capacidad de 1,100 L, contando de esta manera con suficiente volumen de agua para mantener la filtración en continuo hasta que se

presentara el siguiente aguacero, momento en el cual el agua almacenada del evento anterior era desechada con el fin de continuar almacenar el agua proveniente del nuevo evento de precipitación y continuar de esta manera el proceso de filtración.

La Figura 19 muestra el esquema general del sistema de depuración de AP implementado en el presente trabajo; su funcionamiento fue el siguiente: primero, el agua de lluvia era almacenada en el tinaco ubicado a nivel de piso, desde este punto era bombeada hacia el tanque de distribución ubicado en la parte superior, desde el cual se alimenta al filtro por gravedad, empleando un dispositivo regulador de caudal.

Posteriormente, el agua cruda ingresaba por la parte superior del filtro, y salía por la parte inferior del mismo (flujo descendente), atravesando el lecho de arena; el agua filtrada era recolectada en un recipiente ubicado debajo del filtro. La velocidad de filtración de 0.25 m/h, fue regulada mediante una válvula de compuerta ubicada en la parte inferior del filtro, manteniendo un flujo constante de 48 L/d.

El tirante de agua sobre el lecho de arena ( $H_s = 0.60$  m) se mantuvo constante gracias a la configuración del sistema de filtración, ya que, si se presentaba el caso de que el gasto proveniente del tanque de distribución fuese mayor al gasto requerido (48 L/d), el volumen excedente era drenado mediante el dispositivo de demasías ubicado en la parte superior del filtro, el agua excedente retornaba al tanque de almacenamiento. Los muestreos se realizaron en los puntos [2] y [4].

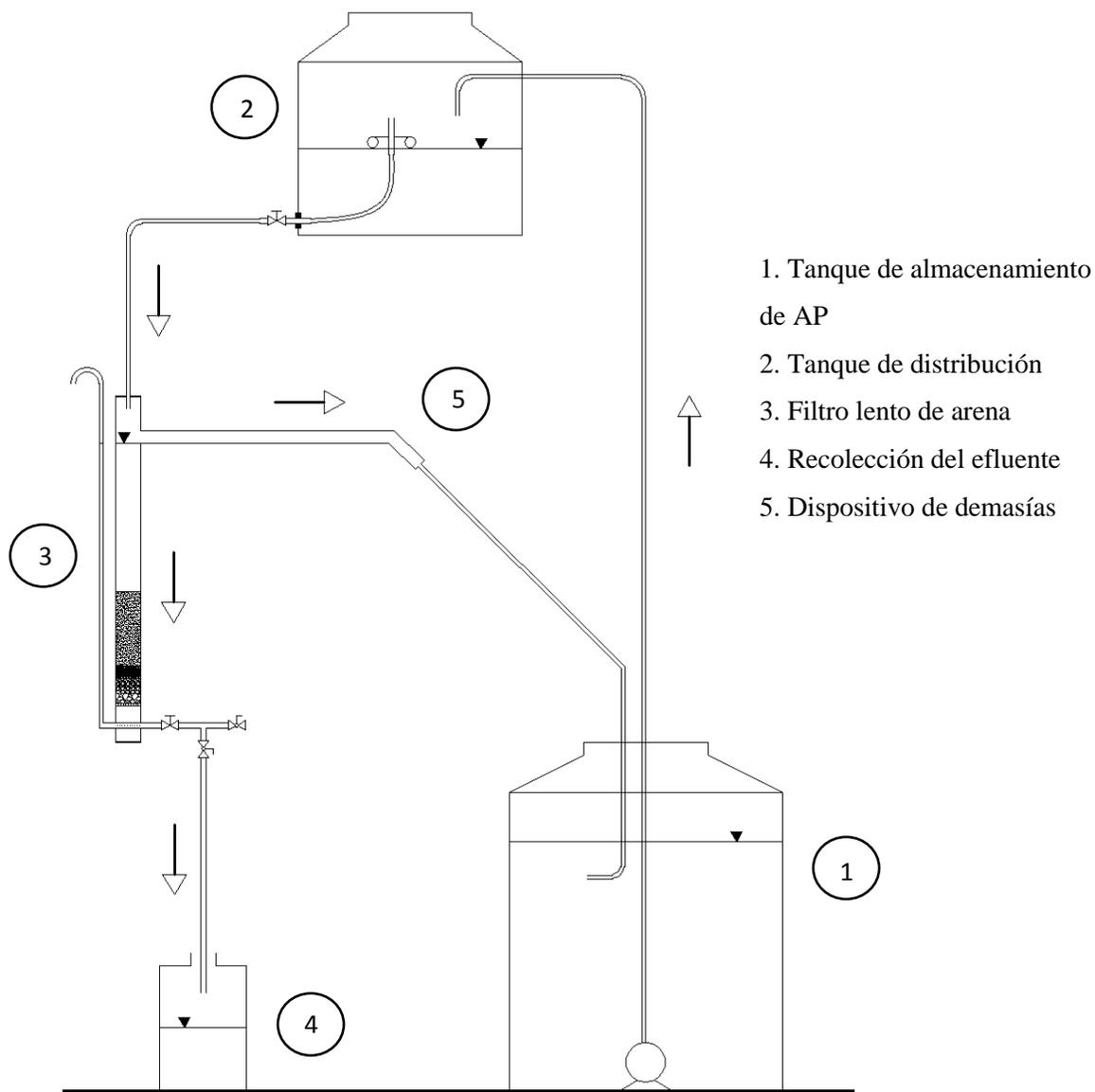


Figura 19. Sistema de depuración de agua pluvial

En la Tabla 6 se describen los componentes que conforman el filtro lento de arena encargado del acondicionamiento del agua pluvial.

Tabla 6. Componentes del filtro lento de arena

Componente	Descripción
Contenedor	Tubo de PVC sanitario de 4" (10 cm) de diámetro y una altura total de 140 cm.
Tirante hidráulico	Columna de agua de 60 cm de altura sobre la superficie de la arena. Proporciona la carga hidráulica suficiente para superar las pérdidas ocasionadas por las estructuras de drenaje y el lecho filtrante al paso del agua.
Lecho filtrante	Arena sílice con diámetro efectivo $D_e = D_{10} = 0.36$ mm y un coeficiente de uniformidad $CU = D_{60}/D_{10} = 1.47$ . Espesor del lecho: 30 cm.
Soporte	Medio estratificado conformado por 5 cm de gravilla fina de 4 mm de diámetro, 5 cm de gravilla de 6 mm y 5 cm de grava de 13 mm. Finalmente se tiene una rejilla en el fondo, todo esto encargado de dar soporte al lecho filtrante y evitar la pérdida de material.
Drenaje	Tubería de PVC sanitario de ½" (1.3 cm) de diámetro que permite la salida del agua filtrada a través de 20 orificios de 0.5 cm de diámetro.
Estructuras de regulación y control	Válvula de compuerta ubicada en la base del contenedor. Permite regular el flujo, controlando así la velocidad de filtración.
Indicador de nivel	Manguera plástica de ¾" (1.9 cm) de diámetro que muestra el nivel del agua dentro del filtro de PVC.

En el ANEXO 3 se muestra el sistema de depuración de agua pluvial que fue construido para el desarrollo del presente trabajo.

#### 4.6. Sistema de tratamiento de aguas grises de regadera

Para fines del presente trabajo de investigación, el tren de tratamiento empleado para el tratamiento de aguas grises domésticas procedentes de la regadera, se muestra en la Figura 20.

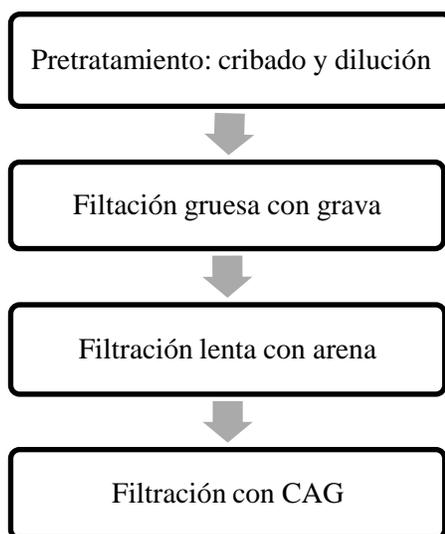


Figura 20. Tren de tratamiento de las aguas grises domésticas

#### Diseño del sistema de depuración de aguas grises

Para realizar el tratamiento de las aguas grises provenientes de la regadera, se recurrió a un filtro de arena (arena sílice con diámetro efectivo  $D_e = 0.36$  mm y coeficiente de uniformidad  $CU = 1.47$ ), construido con materiales económicos y de fácil adquisición: tubería de PVC, y válvulas de latón. El cuerpo del filtro se realizó con un tubo de PVC sanitario de 4" de diámetro (0.10 m).

El área transversal del filtro ( $A_t$ ) se define como:

$$A_t = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.10^2}{4} = 0.008m^2$$

Debido a las características físicas de las aguas grises, las cuales cuentan con una cantidad mucho mayor de sólidos suspendidos y de turbiedad comparadas con el agua de lluvia, se adicionó al sistema un filtro grueso de grava, ubicado en la parte superior del cuerpo del filtro

de arena, con el fin de retirar partículas suspendidas relativamente grandes. Las características del filtro grueso de grava se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Componentes del filtro grueso de grava

Componente	Descripción
Contenedor	Tubo de PVC sanitario de 10 cm de diámetro y una altura de 30 cm.
Lecho filtrante	Gravilla de 6 mm de diámetro. Espesor del lecho: 15 cm.
Soporte	5 cm de grava de 13 mm de diámetro. Se tiene una rejilla plástica en la parte inferior, para soportar el lecho filtrante y evitar que el material caiga sobre el lecho del filtro de arena.

Para fines del presente trabajo de investigación, se realizó una dilución de las AG, mezclándolas con agua de lluvia acondicionada previamente durante la maduración del filtro, en una proporción de 1:1 (Kim et al., 2007), esto con la finalidad de evitar la pronta colmatación del filtro de arena. Cabe aclarar que, en un sistema de tratamiento doméstico, lo más conveniente sería evitar dicha dilución, realizando la filtración directa de las AG crudas.

Además, para realizar la depuración de las AG, se trabajó con una velocidad de filtración de 0.50 m/h, representando el límite superior del rango de velocidades recomendado por Montgomery (1985) para la filtración lenta (0.1 a 0.5 m/h).

$$V_f = 0.50 \text{ m/h}$$

$$Q = V_f * A_t = 0.50 * 0.008 = 0.004 \text{ m}^3 / \text{h} = 96 \text{ L/d}$$

Para ayudar a la remoción de partículas suspendidas, materia orgánica y turbiedad, así como disminuir el color y olor de las aguas grises, se adicionó un tercer filtro conformado de carbón activado granular (CAG), cuyas características se describen en la Tabla 8.

Tabla 8. Componentes del filtro de carbón activado granular

Componente	Descripción
Contenedor	Tubo de PVC sanitario de 4" de diámetro y una altura total de 70 cm.
Tirante hidráulico	Columna de agua de 20 cm de altura sobre la superficie del CAG, la cual proporciona la carga hidráulica suficiente para superar las pérdidas ocasionadas por las estructuras de drenaje y el lecho filtrante.
Lecho filtrante	Carbón activado granular de madera de pino, activado con ácido fosfórico. Diámetro de poro: 50 nm. Rango de tamaño de partícula (malla): 6x20. Espesor del lecho: 20 cm.
Soporte	Medio estratificado conformado por 5 cm de gravilla fina de 4 mm de diámetro, 5 cm de gravilla de 6 mm y 5 cm de grava de 13 mm. Finalmente se tiene una rejilla en el fondo, todo esto encargado de dar soporte al lecho filtrante y evitar la pérdida de material.
Drenaje	Tubería de PVC sanitario de ½" (1.9 cm) de diámetro que permite la salida del agua filtrada a través de orificios de 0.5 cm de diámetro (20 orificios).
Estructuras de regulación y control	Válvula de globo ubicada en la base del contenedor. Permite regular el flujo, controlando así la velocidad de filtración (0.5 m/h).

### Funcionamiento del sistema de tratamiento de AG de regadera

El proceso de tratamiento de las AG procedentes de la regadera se realizó después de efectuar las pruebas de acondicionamiento de AP, con el fin de conseguir una maduración previa del filtro. El muestreo de las AG se realizó en una vivienda de nivel medio, obteniendo una muestra compuesta (4 habitantes) con un volumen total de 36 L correspondiente al uso en regadera.

El funcionamiento del sistema de depuración de AG es el siguiente. Primero, de los 36 L de la muestra compuesta de AG, se tamizaban 18 L a través de una malla fina con abertura de 1

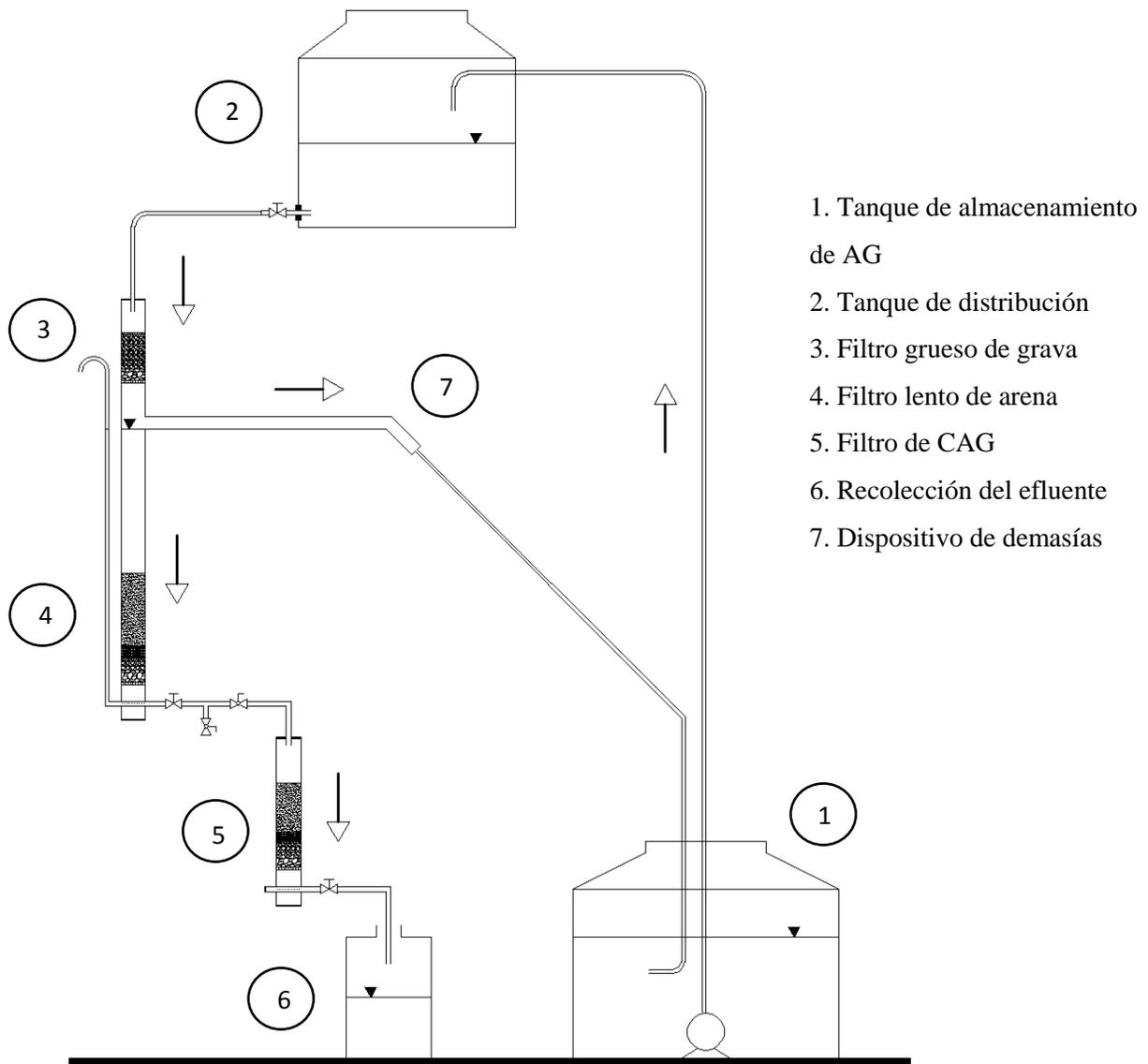
mm<sup>2</sup> y eran depositadas en el tanque de almacenamiento, el resto de la muestra era desechada al sistema de alcantarillado. Este proceso de tamizado se realizó con el fin de retirar partículas gruesas, tales como cabello y pelusas. A continuación se hacía una dilución a una proporción de 1:1 con agua de lluvia previamente acondicionada, obteniendo así un volumen total de 36 L en el tanque de almacenamiento ubicado a nivel de piso.

Posteriormente, el agua cruda era bombeada hacia el tanque de distribución, desde donde se distribuía por gravedad hacia el filtro grueso de grava; una vez que el agua atravesaba dicho medio filtrante, escurría hacia el lecho del filtro lento de arena, manteniendo un flujo descendente. El tirante de agua sobre el lecho de arena ( $H_s = 0.60$  m) se mantuvo constante gracias a la configuración del sistema de filtración, ya que, si se presentaba el caso de que el gasto proveniente del tanque de distribución fuese mayor al gasto requerido (96 L/d), el volumen excedente era drenado mediante el dispositivo de demasías, mandando el agua excedente al tanque de almacenamiento.

El efluente del filtro de arena era dirigido hacia un filtro de carbón activado granular, el cual trabajaba a una velocidad de filtración de 0.5 m/h, regulada mediante una válvula de globo ubicada en la parte inferior del filtro de CAG, manteniendo un flujo constante de 96 L/d durante la etapa de filtración. De esta manera, se mantenían trabajando ambos filtros (filtro lento de arena y filtro de CAG) bajo un capa de agua sobrenadante, evitando con ello la intromisión de aire al medio filtrante y la formación de cortocircuitos.

Una vez que el agua pasó por estas etapas, el agua es recolectada en un recipiente ubicado debajo del filtro de CAG, Los muestreos se realizaron en los puntos [2] y [4]. Dados el volumen y el flujo diarios (36 L/d y 96 L/d respectivamente), el sistema de tratamiento se mantuvo en funcionamiento durante 9 horas al día.

La Figura 21 muestra el esquema general del sistema de tratamiento de AG implementado en el presente trabajo.



- 1. Tanque de almacenamiento de AG
- 2. Tanque de distribución
- 3. Filtro grueso de grava
- 4. Filtro lento de arena
- 5. Filtro de CAG
- 6. Recolección del efluente
- 7. Dispositivo de demasías

Figura 21. Sistema de tratamiento de aguas grises

Durante el mes de octubre del año 2014 se realizó el proceso de filtración en lotes, de manera que cada día se filtraba un total de 36 L a una velocidad de 0.50 m/h. Este proceso se llevó a cabo hasta que se presentara la colmatación del filtro.

En el ANEXO 4 se muestra el sistema de tratamiento de aguas grises que fue construido para el desarrollo del presente trabajo.

#### 4.7. Medición de parámetros

La caracterización del AP y de las AG se realizó con base en las normas oficiales mexicanas. Las eficiencias del tren de acondicionamiento de AP, así como el tren de tratamiento de AG domésticas, fueron evaluadas tomando en consideración parámetros mostrados en la Tabla 9, en la cual se muestran también los métodos de prueba empleados para la medición de dichos parámetros.

Tabla 9. Parámetros considerados para la evaluación de los sistemas de depuración

<b>Parámetro</b>	<b>Método de prueba</b>
Color	NMX-AA-045-SCFI-2001
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2013
Conductividad eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000
Turbiedad	NMX-AA-038-SCFI-2001
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001
Acidez	NMX-AA-036-SCFI-2001
Dureza Total	NMX-AA-072-SCFI-2001
N-Nitratos	NMX-AA-079-SCFI-2001
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001
Sulfatos	NMX-AA-074-SCFI-1981
Fosfatos	NMX-AA-029-SCFI-2001
Carbono orgánico total	Método de combustión
Demanda química de oxígeno	NMX-AA-030-SCFI-2001
Calcio	NMX-AA-051-SCFI-2001
Hierro	NMX-AA-051-SCFI-2001
Magnesio	NMX-AA-051-SCFI-2001
Potasio	NMX-AA-051-SCFI-2001
Sodio	NMX-AA-051-SCFI-2001
Zinc	NMX-AA-051-SCFI-2001
Sólidos disueltos totales	NMX-AA-034-SCFI-2001
Coliformes totales	NMX-AA-042-1987
Coliformes fecales	NMX-AA-042-1987

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Dimensionamiento del sistema de cosecha de AP en vivienda unifamiliar

Tras realizar el balance diario de oferta-demanda, fue posible determinar la cantidad de días del año en el que resulta posible abastecer de manera parcial la demanda planteada, teniendo la consideración de que es posible almacenar toda el agua de lluvia durante los 122 días en que se realiza la captación. El volumen de agua dentro del tanque de almacenamiento (eje de las ordenadas) siempre muestra un valor positivo, esto se logró al considerar un periodo de almacenamiento de 15 días (del 1 al 15 de junio) previo a su utilización. Dentro de cada gráfico, el eje de las abscisas representa el número de días en los que es posible hacer uso del agua almacenada para abastecer completamente la demanda planteada.

La Figura 22 muestra la utilización diaria del AP considerando distintos niveles de precipitación. El inciso a) muestra los volúmenes máximos de almacenamiento logrados al considerar un nivel de precipitación de 712 mm anuales, así como un área de captación de 150 m<sup>2</sup>. En este caso, el nivel de precipitación es tan bajo, que ninguna de las combinaciones planteadas (inodoro, inodoro + lavadora, inodoro + lavadora + regadera) logra abastecerse durante los 365 días del año, por lo que resultaría necesario complementar la dotación con agua de la red municipal.

Conforme se tienen mayores niveles de precipitación, se cuenta también con un mayor número de días en los que es posible abastecer la demanda de determinados usos domésticos, llegando incluso a prescindir durante el año del suministro municipal.

El inciso b) muestra los volúmenes máximos de almacenamiento logrados al considerar un nivel de precipitación de 1,010 mm anuales, así como un área de captación de 150 m<sup>2</sup>. En este caso, el nivel de precipitación permite cubrir la demanda de inodoros durante los 365 días del año, contado con una capacidad de almacenamiento de 25 m<sup>3</sup>.

El inciso c) muestra los volúmenes máximos de almacenamiento logrados al considerar un nivel de precipitación de 1,307 mm anuales, así como un área de captación de 150 m<sup>2</sup>. En este caso, el nivel de precipitación permite cubrir la demanda de inodoros durante los 365 días del año, así como el uso combinado de inodoros más lavadora.

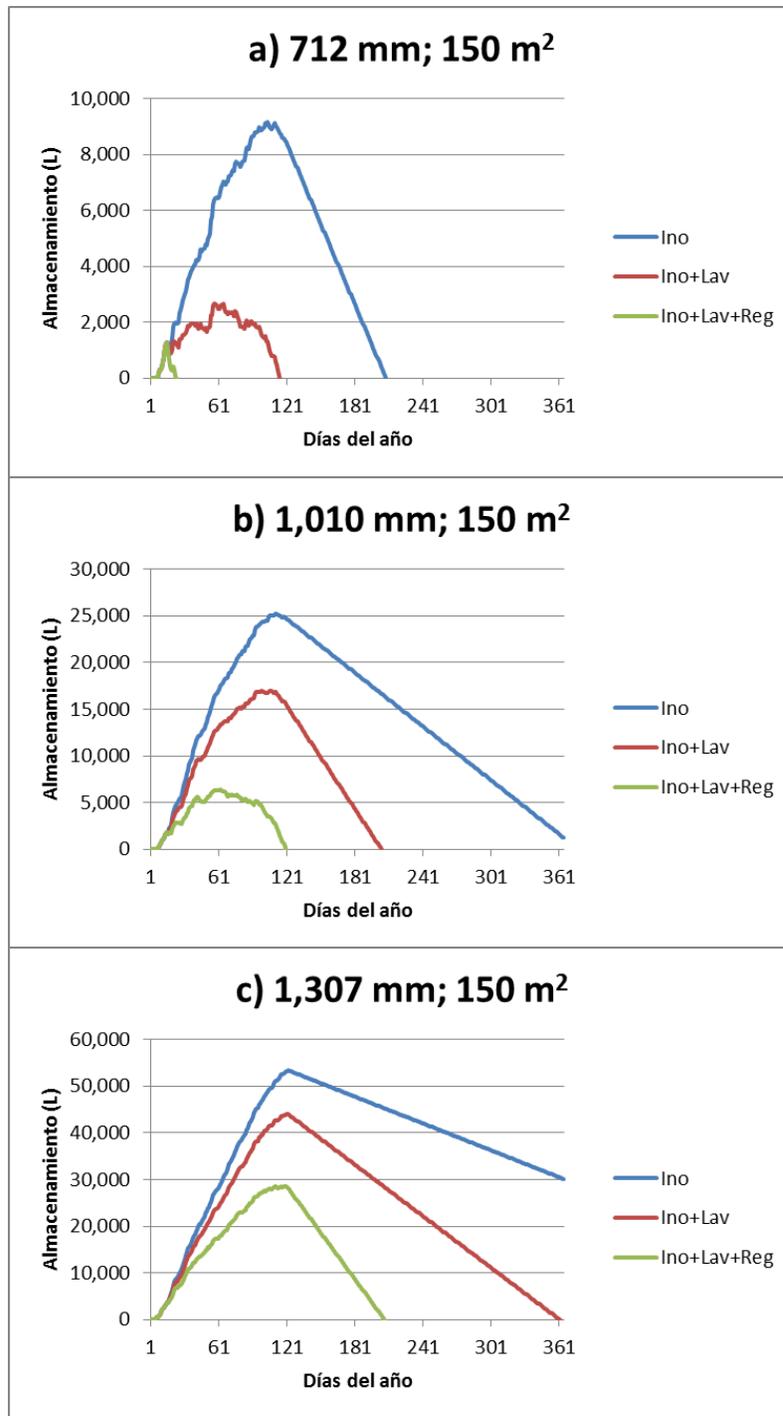


Figura 22. Utilización anual de AP considerando distintos niveles de precipitación

Una vez que finaliza la temporada de captación pluvial (día 122) se tiene una disminución lineal en el volumen de almacenamiento, ya que se tiene únicamente la extracción del agua de la cisterna para el abastecimiento doméstico.

El resto de los gráficos que muestran la distribución anual de utilización de agua pluvia para cada uno de las combinaciones área de captación-precipitación, se muestran en el ANEXO 5.

En la Figura 23 se muestran los volúmenes máximos de almacenamiento que es posible obtener al considerar distintas combinaciones de demanda. El inciso a) muestra los volúmenes máximos de almacenamiento para el uso exclusivamente en inodoros, dependiendo del área de captación. Cada una de los niveles de precipitación presenta un incremento lineal.

El inciso b) muestra los volúmenes máximos de almacenamiento para el uso combinado en inodoros y lavadora. Se puede apreciar que el nivel de precipitación menor (712 mm) presenta un incremento poco significativo.

El inciso c) muestra los volúmenes máximos de almacenamiento para el uso combinado en inodoros y lavadora. Los niveles de precipitación de 712 mm y 1,010 mm anuales presentan un incremento poco significativo, por lo que esta clase de sistemas no resultaría útil para dichos niveles de precipitación media anual.

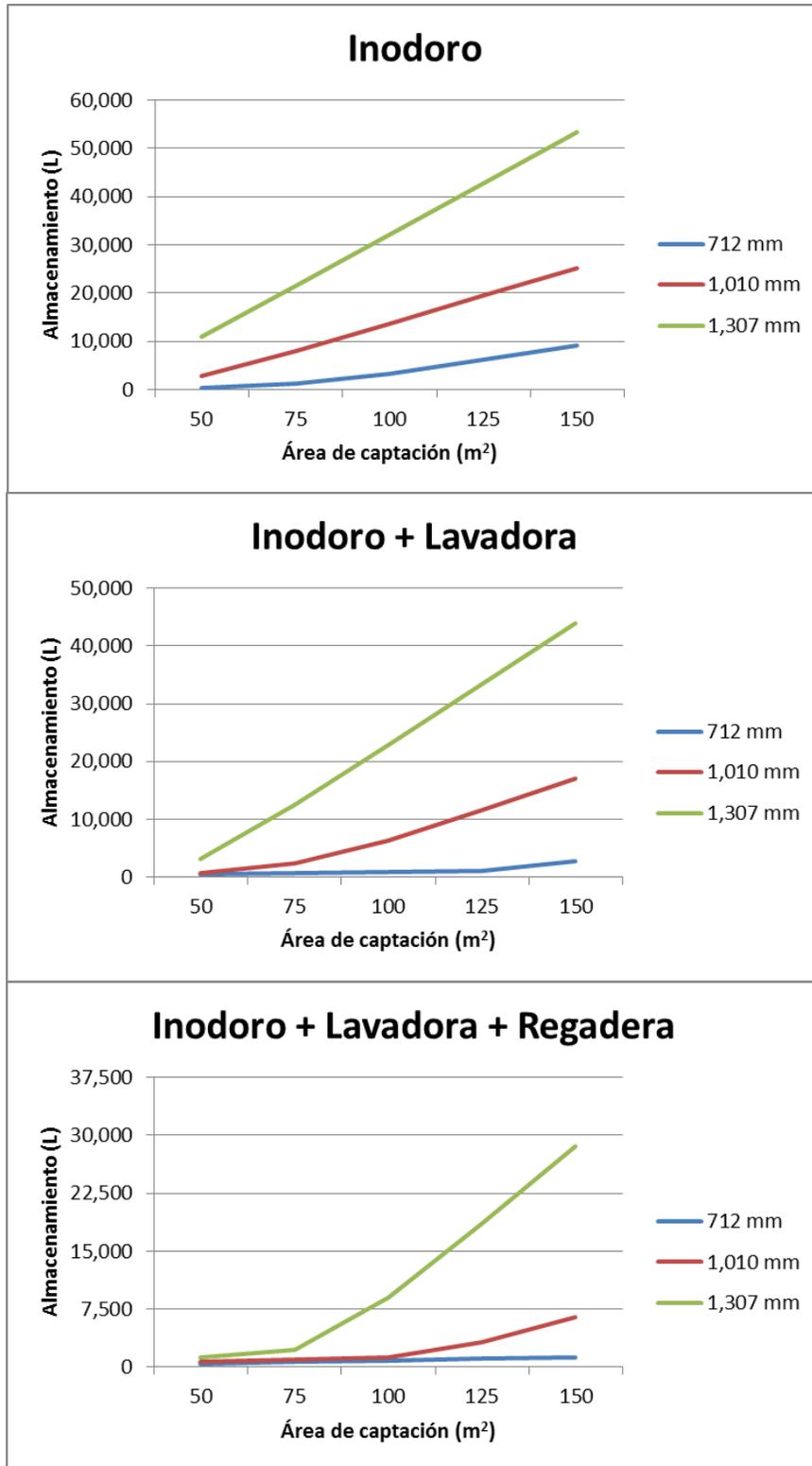


Figura 23. Volúmenes máximos de almacenamiento dependiendo el nivel de demanda

La Figura 24 muestra los porcentajes de ahorro de agua potable que se pueden lograr al considerar distintas combinaciones de demanda. En el inciso a) se muestra el porcentaje de ahorro de agua potable al emplear el AP únicamente para su uso en inodoros, dependiendo el área de captación y el nivel de precipitación. Con un nivel de precipitación de 1,307 mm se llegan a presentar ahorros del 25%, lo que representa el ahorro máximo anual que se puede obtener al suplir la demanda en inodoros dentro de una vivienda unifamiliar con 4 habitantes (35,040 L/año).

En el inciso b) se muestra el porcentaje de ahorro de agua potable al emplear el AP en inodoros y lavadora. Con un nivel de precipitación de 1,307 mm se llegan a presentar ahorros de hasta el 48%, siendo el límite máximo alcanzable supliendo esta clase de demanda (67,160 L/año).

En el inciso c) se muestra el porcentaje de ahorro de agua potable al emplear el AP en inodoros, lavadora y regaderas. Con un nivel de precipitación de 1,307 mm se llegan a presentar ahorros de hasta el 49%, quedando lejos del 87% de ahorro, el cual representa el máximo ahorro alcanzable supliendo esta clase de demanda (121,180 L/año).

En la Tabla 10 se muestran un resumen de los porcentajes de ahorro anual de agua potable que presenta cada una de las combinaciones precipitación-demanda-área de captación. La columna *V almac.* indica el volumen total de AP almacenada en la cisterna; *Días útil.* muestra el número de días en que es posible abastecer la demanda planteada; *V ahorro* indica el volumen total de agua potable que es posible suplir con AP a lo largo del año; la columna *Ahorro* indica el porcentaje anual de agua potable que se obtiene al implementar un sistema de cosecha de AP en una vivienda de nivel medio de cuatro habitantes.

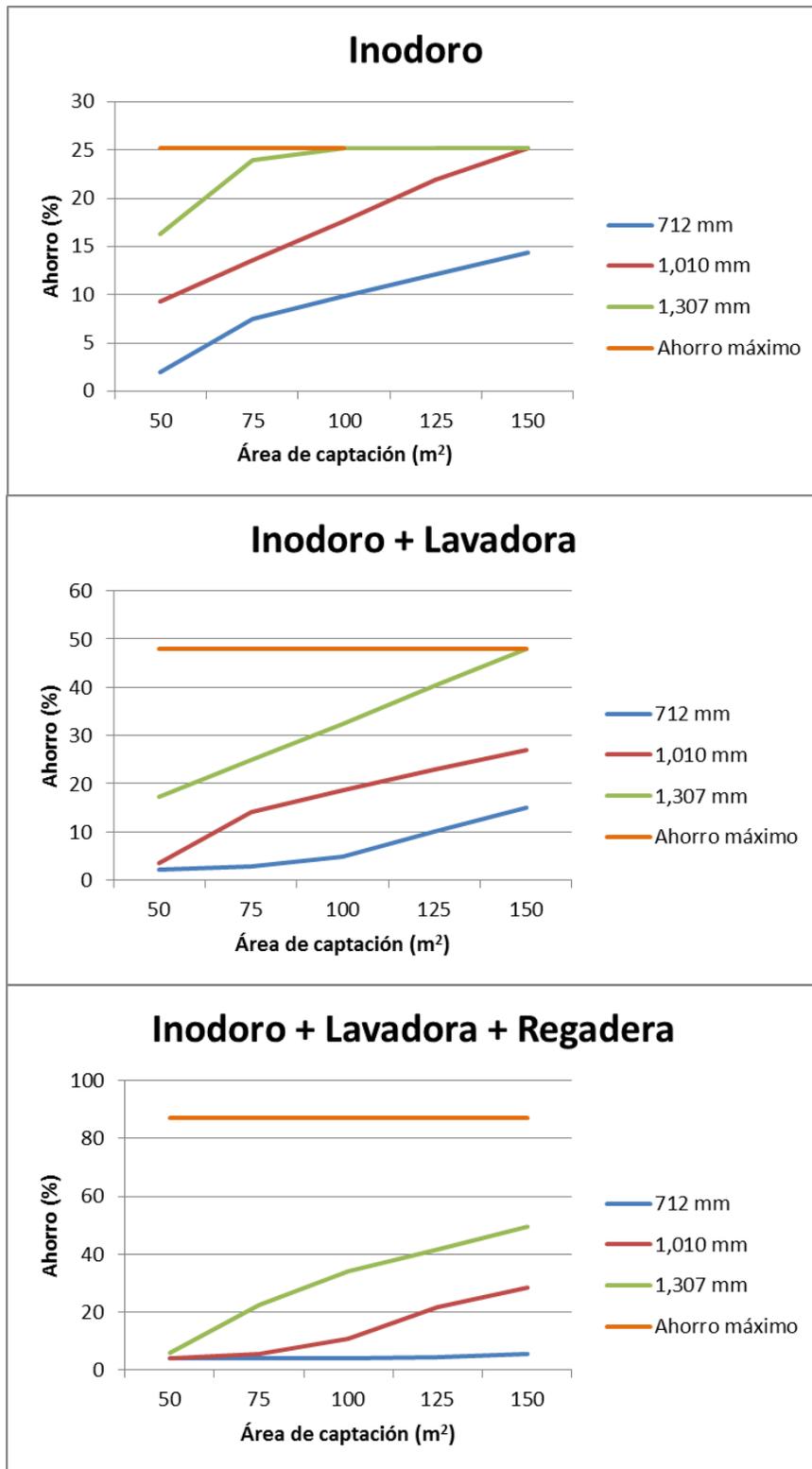


Figura 24. Ahorro anual de agua potable dependiendo el nivel de demanda

Tabla 10. Eficiencia de ahorro anual de agua potable

Precipitación media anual (mm)	Demanda	Área (m <sup>2</sup> )	V almac. (L)	Días util.	V ahorro (L)	Ahorro (%)
712 mm	Ino (24 L/hab*d)	50	429	29	2,784	2
		75	1,167	109	10,464	8
		100	3,393	143	13,728	10
		125	6,228	175	16,800	12
		150	9,146	208	19,968	14
	Ino+Lav (46 L/hab*d)	50	429	17	3,128	2
		75	643	22	4,048	3
		100	857	36	6,624	5
		125	1,071	76	13,984	10
		150	2,670	114	20,976	15
	Ino+Lav+Reg (83 L/hab*d)	50	429	16	5,312	4
		75	643	17	5,644	4
		100	857	17	5,644	4
		125	1,071	19	6,308	5
		150	1,286	23	7,636	6
1,010 mm	Ino (24 L/hab*d)	50	2,877	135	12,960	9
		75	8,148	196	18,816	14
		100	13,765	256	24,576	18
		125	19,510	317	30,432	22
		150	25,255	365	35,040	25
	Ino+Lav (46 L/hab*d)	50	595	27	4,968	4
		75	2,414	106	19,504	14
		100	6,387	141	25,944	19
		125	11,617	172	31,648	23
		150	16,990	204	37,536	27
	Ino+Lav+Reg (83 L/hab*d)	50	595	17	5,644	4
		75	893	23	7,636	6
		100	1,191	45	14,940	11
		125	3,198	90	29,880	22
		150	6,439	119	39,508	28

Tabla 10. Eficiencia de ahorro anual de agua potable (continuación)

Precipitación media anual (mm)	Demanda	Área (m <sup>2</sup> )	V almac. (L)	Días util.	V ahorro (L)	Ahorro (%)
1,307 mm	Ino (24 L/hab*d)	50	11,025	236	22,656	16
		75	21,561	346	33,216	24
		100	32,171	365	35,040	25
		125	42,782	365	35,040	25
		150	53,392	365	35,040	25
	Ino+Lav (46 L/hab*d)	50	3,062	130	23,920	17
		75	12,574	188	34,592	25
		100	22,874	245	45,080	33
		125	33,416	303	55,752	40
		150	43,976	361	66,424	48
	Ino+Lav+Reg (83 L/hab*d)	50	1,178	25	8,300	6
		75	2,227	94	31,208	23
		100	9,040	142	47,144	34
		125	18,550	174	57,768	42
		150	28,603	206	68,392	49

Considerando aceptable un ahorro de agua potable igual o mayor al 20% anual, se concluye que un nivel de precipitación bajo (712 mm anuales) no es apto para la cosecha de agua pluvial. De igual manera, si en la zona de estudio se presenta un nivel de precipitación de 1,010 mm anuales, la cosecha de AP es apta únicamente si se cuenta con una superficie de captación mínima de 125 m<sup>2</sup>. Finalmente, para el caso de contar con una precipitación de 1,307 mm anuales, se recomienda contar con áreas de captación a partir de 75 m<sup>2</sup>.

Los valores más altos de ahorro se presentan al combinar un nivel alto de precipitación (1,307 mm anuales) con áreas grandes de captación (150 m<sup>2</sup>), llegando a obtener ahorros cercanos al 50% anual.

## 5.2. Evaluación del sistema de acondicionamiento de agua pluvial

La eficiencia del tren de acondicionamiento de agua pluvial se evaluó al comparar los resultados obtenidos de los muestreos, con los límites permisibles indicados en la norma

oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, que hace referencia a los límites permisibles de calidad para agua destinada a uso y consumo humano, ya que se pretende usar para usos en donde existe el contacto directo. La Tabla 11 muestra la caracterización del agua de lluvia cosechada en el Laboratorio de Modelos Hidráulicos. De acuerdo con la estación meteorológica del CIRA (19° 23' 58.5''N, 99° 42' 50.3''W), la precipitación anual promedio en el sitio de estudio es de 818 mm (Gallego, 2010). En el ANEXO 6 se muestra los valores correspondientes a la medición de los parámetros del AP almacenada. Es importante señalar que dicha caracterización corresponde al AP que fue almacenada tras interceptar los primeros minutos de lluvia de cada evento de precipitación (aproximadamente 1 L/m<sup>2</sup>), con lo cual se evitó que contaminantes (hojas, polvo, plumas de aves) acumulados en el techo y bajantes entraran al tanque de almacenamiento.

Tabla 11. Caracterización del agua de lluvia almacenada

Parámetros	Unidades	AP almacenada	NOM-127-SSA1-1994
Color	Pt/Co	11 ± 5	20
Temperatura	°C	17.6 ± 0.5	-
Conductividad eléctrica	µS/cm	6 ± 2	-
Turbiedad	UNT	3.2 ± 1.0	5
pH	-	5.1 ± 0.5	6.5 - 8.5
Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	2.8 ± 1.4	-
Acidez	mg/L CaCO <sub>3</sub>	4.7 ± 1.4	-
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	11.4 ± 4	500
N-Nitratos	mg/L N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	8.3	10
Cloruros	mg/L Cl <sup>-</sup>	7.4 ± 1.4	250
Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	8.3 ± 0.6	400
Fosfatos	mg/L PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	< 0.01	-
Carbono orgánico total	mg/L C	2.9 ± 1.3	-
Calcio	mg/L Ca	< 0.5	-
Hierro	mg/L Fe	< 0.5	0.3
Magnesio	mg/L Mg	< 0.5	-
Sodio	mg/L Na	< 0.5	200
Zinc	mg/L Zn	1.1 ± 0.5	5
Sólidos disueltos totales	mg/L SDT	4 ± 2	1000
Coliformes totales	NMP/100 mL	1030 ± 1060	Ausencia o no detectables
Coliformes fecales	NMP/100 mL	90 ± 40	Ausencia o no detectables

La caracterización del agua muestra que el AP, a pesar de no ser potable, cuenta con una buena calidad, mostrando un pH ligeramente ácido y una concentración elevada de contaminación microbiológica. La acidez del agua de lluvia se debe a presencia de ácido carbónico generado por la reacción del agua con el dióxido de carbono presente de manera natural en la atmósfera. Otro factor que influyó en el valor del pH del agua colectada, fue la proximidad a una vialidad medianamente transitada por automóviles, los cuales liberan dióxido de azufre y óxido de nitrógeno, contaminantes que contribuyen en gran parte a la formación de lluvia ácida (formación de ácido sulfúrico y ácido nítrico).

Debido a que la lluvia es en esencia un proceso de destilación natural, la cantidad de sales disueltas, representadas por la conductividad eléctrica (CE), es muy baja; ya que al presentarse la evaporación como parte del ciclo hidrológico, las sales permanecen en los cuerpos de agua.

El carbono orgánico total (COT) permitió demostrar el bajísimo contenido de materia orgánica presente en el agua pluvial cosechada. La concentración de metales se mantuvo por debajo de los límites de detección; siendo el zinc el único que mostró un valor significativo ( $1.1 \pm 0.5$  mg/L), manteniéndose por debajo del límite permisible por la normatividad (5 mg/L). La presencia de zinc en el AP almacenada se debe al tipo de superficie de captación, ya que el techo del Laboratorio de Modelos Hidráulicos está fabricado con láminas de acero galvanizado, cuyo recubrimiento puede desprender pequeñas trazas de dicho elemento debido al intemperismo.

Para evaluar la eficiencia del sistema de acondicionamiento de AP, al día siguiente del evento de precipitación, se realizaba un muestreo del agua almacenada y del efluente del filtro lento de arena, el cual se mantenía trabajando en continuo.

En la Figura 25 se muestran los valores de turbiedad del agua cruda y del efluente del filtro lento de arena, así como el desempeño del sistema de acondicionamiento de AP en lo referente a parámetros microbiológicos. El inciso a) se muestra lo referente a turbiedad, presentándose una remoción del  $50 \pm 15\%$ . Los valores tanto del agua cruda como del agua filtrada se mantuvieron debajo del límite permitido por la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 (5 UNT).

En el inciso b) se muestran las concentraciones de coliformes totales en el agua cruda y el efluente del filtro lento de arena, presentándose una remoción del  $32 \pm 8\%$ . El inciso c) muestra la remoción de coliformes fecales, mostrando una remoción del  $47 \pm 11\%$ . El lento proceso de maduración del filtro lento de arena no permitió remover completamente los coliformes presentes en el agua cosechada, por lo que un proceso de desinfección es requerido para cumplir con los requerimientos de la normatividad.

Además, estos resultados muestran las altas concentraciones de microorganismos que pueden presentarse en el AP almacenada (hasta 2,200 NMP/100 mL de CT y 130 NMP/100 mL de CF), debido a la presencia aves y pequeños mamíferos que tienen acceso al área de captación, además de aquellos microorganismos que son transportados por el viento. La variación en la concentración de coliformes en el agua almacenada es también un indicativo de la influencia que tienen las condiciones climáticas sobre la calidad del AP cosechada.

Considerando el rendimiento mostrado por el filtro lento de arena durante su proceso de maduración y acondicionamiento de agua pluvial, se concluye que esta clase de sistemas no resulta factible para el acondicionamiento de AP, ya que las bajas concentraciones de nutrientes y materia orgánica ocasionan un lento desarrollo de la capa biológica (schmutzdecke), lo cual ocasiona una remoción ineficiente de los microorganismos. Por lo tanto, resulta recomendable optar por otra clase de sistemas de depuración.

Dados los bajos niveles de turbiedad del AP cosechada ( $< 5$  UNT), se recomienda emplear sistemas de desinfección a base de luz ultravioleta (UV), con el fin de desactivar los organismos patógenos presentes en el agua cruda. Además, se podría emplear un proceso de cloración con el fin de proporcionar una desinfección residual. Los bajos niveles de materia orgánica representan una característica ventajosa en este apartado, ya que se disminuye la posibilidad de la formación de subproductos, como es el caso de los trihalometanos

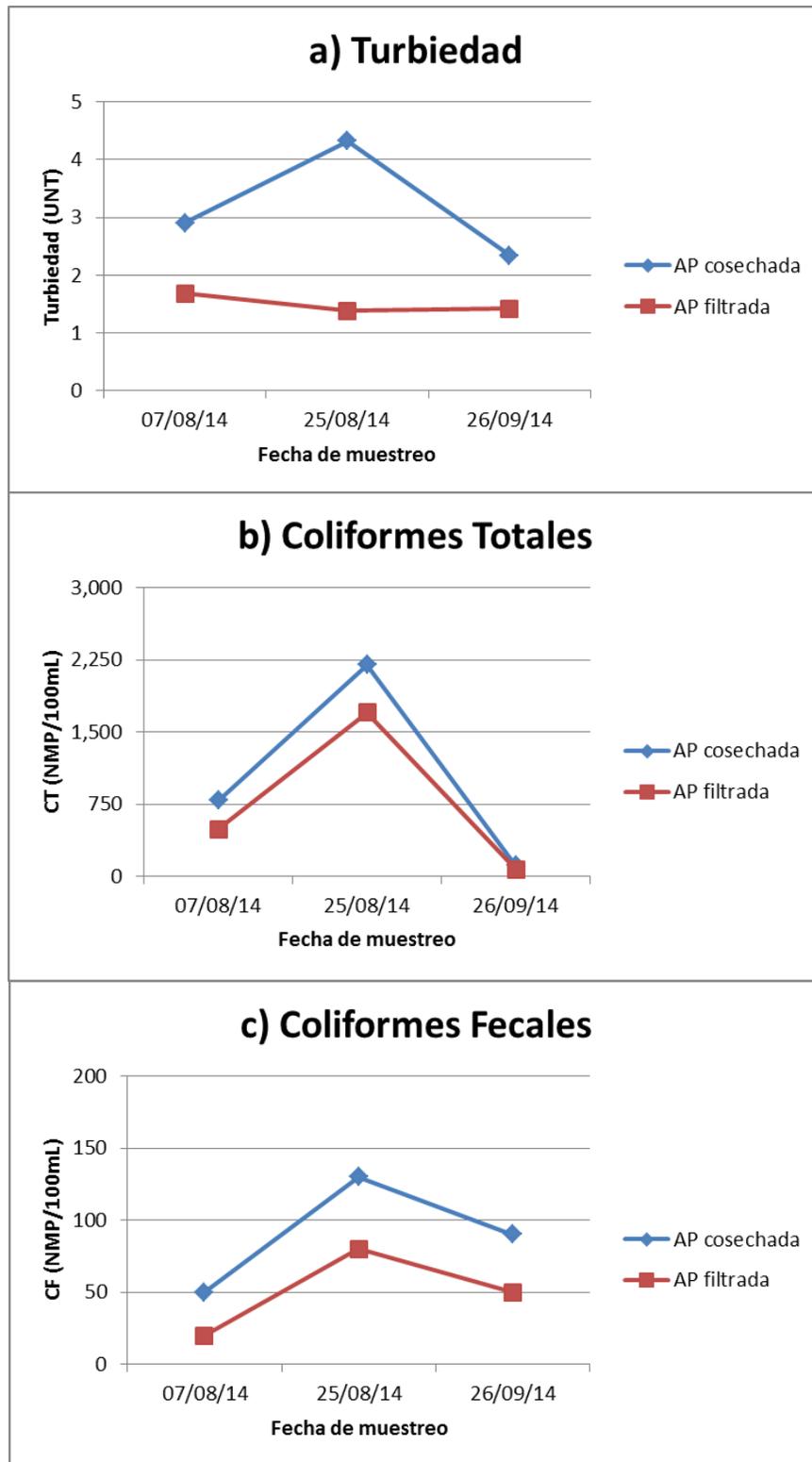


Figura 25. Remoción de turbiedad y contaminación microbiológica del AP cosechada

### 5.3. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas grises de regadera

La eficiencia del tren de tratamiento de AG domésticas provenientes del aseo personal, se evaluó al comparar los resultados obtenidos de los muestreos, con los límites permisibles de calidad para su reutilización en inodoros planteados por Li et al. (2009). La Tabla 12 muestra la caracterización de las AG procedentes de la regadera, correspondiente a las AG crudas tras haber sido cribadas (malla fina con abertura de 1 mm<sup>2</sup>). El ANEXO 7 muestra los valores correspondientes a la medición de dichos parámetros.

Tabla 12. Caracterización de las aguas grises provenientes del aseo personal

Parámetros	Unidades	Aguas Grises	Uso Inodoro (Li et al., 2009)
Temperatura	°C	18.8 ± 0.8	-
Conductividad eléctrica	µS/cm	415 ± 11	-
Turbiedad	UNT	345 ± 41	< 5
pH	-	7.6 ± 0.2	6 - 9
Alcalinidad	mg/L CaCO <sub>3</sub>	255.3	-
Acidez	mg/L CaCO <sub>3</sub>	10	-
Dureza total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	125.1	-
N-Nitratos	mg/L N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.7	-
Cloruros	mg/L Cl <sup>-</sup>	35.6	-
Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	15.4	-
Fósforo total	mg/L P <sub>t</sub>	0.1	-
Demanda química de oxígeno	mg/L O <sub>2</sub>	624 ± 61	-
Calcio	mg/L Ca	24.9	-
Hierro	mg/L Fe	< 0.5	-
Magnesio	mg/L Mg	15.5	-
Potasio	mg/L K	9.8	-
Sodio	mg/L Na	44.5	-
Zinc	mg/L Zn	< 0.5	-
Sólidos disueltos totales	mg/L SDT	208 ± 6	< 1500
Coliformes totales	NMP/100 mL CT	9930 ± 7450	< 10000
Coliformes fecales	NMP/100 mL CF	300 ± 220	< 1000

Los resultados de la caracterización muestran las altas concentraciones materia suspendida y materia orgánica presentes en las AG de regadera, por lo que es necesario un tratamiento previo antes de su reutilización en usos donde no se requiera agua de calidad potable, en este

caso la descarga en inodoros. El valor del pH se mostró dentro del rango estipulado por la normatividad, debido a que el agua empleada para el aseo personal provenía directamente de la red de agua potable, la cual cuenta con un pH cercano al neutro. Los valores medios referentes a CT y CF se mostraron dentro del rango permisible para la reutilización, aunque su alta variación hace necesario aplicar un tratamiento previo para garantizar su calidad.

El proceso de filtración de AG se realizó durante el mes de octubre del año 2014, mediante una filtración por lotes 36 L al día; dicho volumen corresponde a las AG diluidas con AP previamente acondicionada durante el proceso de maduración del FLA, con una proporción de 1:1. Este proceso se llevó a cabo hasta que se presentara la colmatación del filtro lento de arena. Conforme el filtro de arena se acercaba a la colmatación, el flujo en el efluente disminuía paulatinamente, por lo que diariamente se corregía el flujo mediante la válvula de compuerta ubicada en la parte inferior del cuerpo del filtro de arena, manteniendo de esta manera un flujo constante de 96 L/d. Finalmente, la colmatación se presentó a los 15 días de haber comenzado el proceso, momento en el que el flujo del efluente del filtro de arena fue nulo. El volumen total de AG que fue tratado fue de 540 L. Aunque el proceso de tratamiento de AG se realizaba diariamente (36 L/d), los muestreos se realizaron cada tercer día, dado que las mediciones diarias no presentaban diferencias significativas entre sí.

La Figura 26 muestra la remoción de turbiedad, DQO y ST a través del ciclo de funcionamiento del sistema. El inciso a) muestra la remoción de la turbiedad, presentando un valor del  $88 \pm 4\%$ , mostrando un desempeño constante a pesar de las variaciones en el influente, logrando una turbiedad de 14.4 UNT al final de la carrera del filtro. Aunque se tiene una disminución importante en la turbiedad, no se logró cumplir con los criterios de reutilización planteados por la normatividad (5 UNT). En el inciso b) se presenta la disminución paulatina de la concentración de la demanda química de oxígeno (DQO) en el efluente, a pesar de que se presentaban fluctuaciones considerables en la calidad del influente. Se obtuvieron porcentajes de remoción del  $75 \pm 11\%$ . El inciso c) muestra el rendimiento del sistema en lo referente a sólidos disueltos totales (SDT), mostrando un incremento en la concentración del efluente, signos de la colmatación. En general, la remoción de SDT fue del  $52 \pm 21\%$ . Los valores tanto del influente como del efluente se mostraron por debajo de los 1,500 mg/L SDT estipulados por la normatividad.

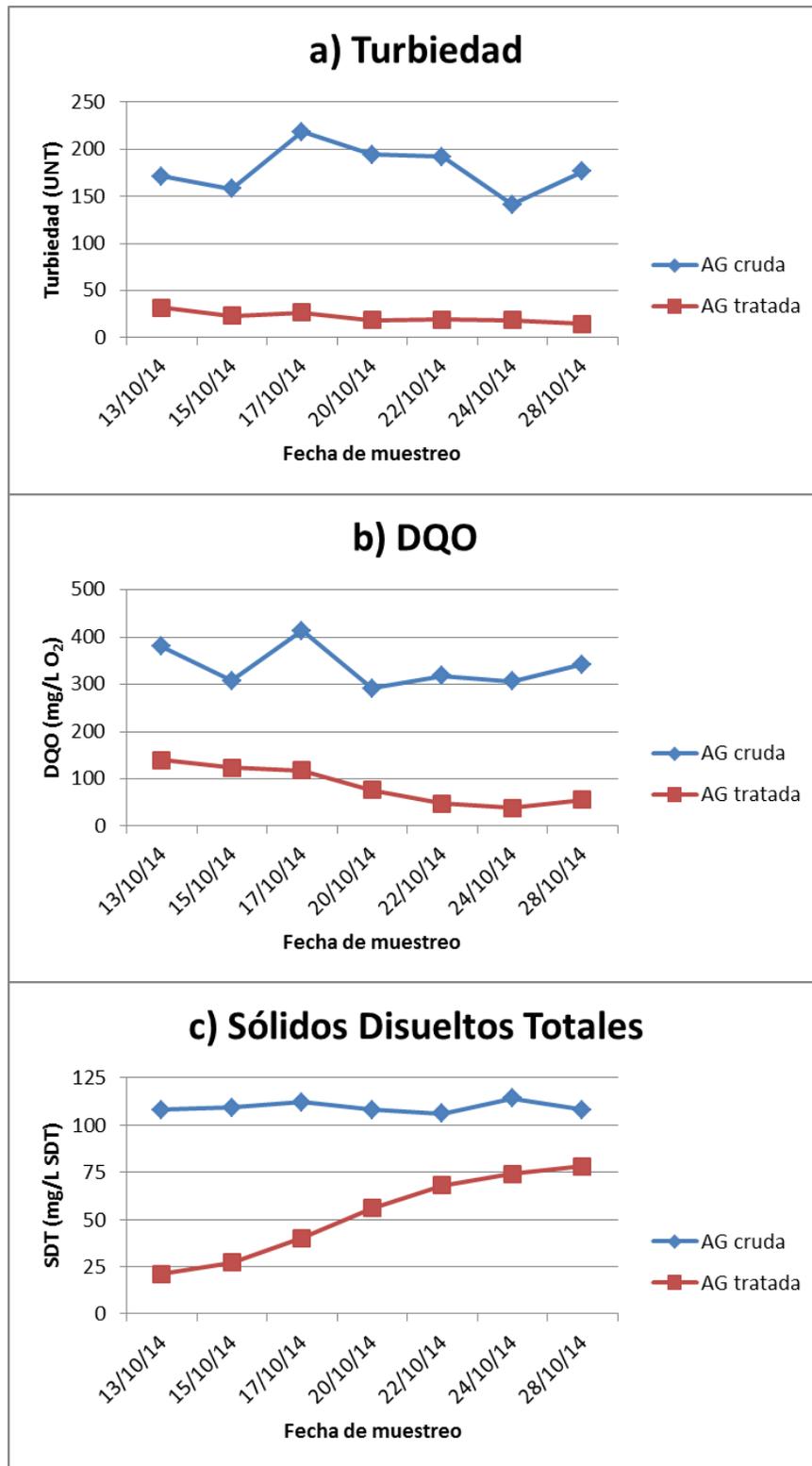


Figura 26. Remoción de turbiedad, DQO y SDT de las aguas grises de regadera

La Figura 27 muestra el desempeño del sistema de tratamiento de AG en lo referente a parámetros microbiológicos. En el inciso a) se muestran la remoción de coliformes totales (CT), presentando un valor del  $34 \pm 12\%$ . El inciso b) muestra la remoción de coliformes fecales, mostrando una remoción del  $53 \pm 6\%$  de CF. Tanto el agua tratada como el agua cruda presentaron valores por debajo del rango estipulado en la normatividad referente a la reutilización de AG en inodoros (10,000 NMP/100 mL para CT y 1,000 NMP/100 mL para CF). Cabe recordar que estas mediciones corresponden al AG diluida 1:1 con AP previamente acondicionada.

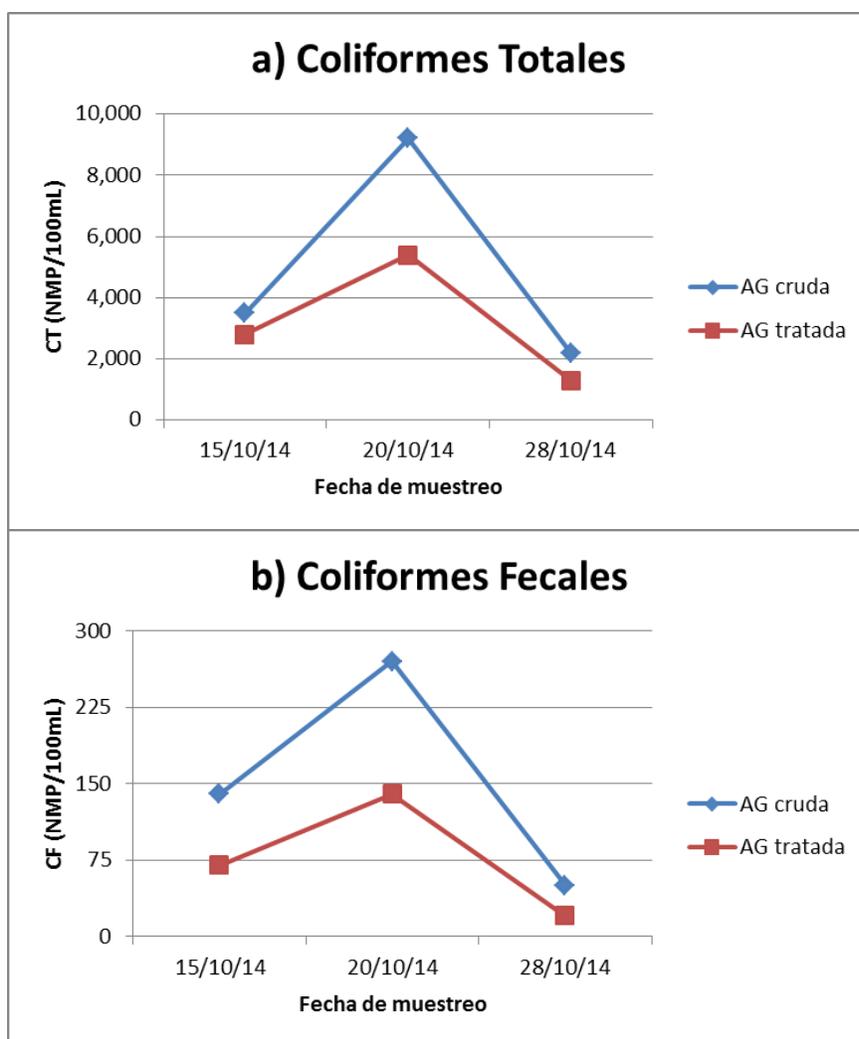


Figura 27. Remoción de contaminación microbiológica de las aguas grises

Dado el desempeño mostrado por el sistema de tratamiento de AG de regadera planteado en el presente trabajo, se recomienda adicionar otros procesos de filtración al final de dicho sistema, con el fin de reducir los niveles de turbiedad y materia orgánica del efluente. Posteriormente se podría incluir un sistema de desinfección con cloro para reducir la concentración de organismos patógenos y evitar su proliferación en el agua almacenada, garantizando la calidad del agua para su reutilización en el inodoro.

#### **5.4. Propuesta arquitectónica de los sistemas de cosecha de AP y reutilización de AG**

Como resultado del presente trabajo de investigación, se realizó una propuesta arquitectónica correspondiente a una vivienda de nivel medio con cuatro habitantes ubicada dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, en la cual se incorpora la utilización de un sistema de cosecha de agua pluvial, así como un sistema de reutilización de aguas grises procedentes de la regadera. La vivienda cuenta con tres recámaras, dos y medio baños, sala, comedor, cocina, garaje y patio de servicio, distribuyéndose en planta baja y planta alta (ANEXO 9), teniendo una altura de entrepiso de 2.5 m.

Se consideró un nivel de precipitación media anual de 1,010 mm anuales (vivienda ubicada en el municipio de Temoaya); el área de captación ( $80 \text{ m}^2$ ) lo constituye el techo de la vivienda construido de concreto con una pendiente del 2% a dos aguas. El agua de lluvia se emplea únicamente para el abastecimiento de la lavadora ( $22 \text{ L/hab*d}$ ), mientras que las aguas grises fueron destinadas a la descarga de inodoros ( $24 \text{ L/hab*d}$ ). Ambos sistemas trabajan mediante redes de distribución completamente independientes a la red de suministro de agua potable proveniente de la red municipal.

El sistema de cosecha de AP funciona de la siguiente manera. Primero, el agua de lluvia es captada y recolectada en el techo de la vivienda, dirigiendo el agua hacia las dos bajantes de PVC de 10 cm de diámetro, las cuales cuentan con rejillas para impedir el paso de hojas y piedras. El segundo paso es la intercepción de los primeros minutos de lluvia mediante una tubería vertical de PVC de 10 cm de diámetro con capacidad de retener 40 L de AP (0.10 m de diámetro por 5 m de altura). Se cuenta con un interceptor de AP en cada bajante. Una vez que el interceptor ha llegado a su máxima capacidad, el agua de lluvia es derivada hacia un filtro

de arena sílice donde se retiran los sólidos suspendidos presentes en el agua. El efluente del filtro de arena es dirigido directamente a la cisterna, la cual cuenta con una capacidad de 10,000 L, sus dimensiones son 2.5 x 2.5 x 1.6 m y está fabricada de concreto armado. Posteriormente, se emplea una bomba para dirigir el agua desde la cisterna hasta un recipiente plástico (tinaco) ubicado en la azotea, el cual tiene la capacidad de almacenar 1,100 L. Es en este punto donde se realiza la desinfección con hipoclorito de sodio con una relación de 1 L de cloro por cada 8,000 de agua (Isla Urbana, 2014). El agua de lluvia, una vez que ha sido desinfectada, es dirigida por gravedad hacia el patio de servicio, donde es empleada en la lavadora.

Adicionalmente, el agua que se almacena en el dispositivo interceptor de primeras lluvias puede ser empleada para riego de plantas en el interior de la vivienda, así como para el lavado de autos o limpieza en general. El esquema general del sistema de cosecha y acondicionamiento de AP se muestra en la Figura 28.

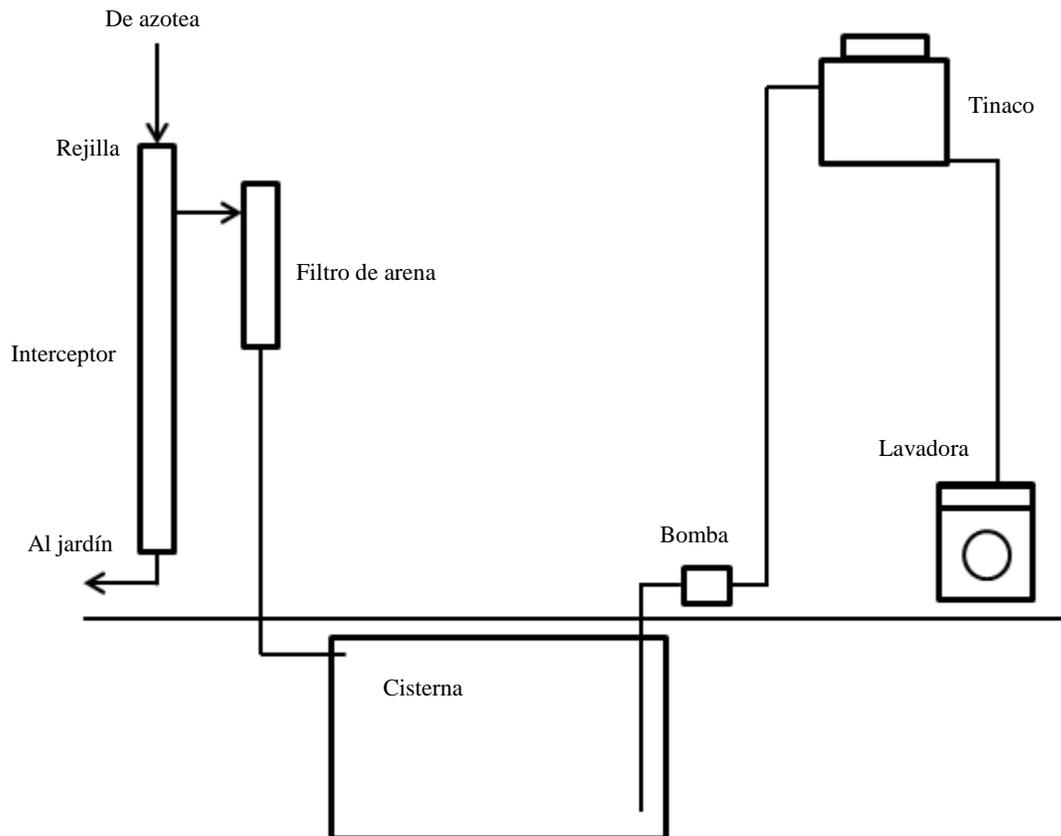


Figura 28. Propuesta del sistema de acondicionamiento de agua pluvial

Al realizar el balance hídrico de utilización de AP para su uso en lavadora (ANEXO 8), se tiene un ahorro anual del 14%. Logrando abastecer esta clase de demanda por un periodo de 225 días, lo cual representa la cifra de 19,800 L de agua potable que son suplidos por AP anualmente. La Figura 29 muestra el desempeño del almacenamiento de la cisterna de 10,000 L a lo largo de los días de utilización de AP.

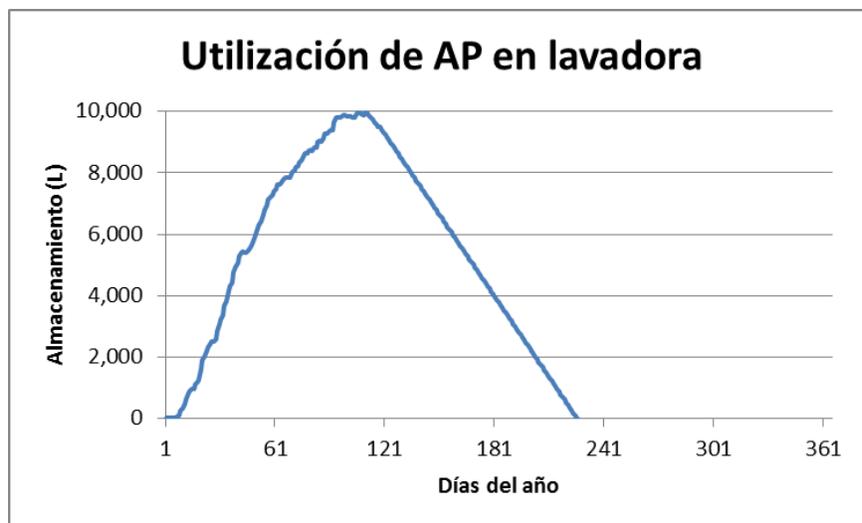


Figura 29. Utilización anual de AP dentro de una vivienda unifamiliar nivel medio

En lo referente al tratamiento de aguas grises, el sistema propuesto trabaja de la siguiente manera. Las AG provenientes de la regadera pasan a través de una coladera y una malla fina con el fin de retirar partículas como pelo y pelusas. Posteriormente, las AG son vertidas hacia un filtro grueso constituido por grava y gravilla, el cual trabaja por gravedad y se encuentra ubicado en la bajada de aguas grises, teniendo un diámetro de 10 cm y fabricado con PVC.

El efluente del filtro grueso es dirigido hacia un filtro de arena, el cual trabaja con flujo horizontal, promoviendo la remoción de sólidos suspendidos, ya que, además de atravesar el medio filtrante, se favorece la sedimentación de los sólidos. Una vez que ha sido filtrada, el agua ingresa a un depósito de regulación con capacidad de almacenar la aportación diaria de AG de regadera generada en la vivienda (148 L). Se emplea mampostería para la construcción del filtro de arena y el depósito de regulación. Posteriormente, el agua es bombeada desde el depósito de regulación hacia el tinaco ubicado en la azotea de la vivienda, pasado a través de

un filtro hilado y otro más de carbón activado con el fin de reducir la cantidad de sólidos disueltos y eliminar color y olor de las aguas residuales. Una vez que el agua ha llegado al tinaco, se realiza una desinfección con cloro. Finalmente, el agua es distribuida por gravedad hacia los muebles sanitarios (inodoros) ubicados en el interior de la vivienda. El esquema general del sistema de tratamiento y reutilización de AG procedentes de la regadera se muestra en la Figura 30.

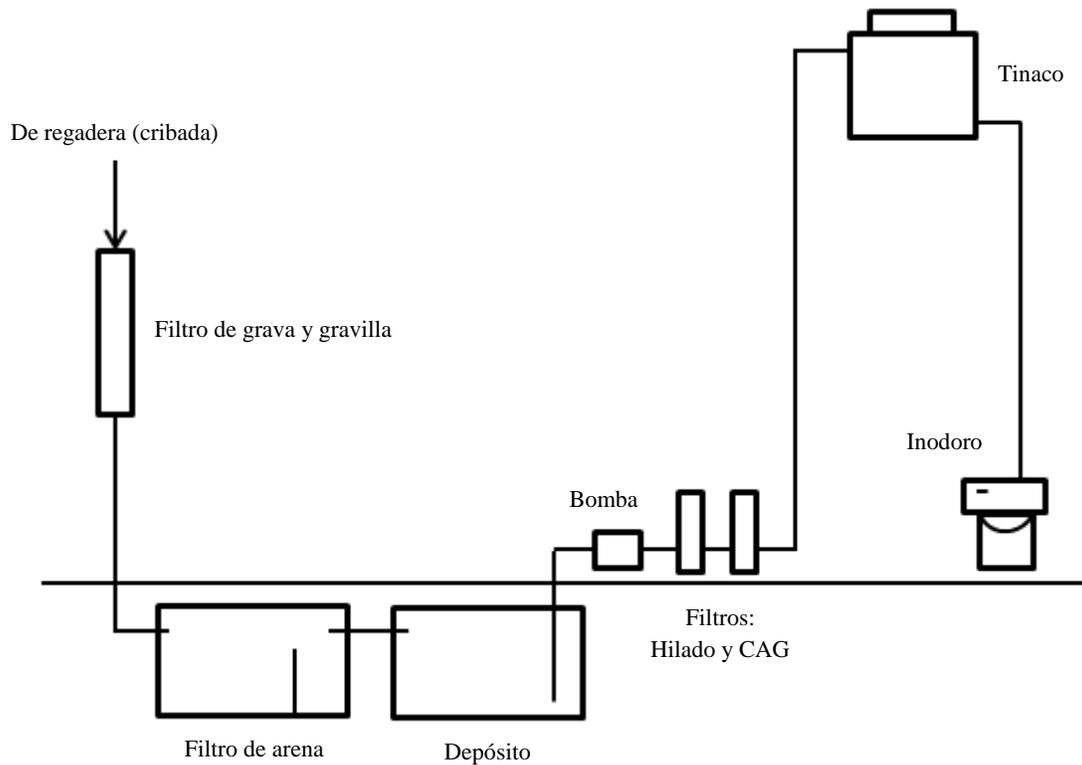


Figura 30. Propuesta del sistema de tratamiento de aguas grises

El balance hídrico correspondiente a la reutilización de AG, muestra que la oferta (37 L/hab\*d procedentes de la regadera) excede a la demanda (22 L/hab\*d para inodoros); por lo tanto, la reutilización de AG procedentes de la regadera puede abastecer diariamente a los inodoros durante todo el año, logrando un ahorro de agua potable del 25% anual (35,040 L al año). Es así como se logra un ahorro total de agua potable del 39% anual al emplear esta clase de sistemas de cosecha de AP y reutilización de AG de regadera en una vivienda nivel medio de cuatro habitantes.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

Considerando las condiciones climatológicas prevalecientes en la ZMVT, además del área de captación y los consumos de agua potable dentro una vivienda unifamiliar tipo de nivel medio, es posible obtener ahorros del 2 al 49% anual de agua potable al implementar sistemas de cosecha de AP.

Con base en la caracterización realizada al AP, es posible concluir que, a excepción del pH y la concentración de coliformes, el agua de lluvia colectada en una superficie de captación de lámina galvanizada, cuenta con una calidad aceptable para su utilización en usos domésticos no potables.

El proceso de depuración de AP implementado en el presente trabajo (filtración lenta con arena) presentó porcentajes de remoción del  $50 \pm 15\%$ ,  $32 \pm 8\%$  y  $47 \pm 11\%$  referentes a turbiedad, CT y CF respectivamente, resultando insuficiente para cumplir con la normatividad referente a agua potable.

Considerando el rendimiento mostrado por el filtro lento de arena durante su proceso de maduración y acondicionamiento de agua pluvial, se concluye que esta clase de sistemas no resultan factibles para el acondicionamiento de AP (remoción de contaminación microbiológica), ya que las bajas concentraciones de nutrientes y materia orgánica ocasionan un lento desarrollo de la capa biológica (schmutzdecke).

El sistema de tratamiento de AG de regadera planteado en el presente estudio (pretratamiento, filtración gruesa con grava, filtración lenta con arena y adsorción sobre CAG) presentó porcentajes de remoción del  $88 \pm 4\%$ ,  $75 \pm 11\%$ ,  $52 \pm 21\%$ ,  $34 \pm 12\%$  y  $53 \pm 6\%$  en lo referente a turbiedad, DQO, SDT, CT y CF respectivamente, logrando cumplir con lo estipulado en la normatividad en lo referente a contaminación biológica (coliformes), no así en lo que respecta a niveles de turbiedad y materia orgánica.

## 6.2. Recomendaciones

En lo referente al análisis de disponibilidad hídrica referente al aprovechamiento de agua pluvial, se recomienda realizar un estudio que abarque un área mayor de estudio, ya sea a nivel estatal o nacional.

Considerando el rendimiento mostrado por el filtro lento de arena durante su proceso de maduración y acondicionamiento de agua pluvial, resulta recomendable optar por otra clase de sistemas de depuración. Dados los bajos niveles de turbiedad del AP cosechada ( $< 5$  UNT), se recomienda emplear sistemas de desinfección a base de luz ultravioleta (UV), con el fin de desactivar los organismos patógenos presentes en el agua cruda.

Un proceso de cloración (empleando una solución de hipoclorito de sodio o bien hipoclorito de calcio granulado) podría ser empleado como alternativa a la desinfección mediante UV; proporcionando de esta manera una desinfección residual. Los bajos niveles de materia orgánica representan una característica ventajosa en este apartado, ya que se disminuye la posibilidad de la formación de subproductos, como es el caso de los trihalometanos; asimismo, el pH ácido del AP colectada permite una desinfección eficaz al emplear hipoclorito de sodio (formación de ácido hipocloroso, HOCl).

El pH ácido del AP podría neutralizarse empleando un filtro neutralizante a base de calcita. Dicho filtro podría ser instalado previo al filtro de arena, para que los sólidos que pudiesen desprenderse de la calcita fueran retenidos por el filtro granular.

En lo referente al tratamiento de AG desarrollado en el presente trabajo, se recomienda adicionar otros procesos al final de dicho sistema. Una opción es tratar el efluente mediante un filtro adicional, con el fin de reducir la turbiedad y la cantidad de materia orgánica. Posteriormente se podría incluir un sistema de desinfección con cloro, con el fin de reducir la concentración de microorganismos y evitar su proliferación durante el almacenamiento, cumpliendo de esta manera con lo estipulado por la normatividad referente a la reutilización de AG en inodoros.

## 7. REFERENCIAS

- Al-Jayyousi, O. (2003). Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, 156, 181-192.
- Allen, L., Christian-Smith, J. y Palaniappan, M. (2010). Overview of Greywater Reuse: The Potential of Greywater Systems to Aid Sustainable Water Management. Pacific Institute. Consultado el 14 de marzo de 2013, de <http://pacinst.org/publication/pacific-institute-analyzes-the-potential-of-greywater-reuse-in-a-new-report/>
- Apliaqua. (2013). *Depuración aguas grises*. Recuperado el 12 de mayo de 2013, de <http://depuraciondelagua.com/aguas-grises>
- Campisano, A. y Modica, C. (2012). Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources, Conservation and Recycling*, 63, 9-16.
- Capos, L., Su, M., Graham, N. y Smith, S. (2002). Biomass development in slow sand filters. *Water Research*, 36, 4543-4551.
- Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento de Agua de Lluvia, CIDECALLI. (2007). *Sistema de captación de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano (COLPOS 1) a nivel de familia*. Consultado el 02 de diciembre de 2013, de <http://www.pnuma.org/reclnat/esp/documentos/cap4.pdf>
- Christova-Boal, D., Eden, R. y McFarlane, S. (1996). An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106, 391-397.
- Government of Western Australia. (2010). Code of Practice for the Reuse of Greywater. Consultado el 19 de julio de 2013, de [http://www.public.health.wa.gov.au/cproot/1340/2/COP%20Greywater%20Reuse%202010\\_v2\\_130103.pdf](http://www.public.health.wa.gov.au/cproot/1340/2/COP%20Greywater%20Reuse%202010_v2_130103.pdf)
- Dallas, S. y Ho, G. (2005). Subsurface flow reedbeds using alternative media for the treatment of domestic greywater in Monteverde, Costa Rica, Central America. *Water Science and Technology*, 51, 119-128.
- Ellis, K. y Aydin, M. (1995). Penetration of solids and biological activity into slow sand filters. *Water Research*, 29, 1333-1341.
- Eroksuz, E. y Rahman, A. (2010). Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1449-1452.
- Evans, C., Coombes, P. y Dunstan, R. (2006). Wind, rain and bacteria: the effect of weather on the microbial composition of roof-harvested rainwater. *Water Research*, 40, 37-44.
- Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Taya, C., Rieradevall, J. y Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessment in Spain. *Water Research*, 45, 3245-3254.
- Fernández, A. (2006). *Reutilización de aguas grises*. Recuperado el 09 de abril de 2013, de [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/urbano/149371.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/149371.php)
- Friedler, E., (2004). Quality of individual domestic greywater streams and its implication for on-site treatment and reuse possibilities. *Environment Technology*, 25, 997-1008.

- Friedler, E., Kovatio, R. y Ben-Zvil, A. (2006). Comparative study of the microbial quality of greywater treated by three on-site treatment systems. *Environment Technology*, 27, 653-663.
- Friedler, E. y Gilboa, Y. (2010). Performance of UV disinfection and the microbial quality of greywater effluent along a reuse system for toilet flushing. *Science of the Total Environment*, 408, 2109–2117.
- Friedler, E., Yardeni, A., Gilboa, Y. y Alfiya, Y. (2011). Disinfection of greywater effluent and regrowth potential of selected bacteria. *Water Science and Technology*, 63, 931-940.
- Furumai, H. (2008). Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 340–346.
- Gallego Alarcón, Iván. (2010). *Modelación matemática de biofiltro inserto en el star de una granja trutícola alimentada por cosecha pluvial*. Tesis doctoral. CIRA, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Garrido Hoyos, Sofía. (2003). *Rescatando el agua del cielo para el uso doméstico en la Tierra*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Consultado el 17 de enero de 2013, de [http://hypatia.morelos.gob.mx/no14/Rescatando\\_agua/aguadecielo.html](http://hypatia.morelos.gob.mx/no14/Rescatando_agua/aguadecielo.html)
- Ghisi, E. y Mengotti, S. (2007). Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil. *Building and Environment*, 42, 1731–1742.
- Ghisi, E., Bressan, D. y Martini M. (2007). Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building and Environment*, 42, 1654-1666.
- Gilboa, Y. y Friedler, E. (2008). UV disinfection of RBC-treated light greywater effluent: Kinetics, survival and regrowth of selected microorganisms. *Water Research*, 42, 1043-1050.
- Gobierno del Estado de México. (2005). *Plan Regional de Desarrollo Urbano del Valle de Toluca*. Recuperado el 12 de enero de 2014, de <http://seduv.edomexico.gob.mx>
- Gobierno del Estado de México. (2012). *Programa para mejorar la calidad del aire del Valle de Toluca (2012-2017)*. Recuperado el 22 de febrero de 2014, de [http://portal2.edomex.gob.mx/idcprod/groups/public/documents/edomex\\_archivo/sma\\_pdf\\_calidad\\_aire01.pdf](http://portal2.edomex.gob.mx/idcprod/groups/public/documents/edomex_archivo/sma_pdf_calidad_aire01.pdf)
- Gurung, T. y Sharma, A. (2014). Communal rainwater tank systems design and economies of scale. *Journal of Cleaner Production*, 67, 26-36.
- Halalshah, M., Dalahmeh, S., Sayed, M., Suleiman, W., Shareef, M., Mansour, M. y Safi, M. (2008). Grey water characteristics and treatment options for rural areas in Jordan. *Bioresource Technology*, 99, 6635–6641.
- Helmreich, B. y Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248, 118-124.
- Hernández, L., Temmink, H., Zeeman, G. y Buisman, C. (2011). Characterization and anaerobic biodegradability of grey water. *Desalination*, 270, 111-115.
- Hidrología Sostenible. (2013). *Baoris, maravillas desconocidas*. Consultado el 22 de febrero de 2014, de <http://www.hidrologiasostenible.com/baoris-una-maravilla-desconocida/>

- Hocaoglu, S., Atasoy, E., Baban, A. y Orhon, D. (2013). Modeling biodegradation characteristics of grey water in membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 429, 139–146.
- Imteaz, M., Ahsan, A., Naser, J. y Rahman, A. (2011). Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model. *Resources, Conservation and Recycling*, 56, 80-86.
- Instituto Internacional de Recursos Renovables. IIRRI. (2013). *Sistema de captación de agua de lluvia*. Consultado el 27 de octubre de 2013, de <http://www.irrimexico.org/agua/como-funciona-nuestro-sistema/>
- Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. (2009). *Aprovechamiento de aguas grises*. Recuperado el 27 de abril de 2013, de <http://vivienda.ine.gob.mx/index.php/agua/recoleccion-recliclado-y-reuso-de-agua/aguas-grises>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2010). *Censo de población y vivienda 2010*. Recuperado el 17 de marzo de 2014, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/>
- Isla Urbana. (2014) *Tlaloque. Separador de Primeras Lluvias*. Recuperado el 06 de diciembre de 2013, de [www.islaurbana.mx](http://www.islaurbana.mx)
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. INECC. (2014). *Lluvia ácida*. Consultado el 25 de septiembre de 2014, de <http://www.inecc.gob.mx/calaires-informacion-basica/554-calaires-lluvia-acida>
- Jefferson, B., Laine, A., Parsons, S., Stephenson, T. y Judd, S. (2000). Technologies for domestic wastewater recycling. *Urban Water*, 1, 285–292.
- Jenkins, M., Tiwari, S. y Darby, J. (2011). Bacterial, viral and turbidity removal by intermittent slow sand filtration for household use in developing countries: experimental investigation and modeling. *Water Research*, 45, 6227-6239.
- Khastagir, A. y Jayasuriya, N. (2010). Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation. *Journal of Hydrology*, 381, 181-188.
- Kim, R., Lee, S., Jeoung, J., Lee, J. y Kim, Y. (2007). Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. *Desalination*, 202, 326-332.
- Kivaisi, A. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological Engineering*, 16, 545–560.
- Lee, J., Bak, G. y Han, M. (2012). Quality of roof-harvested rainwater – Comparison of different roofing materials. *Environmental Pollution*, 162, 422-429.
- Li, F., Wichmann, K. y Otterpohl, K. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment*, 407, 3439–3449.
- Li, Z., Boyle, F. y Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination*, 260, 1–8.
- Liu, S., Butler, D., Memon, F., Mackropoulos, C., Avery, L. y Jefferson, B. (2010). Impacts of residence time during storage on potential of water saving for grey water recycling system. *Water Research*, 44, 267-277.
- Maimon, A., Friedler, E., Gross, A. (2014). Parameters affecting greywater quality and its safety for reuse. *Science of the Total Environment*, 487, 20–25.
- March, J.G., Gual, M. y Orozco, F. (2004). Experiences on greywater re-use for toilet flushing in a hotel (Mallorca Island, Spain). *Desalination*, 164, 241-247.

- Marsilli, Alejandro. (2005). *Tratamiento de aguas residuales*. Recuperado el 21 de abril de 2013, de <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm>
- Maya Rueda, Violeta. (2010). *Evaluación de la conservación y eficiencia del consumo de agua mediante el uso de tecnologías de ahorro en el sector urbano*. Tesis de maestría. CIRA, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Mendez, C., Klenzendorf, J., Afshar, B., Simmons, M., Barrett, M., Kinney, K. y Kirisits, M. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45, 2049-2059.
- Merz, C., Scheumann, R., El Hamouri, B. y Kraume, M. (2007). Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club. *Desalination*, 215, 37-43.
- Montgomery J., Consulting Engineers, Inc. (1985). *Water treatment principles and design* (pp. 545-546). Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
- Moreira, R., Lúcia, M., Castro, I., Fonseca, A. (2012). Rainwater treatment in airports using slow sand filtration followed by chlorination: Efficiency and costs. *Resources, Conservation and Recycling*, 65, 124-129
- Mourad, K., Berndtsson, J. y Berndtsson, R. (2011). Potential fresh water saving using greywater in toilet flushing in Syria. *Journal of Environmental Management*, 92, 2447-2453.
- Mun, J. y Han, M. (2012). Design and operational parameters of a rooftop rainwater harvesting system: Definition, sensitivity and verification. *Journal of Environmental Management*, 93, 147-153.
- Muthukumar, S., Baskaran, K. y Sexton, N. (2011). Quantification of potable water savings by residential water conservation and reuse – A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 945-952.
- Naddeo, V., Scannapieco, D. y Belgiorno, V. (2013). Enhanced drinking water supply through harvested rainwater treatment. *Journal of Hydrology*, 498, 287-291.
- Nghiem, L.D., Oschmann, N. y Schäfer, A.I. (2006). Fouling in grey water recycling by direct ultrafiltration. *Desalination*, 187, 283-290.
- Nolde, E. (1999). Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings – over ten years experience in Berlin. *Urban Water*, 1, 275-284.
- Nolde, E. (2007). Possibilities of rainwater utilization in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination*, 215, 1-11.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Organización Mundial de la Salud OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Consultado el 19 de noviembre de 2013, de [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_full\\_lowres.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf)
- Palacio, N. (2010). Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia. *Gestión y Ambiente*, 13, 25-39.
- Palacios, J. (2001). *La casa ecológica. Cómo construirla*, pp. 91-95. Editorial Trillas. México.
- Palla, A., Gnecco, I. y La Barbera, P. (2012). Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 71-80.

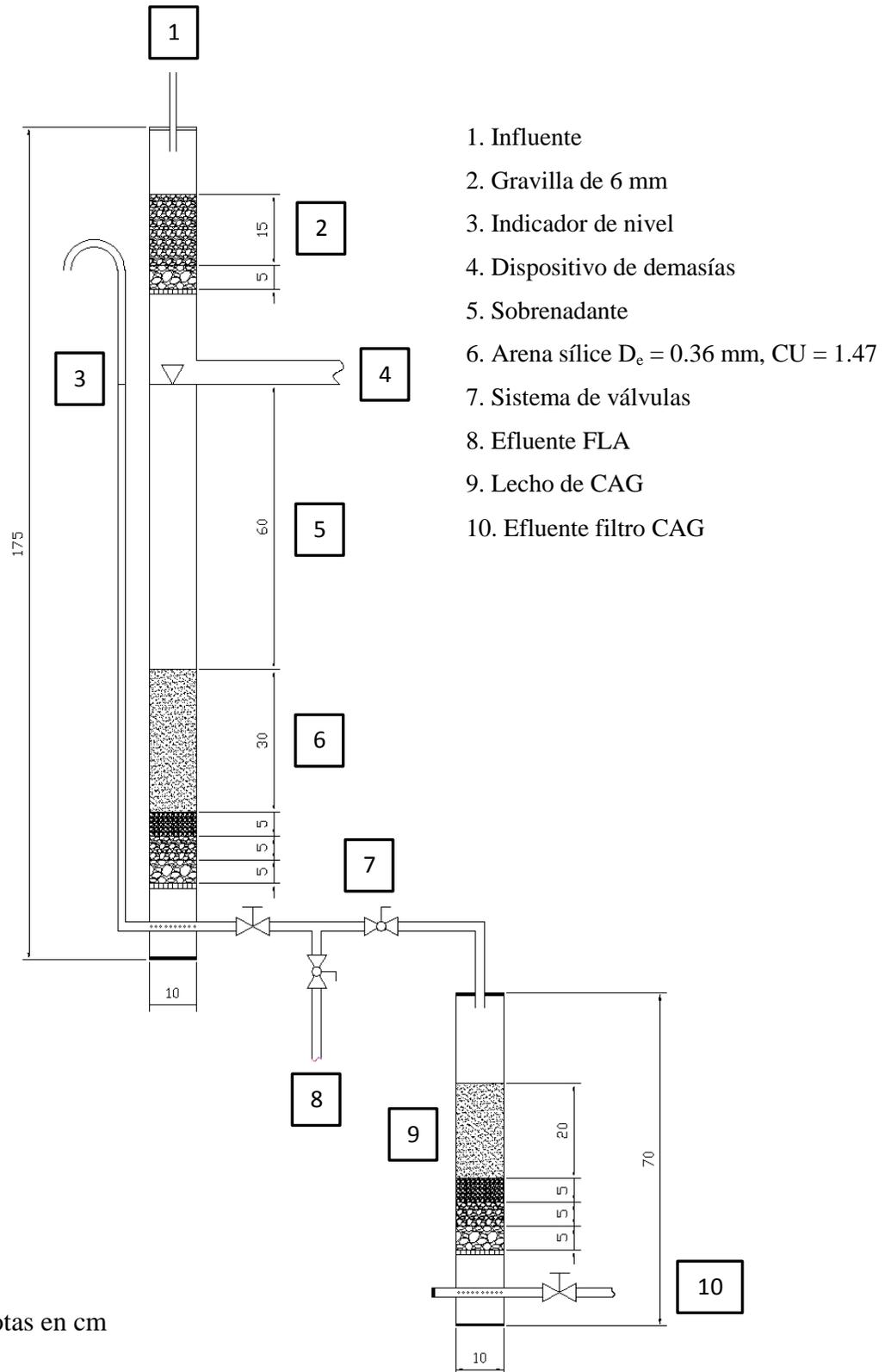
- Paulo, P., Azevedo, C., Begosso, L., Galbiati, A. y Boncz, M. (2013). Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. *Ecological Engineering*, 50, 95– 100.
- Pontos. (2010). *Pontos AquaCycle 2500 Brochure*. Consultado el 12 de noviembre de 2013, de [http://pro.hansgrohe.de/assets/global/pontos\\_ac2500\\_broschuere.pdf](http://pro.hansgrohe.de/assets/global/pontos_ac2500_broschuere.pdf).
- Prada, A. (2001). *El filtro lento de arena para uso doméstico Manual de construcción, operación y mantenimiento*. Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Básicas e ingeniería. Colombia. Consultado el 06 de octubre de 2013, de <http://es.scribd.com/doc/96049590/El-Filtro-de-Arena-Domestico-by-Abelardo-Prada-Matiz>
- Ramon, G., Green, M., Semiat, R. y Dosoretz, C. (2004). Low strength graywater characterization and treatment by direct membrane filtration. *Desalination*, 170, 241-250.
- Santasmasas, C., Rovira, M., Clarens, F. y Valderrama, C. (2013). Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 102– 107.
- Servicio Meteorológico Nacional. SMN. (2013). Normales climatológicas por estación. Consultado el 10 de marzo de 2013, de [http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=189:estado-de-mexico&catid=14:normales-por-estacion](http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=189:estado-de-mexico&catid=14:normales-por-estacion)
- Thomas, R., Kirisits, M., Lye, D. y Kinney, K. (2014). Rainwater harvesting in the United States: a survey of common system practices. *Journal of Cleaner Production*, 75, 166-173.
- Vakil, K., Sharma, M., Bhatia, A., Kazmi, A. y Sarkar, S. (2014). Characterization of greywater in an Indian middle-class household and investigation of physicochemical treatment using electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 130, 160-166.
- Vélez González, Roberto. (2002). *La ecología en el diseño arquitectónico*. Editorial Trillas. México.
- Vialle, C., Sablayrolles, C., Lovera, M., Jacob, S., Huau, M. y Montrejaud-Vignoles, M. (2011). Monitoring of water quality from roof runoff: Interpretation using multivariable analysis. *Water Research*, 45, 3765-3775.
- Winward, G., Avery, L., Frazer-Williams, R., Pidou, M., Jeffrey, P., Stephenson, T. y Jefferson, B. (2008). A study of the microbial quality of greywater and an evaluation of treatment technologies for reuse. *Ecological Engineering*, 32, 187-197.
- Winward, G., Avery, L., Stephenson, T. y Jefferson, B. (2008). Chlorine disinfection of grey water for reuse: Effect of organics and particles. *Water Research*, 42, 483 – 491
- World Health Organization, WHO. (2006). *Seminar pack for drinking-water quality*. Consultado el 11 de octubre de 2013, de <http://www.who.int/>
- Zhang, Y., Chen, D., Chen, L. y Ashbolt, S. (2009). Potential for rainwater use in high-rise buildings in Australian cities. *Journal of Environmental Management*, 91, 222-226.
- Zheng, X., Mehrez, R., Jekel, M. y Ernst, M. (2009). Effect of slow sand filtration of treated wastewater as pre-treatment to UF. *Desalination*, 249, 591-595.

## ANEXOS

### ANEXO 1. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS UBICADAS EN LA ZMVT

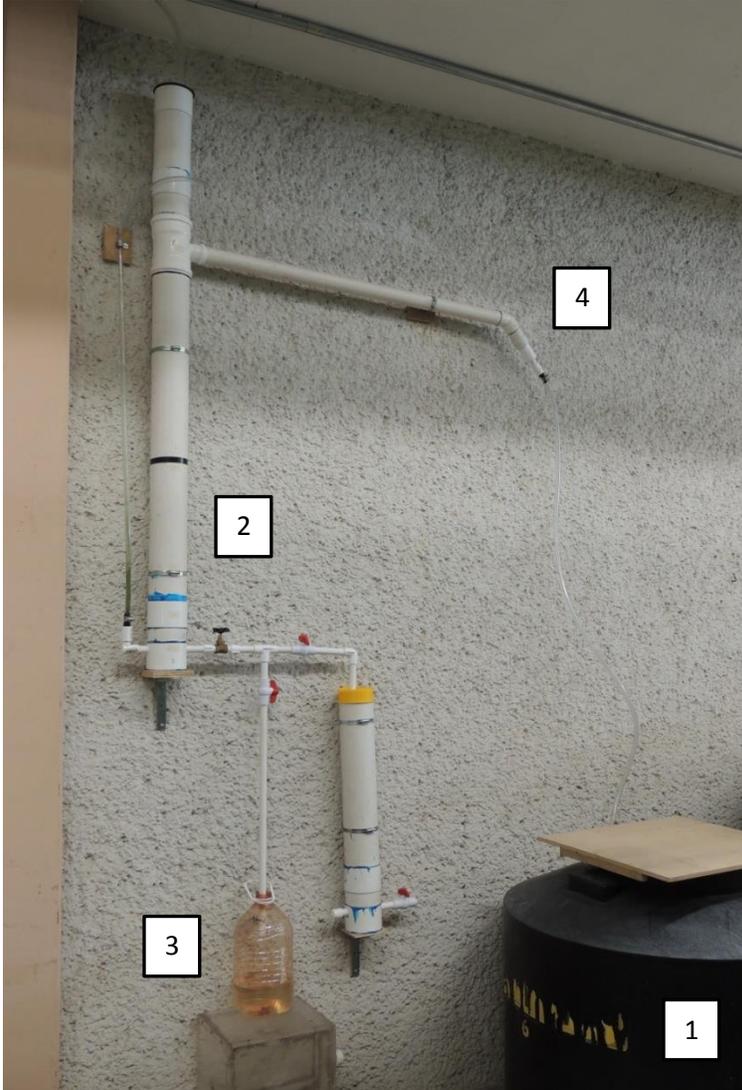
CLAVE	NOMBRE	MUNICIPIO	LATG	LATM	LATS	LONG	LONM	LONS	ALTURA	Precipitación anual (mm) 1981-2010
15010	ATOTONILCO	ALMOLOYA DE JUAREZ	19	27	44	99	46	32	2,557	823
15089	SAN FRANCISCO TLALCILALCALPAN	ALMOLOYA DE JUAREZ	19	17	32	99	46	4	2,000	813
15205	PRESA DOLORES	ALMOLOYA DE JUAREZ	19	21	49	99	56	15	2,650	766
15236	OCOYOTEPEC	ALMOLOYA DE JUAREZ	19	29	38	99	50	30	2,615	935
15282	TRES BARRANCAS	ALMOLOYA DE JUAREZ	19	20	27	99	47	54	2,610	863
15373	RANCHO VILLA VERDE	CALIMAYA	19	8	20	99	36	35	2,340	841
15049	LERMA	LERMA	19	17	5	99	30	43	2,570	1,095
15312	COLONIA ALVARO OBREGON	LERMA	19	22	40	99	29	45	2,580	815
15315	CASETA EPCCA	LERMA	19	17	9	99	31	25	2,575	1,046
15266	CODAGEM	METEPEC	19	14	54	99	34	32	2,605	846
15056	MEXICALcingo	MEXICALTZINGO	19	12	34	99	35	19	2,602	737
<b>15045</b>	<b>LA MARQUESA</b>	<b>OCOYOACAC</b>	<b>19</b>	<b>17</b>	<b>55</b>	<b>99</b>	<b>22</b>	<b>7</b>	<b>3,050</b>	<b>1,307</b>
15014	CAPULHUAC	OTZOLOTEPEC	19	26	27	99	32	43	2,760	1,015
15030	HACIENDA LA Y	OTZOLOTEPEC	19	24	18	99	33	47	2,576	887
15086	SAN BERNABE	TEMOAYA	19	28	34	99	42	52	2,560	853
<b>15119</b>	<b>TEMOAYA</b>	<b>TEMOAYA</b>	<b>19</b>	<b>28</b>	<b>11</b>	<b>99</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>2,694</b>	<b>1,010</b>
15201	TROJES	TEMOAYA	19	25	41	99	36	45	2,500	807
15122	TENANGO	TENANGO DEL VALLE	19	6	25	99	37	2	2,603	851
15240	SAN FRANCISCO PUTLA	TENANGO DEL VALLE	19	7	8	99	37	55	2,710	894
15295	SAN PEDRO ZICTEPEC D-10	TENANGO DEL VALLE	19	7	9	99	33	7	2,560	1,176
15063	NUEVA SANTA ELENA	TOLUCA	19	24	40	99	41	58	2,611	823
<b>15164</b>	<b>TOLUCA (DGE)</b>	<b>TOLUCA</b>	<b>19</b>	<b>17</b>	<b>30</b>	<b>99</b>	<b>37</b>	<b>50</b>	<b>2,638</b>	<b>712</b>
15203	CALIXTLAHUACA	TOLUCA	19	20	20	99	41	3	2,630	800
15211	NUEVA OXTOTITLAN	TOLUCA	19	16	44	99	41	9	2,695	841
15367	OBSERVATORIO U.A.E.M.	TOLUCA	19	17	7	99	39	10	2,640	1,150
15057	MIMAPAN	XONACATLAN	19	26	35	99	27	52	2,935	1,094
15062	NEVADO DE TOLUCA	ZINACANTEPEC	19	7	7	99	46	53	4,162	1,218
15108	SANTA MARIA DEL MONTE	ZINACANTEPEC	19	18	22	99	49	29	2,760	888
15126	TOLUCA (OBS)	ZINACANTEPEC	19	17	28	99	42	51	2,726	869
15276	SAN JOSE DEL CONTADERO	ZINACANTEPEC	19	14	4	99	48	29	3,045	1,005
15293	SAN JUAN DE LAS HUERTAS	ZINACANTEPEC	19	14	15	99	45	51	2,840	804

## ANEXO 2. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE DEPURACIÓN



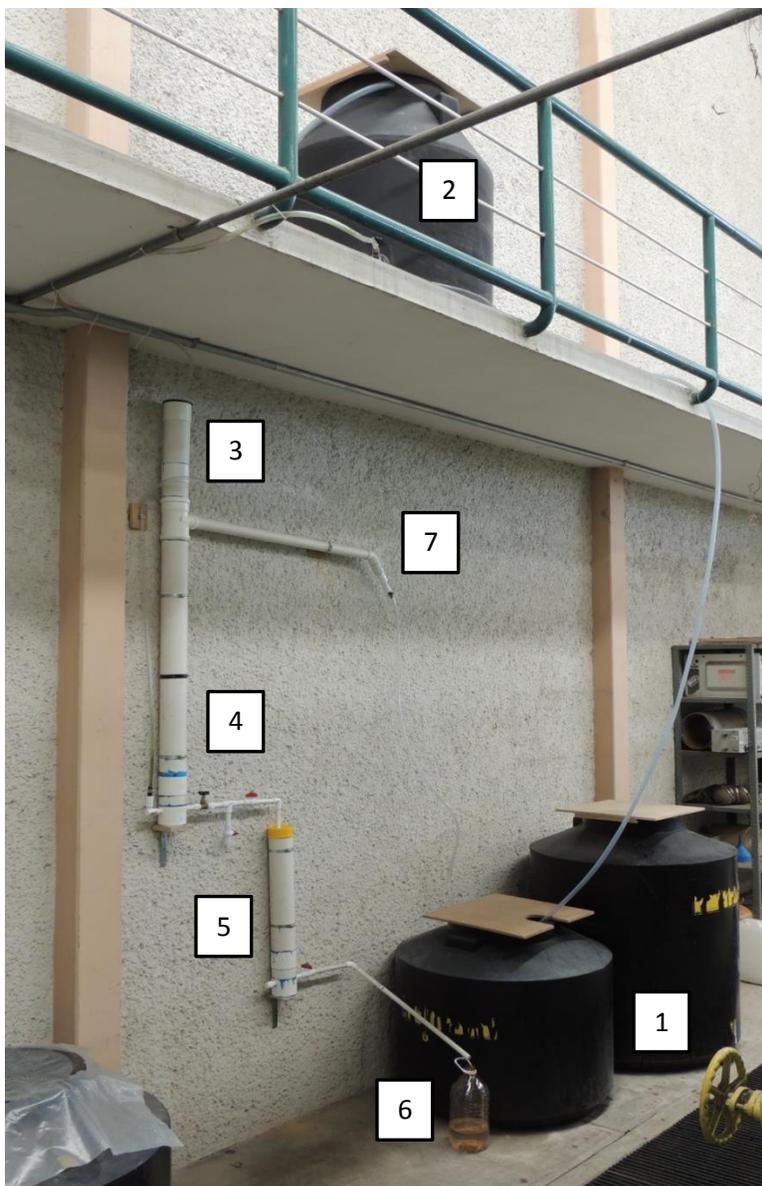
NOTA: Cotas en cm

### ANEXO 3. SISTEMA DE DEPURACIÓN DE AGUA PLUVIAL



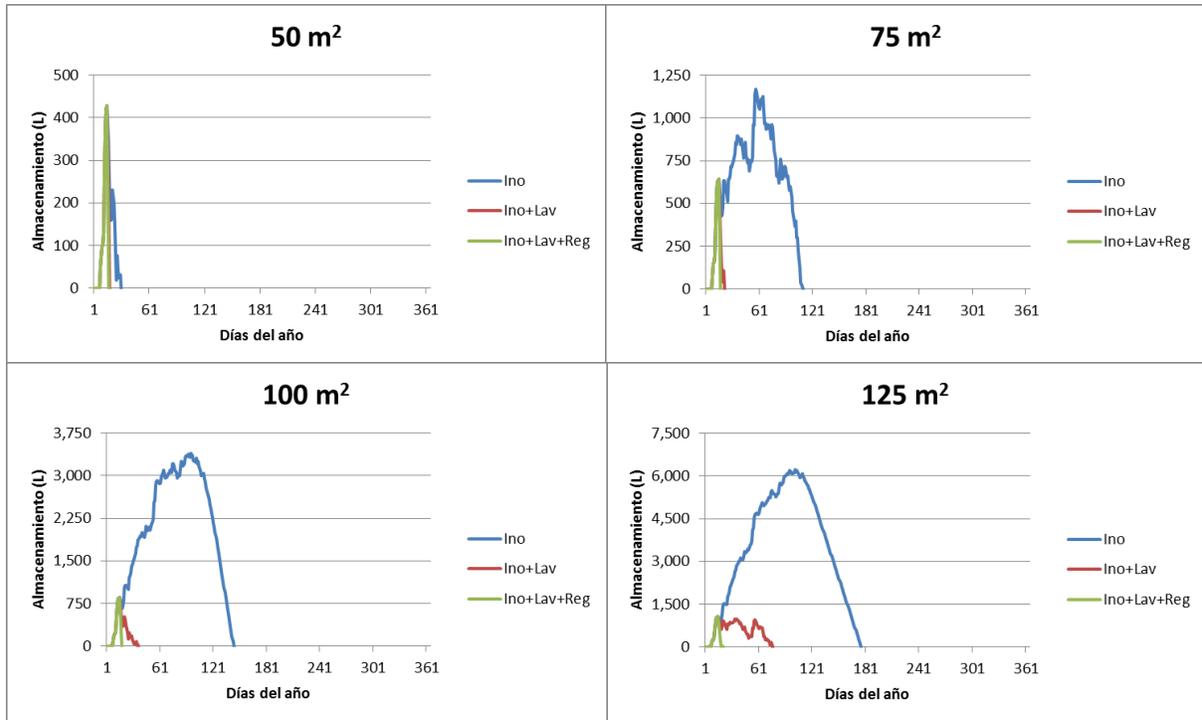
1. Tanque de almacenamiento de AP
2. Filtro lento de arena
3. Recolección del efluente
4. Dispositivo de demasías

## ANEXO 4. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS GRISAS DE REGADERA



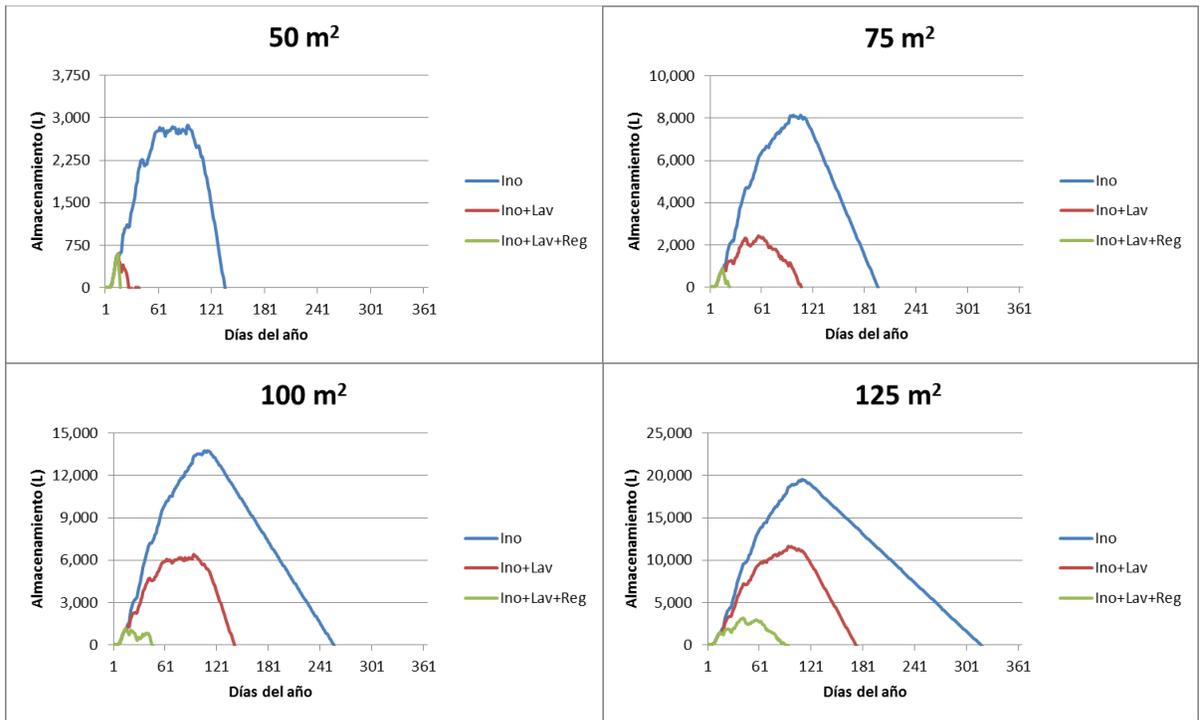
1. Tanque de almacenamiento de AG
2. Tanque de distribución
3. Filtro grueso de grava
4. Filtro lento de arena
5. Filtro de CAG
6. Recolección del efluente
7. Dispositivo de demasías

## ANEXO 5. UTILIZACIÓN ANUAL DE AGUA PLUVIAL

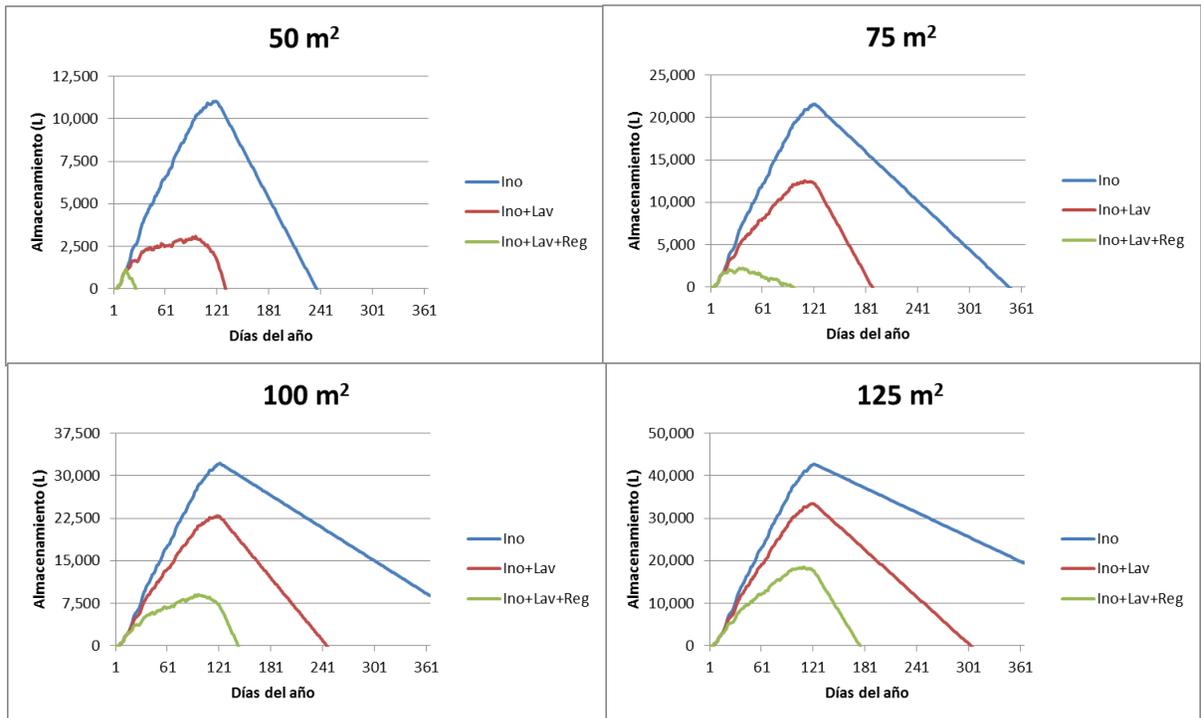


a) Utilización de agua pluvial: 712 mm anuales

ANEXO 5. UTILIZACIÓN ANUAL DE AGUA PLUVIAL (continuación)



b) Utilización de agua pluvial: 1,010 mm anuales



c) Utilización de agua pluvial: 1,307 mm anuales

## ANEXO 6. MEDICIÓN DE PARÁMETROS AGUA PLUVIAL

Fecha de muestreo	Medición	Fecha de muestreo	Medición
<b>Color (Pt/Co)</b>		<b>Alcalinidad (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>	
07/08/14	8.0	07/08/14	4.4
25/08/14	17.0	19/08/14	2.0
26/09/14	9.0	25/08/14	2.0
Media	11.3	Media	2.8
Desv. Estándar	4.9	Desv. Estándar	1.4
<b>Temperatura (°C)</b>		<b>Acidez (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>	
07/08/14	17.3	02/04/14	5.4
25/08/14	18.0	07/05/14	6.2
26/09/14	18.1	07/08/14	3.3
02/10/14	17.1	19/08/14	3.7
Media	17.6	Media	4.7
Desv. Estándar	0.5	Desv. Estándar	1.4
<b>Conductividad Eléctrica (µS/cm)</b>		<b>Dureza Total (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>	
07/08/14	4.0	02/04/14	12.9
25/08/14	4.0	07/05/14	11.4
26/09/14	7.0	07/08/14	9.9
02/10/14	9.0	19/08/14	6.0
Media	6.0	25/08/14	16.9
Desv. Estándar	2.4	Media	11.4
<b>Turbiedad (UNT)</b>		Desv. Estándar	4.0
07/08/14	2.9	<b>N-Nitratos (mg/L N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	
25/08/14	4.3	07/05/14	8.3
26/09/14	2.3	<b>Cloruros (mg/L Cl<sup>-</sup>)</b>	
Media	3.2	02/04/14	7.6
Desv. Estándar	1.0	07/05/14	8.0
<b>pH</b>		07/08/14	8.6
07/08/14	5.5	19/08/14	5.3
19/08/14	5.7	Media	7.4
25/08/14	4.6	Desv. Estándar	1.4
26/09/14	5.0	<b>Sulfatos (mg/L SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>)</b>	
02/10/14	4.7	02/04/14	8.0
Media	5.1	07/05/14	7.9
Desv. Estándar	0.5	07/08/14	8.1
		19/08/14	9.3
		Media	8.3
		Desv. Estándar	0.6

ANEXO 6. MEDICIÓN DE PARÁMETROS AGUA PLUVIAL (continuación)

Fecha de muestreo	Medición	Fecha de muestreo	Medición
<b>Fosfatos (mg/L PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>)</b>		<b>Zinc (mg/L Zn)</b>	
07/08/14	< 0.01	02/04/14	1.2
19/08/14	< 0.01	07/05/14	1.2
<b>Carbono Orgánico Total (mg/L C)</b>		07/08/14	1.0
07/08/14	2.4	19/08/14	0.5
19/08/14	2.2	25/08/14	1.8
25/08/14	4.9	Media	1.1
26/09/14	2.0	Desv. Estándar	0.5
Media	2.9	<b>Sólidos Disueltos Totales (mg/L)</b>	
Desv. Estándar	1.3	07/08/14	2.0
<b>Calcio (mg/L Ca)</b>		19/08/14	2.0
07/08/14	< 0.5	25/08/14	7.0
19/08/14	< 0.5	26/09/14	3.0
25/08/14	< 0.5	02/10/14	5.0
<b>Hierro (mg/L Fe)</b>		Media	3.8
07/08/14	< 0.5	Desv. Estándar	2.2
19/08/14	< 0.5	<b>Coliformes Totales (NMP/100 mL)</b>	
25/08/14	< 0.5	07/08/14	790
<b>Magnesio (mg/L Mg)</b>		25/08/14	2200
07/08/14	< 0.5	26/09/14	110
19/08/14	< 0.5	Media	1033
25/08/14	< 0.5	Desv. Estándar	1066
<b>Potasio (mg/L K)</b>		<b>Coliformes Fecales (NMP/100 mL)</b>	
07/08/14	< 0.5	07/08/14	50
19/08/14	< 0.5	25/08/14	130
25/08/14	< 0.5	26/09/14	90
<b>Sodio (mg/L Na)</b>		Media	90
07/08/14	< 0.5	Desv. Estándar	40
19/08/14	< 0.5		
25/08/14	< 0.5		

ANEXO 7. MEDICIÓN DE PARÁMETROS AGUAS GRISES

Fecha de muestreo	Medición	Fecha de muestreo	Medición
<b>Temperatura (°C)</b>		<b>Cloruros (mg/L Cl)</b>	
09/10/14	19.3	22/10/14	35.6
28/10/14	18.2	<b>Sulfatos (mg/L SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>)</b>	
Media	18.8	22/10/14	15.4
Desv. Estándar	0.8	<b>Fósforo Total (mg/L P<sub>T</sub>)</b>	
<b>Conductividad Eléctrica (µS/cm)</b>		22/10/14	0.1
09/10/14	412.0	<b>DQO (mg/L O<sub>2</sub>)</b>	
13/10/14	410.0	13/10/14	730.0
14/10/14	412.0	15/10/14	592.0
17/10/14	428.0	20/10/14	562.0
20/10/14	408.0	22/10/14	612.0
22/10/14	404.0	24/10/14	588.0
24/10/14	436.0	28/10/14	660.0
28/10/14	410.0	Media	624.0
Media	415.0	Desv. Estándar	61.4
Desv. Estándar	11.0	<b>Calcio (mg/L Ca)</b>	
<b>Turbiedad (UNT)</b>		22/10/14	24.9
13/10/14	342.0	<b>Hierro (mg/L Fe)</b>	
14/10/14	316.0	22/10/14	< 0.5
20/10/14	388.0	<b>Magnesio (mg/L Mg)</b>	
22/10/14	384.0	22/10/14	15.5
24/10/14	282.0	<b>Potasio (mg/L K)</b>	
28/10/14	356.0	22/10/14	9.8
Media	344.7	<b>Sodio (mg/L Na)</b>	
Desv. Estándar	40.8	22/10/14	44.5
<b>pH</b>		<b>Zinc (mg/L Zn)</b>	
09/10/14	7.7	22/10/14	< 0.5
28/10/14	7.5	<b>Sólidos Disueltos Totales (mg/L)</b>	
Media	7.6	09/10/14	206.0
Desv. Estándar	0.2	13/10/14	205.0
<b>Alcalinidad (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>		14/10/14	206.0
22/10/14	255.3	17/10/14	214.0
<b>Acidez (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>		20/10/14	204.0
22/10/14	10.0	22/10/14	202.0
<b>Dureza Total (mg/L CaCO<sub>3</sub>)</b>		24/10/14	218.0
22/10/14	125.1	28/10/14	205.0
<b>N-Nitratos (mg/L N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>		Media	207.5
22/10/14	1.7	Desv. Estándar	5.5

ANEXO 7. MEDICIÓN DE PARÁMETROS AGUAS GRISES (continuación)

<b>Fecha de muestreo</b>	<b>Medición</b>
<b>Coliformes Totales (NMP/100 mL)</b>	
15/10/14	7000
20/10/14	18400
28/10/14	4400
Media	9933
Desv. Estándar	7447
<b>Coliformes Fecales (NMP/100 mL)</b>	
15/10/14	280
20/10/14	540
28/10/14	100
Media	307
Desv. Estándar	221

## ANEXO 8. BALANCE DIARIO OFERTA-DEMANDA DE AGUA PLUVIAL

Precipitación media anual: 1,010 mm

Área de captación: 80 m<sup>2</sup>

Ce: 0.80

Uso del AP: Lavadora

Mes	Día	P <sub>i</sub> (mm)	p (P <sub>i</sub> >1.25 mm)	P <sub>n</sub> (mm)	P <sub>e</sub> (mm)	v <sub>i</sub> (L)	V <sub>i</sub> (L)
							0
	1	4.0	0.38	1.5	0.3	19	19
	2	3.8	0.36	1.3	0.1	6	25
	3	2.2	0.26	0.6	0.0	0	25
	4	1.8	0.38	0.7	0.0	0	25
	5	3.3	0.33	1.1	0.0	0	25
	6	2.5	0.33	0.8	0.0	0	25
	7	4.4	0.45	2.0	0.7	46	71
	8	3.5	0.40	1.4	0.2	10	81
	9	6.8	0.55	3.7	2.5	158	239
	10	5.3	0.48	2.5	1.3	81	320
	11	6.7	0.52	3.5	2.3	146	465
	12	6.4	0.55	3.5	2.3	144	609
	13	6.1	0.69	4.2	2.9	188	797
	14	5.2	0.50	2.6	1.4	88	885
JUNIO	15	5.1	0.45	2.3	1.1	68	953
	16	5.2	0.52	2.7	1.5	95	960
	17	7.8	0.67	5.2	3.9	251	1,123
	18	6.1	0.57	3.5	2.3	145	1,180
	19	6.7	0.60	4.0	2.7	175	1,267
	20	10.9	0.71	7.8	6.5	419	1,598
	21	10.1	0.71	7.2	5.9	381	1,890
	22	6.5	0.69	4.5	3.2	207	2,009
	23	8.0	0.69	5.5	4.3	273	2,194
	24	6.7	0.64	4.3	3.0	195	2,301
	25	7.6	0.60	4.5	3.3	209	2,422
	26	6.9	0.55	3.8	2.5	163	2,497
	27	4.6	0.57	2.6	1.4	87	2,497
	28	5.4	0.74	4.0	2.8	176	2,585
	29	8.6	0.79	6.8	5.5	353	2,850
	30	8.3	0.76	6.3	5.1	324	3,085

ANEXO 8. BALANCE DIARIO OFERTA-DEMANDA DE AGUA PLUVIAL  
(continuación)

Mes	Día	P <sub>i</sub> (mm)	p (P <sub>i</sub> >1.25 mm)	P <sub>n</sub> (mm)	P <sub>e</sub> (mm)	v <sub>i</sub> (L)	V <sub>i</sub> (L)
	1	7.4	0.66	4.9	3.7	234	3,231
	2	7.4	0.66	4.9	3.6	233	3,377
	3	9.2	0.76	7.0	5.7	365	3,654
	4	6.8	0.78	5.3	4.1	260	3,825
	5	10.1	0.76	7.6	6.4	407	4,145
	6	8.5	0.63	5.4	4.1	264	4,321
	7	6.7	0.66	4.4	3.2	202	4,435
	8	10.2	0.76	7.7	6.5	414	4,761
	9	7.6	0.71	5.4	4.2	266	4,939
	10	7.4	0.63	4.7	3.4	219	5,070
	11	9.1	0.66	6.0	4.7	301	5,283
	12	6.9	0.61	4.2	3.0	190	5,385
	13	6.4	0.56	3.6	2.3	148	5,445
	14	4.0	0.54	2.1	0.9	57	5,414
	15	4.9	0.54	2.6	1.4	89	5,415
JULIO	16	6.2	0.61	3.8	2.6	164	5,490
	17	6.1	0.66	4.0	2.8	177	5,579
	18	6.1	0.63	3.8	2.6	166	5,657
	19	8.6	0.66	5.6	4.4	281	5,850
	20	6.7	0.68	4.5	3.3	211	5,973
	21	8.7	0.71	6.1	4.9	312	6,196
	22	7.4	0.61	4.5	3.3	208	6,317
	23	7.0	0.63	4.5	3.2	205	6,434
	24	7.6	0.76	5.7	4.5	288	6,634
	25	7.8	0.66	5.1	3.9	249	6,794
	26	8.8	0.59	5.1	3.9	249	6,955
	27	7.7	0.68	5.2	4.0	255	7,122
	28	6.3	0.63	4.0	2.7	175	7,209
	29	6.3	0.63	4.0	2.8	177	7,299
	30	6.6	0.61	4.0	2.8	176	7,387
	31	7.1	0.54	3.8	2.6	165	7,464

ANEXO 8. BALANCE DIARIO OFERTA-DEMANDA DE AGUA PLUVIAL

(continuación)

Mes	Día	P <sub>i</sub> (mm)	p (P <sub>i</sub> >1.25 mm)	P <sub>n</sub> (mm)	P <sub>e</sub> (mm)	v <sub>i</sub> (L)	V <sub>i</sub> (L)
	1	7.5	0.68	5.1	3.8	244	7,620
	2	4.9	0.53	2.6	1.3	84	7,616
	3	5.7	0.58	3.3	2.1	132	7,659
	4	6.0	0.73	4.3	3.1	196	7,767
	5	6.1	0.63	3.8	2.6	165	7,844
	6	4.4	0.60	2.7	1.4	91	7,847
	7	4.4	0.55	2.4	1.2	76	7,835
	8	4.4	0.58	2.6	1.3	84	7,831
	9	7.5	0.78	5.8	4.6	292	8,035
	10	5.4	0.55	2.9	1.7	109	8,055
	11	6.9	0.68	4.6	3.4	217	8,184
	12	5.6	0.60	3.4	2.1	136	8,232
	13	5.9	0.68	4.0	2.7	173	8,317
	14	6.0	0.68	4.0	2.8	178	8,408
	15	5.7	0.73	4.1	2.8	182	8,502
AGOSTO	16	6.3	0.73	4.6	3.3	212	8,626
	17	5.4	0.53	2.8	1.6	101	8,639
	18	5.9	0.68	4.0	2.7	173	8,724
	19	4.1	0.68	2.8	1.5	99	8,735
	20	4.1	0.50	2.0	0.8	51	8,698
	21	6.8	0.70	4.8	3.5	226	8,835
	22	4.2	0.53	2.2	1.0	61	8,808
	23	8.1	0.73	5.8	4.6	294	9,014
	24	4.7	0.63	2.9	1.7	109	9,035
	25	4.2	0.58	2.4	1.2	76	9,023
	26	6.6	0.65	4.3	3.0	194	9,128
	27	6.2	0.75	4.7	3.4	220	9,260
	28	5.4	0.58	3.1	1.8	118	9,290
	29	6.1	0.58	3.5	2.3	145	9,346
	30	5.3	0.65	3.4	2.2	139	9,397
	31	5.1	0.53	2.7	1.4	91	9,400

ANEXO 8. BALANCE DIARIO OFERTA-DEMANDA DE AGUA PLUVIAL

(continuación)

Mes	Día	P <sub>i</sub> (mm)	p (P <sub>i</sub> >1.25 mm)	P <sub>n</sub> (mm)	P <sub>e</sub> (mm)	v <sub>i</sub> (L)	V <sub>i</sub> (L)
	1	9.5	0.71	6.8	5.5	355	9,667
	2	6.5	0.69	4.5	3.2	207	9,786
	3	5.0	0.60	3.0	1.7	111	9,809
	4	4.6	0.57	2.7	1.4	90	9,811
	5	5.6	0.52	2.9	1.7	107	9,830
	6	6.1	0.57	3.5	2.3	145	9,887
	7	4.8	0.50	2.4	1.1	72	9,871
	8	4.8	0.45	2.2	0.9	58	9,841
	9	4.4	0.64	2.8	1.6	100	9,854
	10	3.5	0.60	2.1	0.9	55	9,821
	11	4.5	0.50	2.3	1.0	65	9,797
	12	5.3	0.50	2.7	1.4	90	9,800
	13	7.3	0.55	4.0	2.7	175	9,887
	14	7.5	0.55	4.1	2.9	184	9,983
SEPTIEMBRE	15	4.9	0.45	2.2	1.0	62	9,957
	16	4.1	0.43	1.8	0.5	32	9,901
	17	4.1	0.48	2.0	0.7	46	9,860
	18	7.0	0.55	3.9	2.6	167	9,939
	19	4.5	0.57	2.6	1.3	86	9,937
	20	3.5	0.43	1.5	0.3	17	9,866
	21	4.2	0.38	1.6	0.3	21	9,799
	22	3.6	0.38	1.4	0.1	7	9,717
	23	3.8	0.45	1.7	0.5	29	9,659
	24	3.3	0.40	1.4	0.1	7	9,577
	25	3.6	0.40	1.4	0.2	13	9,502
	26	5.2	0.48	2.5	1.2	80	9,493
	27	3.4	0.40	1.4	0.1	8	9,414
	28	1.7	0.24	0.4	0.0	0	9,326
	29	3.4	0.33	1.1	0.0	0	9,238
	30	3.1	0.36	1.1	0.0	0	9,150

ANEXO 8. BALANCE DIARIO OFERTA-DEMANDA DE AGUA PLUVIAL  
(continuación)

Mes	Día	P <sub>i</sub> (mm)	p (P <sub>i</sub> >1.25 mm)	P <sub>n</sub> (mm)	P <sub>e</sub> (mm)	v <sub>i</sub> (L)	V <sub>i</sub> (L)
	1	-	-	-	-	0	9,062
	2	-	-	-	-	0	8,974
	3	-	-	-	-	0	8,886
	4	-	-	-	-	0	8,798
	5	-	-	-	-	0	8,710
	6	-	-	-	-	0	8,622
	7	-	-	-	-	0	8,534
	8	-	-	-	-	0	8,446
	9	-	-	-	-	0	8,358
	10	-	-	-	-	0	8,270
	11	-	-	-	-	0	8,182
	12	-	-	-	-	0	8,094
	13	-	-	-	-	0	8,006
	14	-	-	-	-	0	7,918
	15	-	-	-	-	0	7,830
OCTUBRE	16	-	-	-	-	0	7,742
	17	-	-	-	-	0	7,654
	18	-	-	-	-	0	7,566
	19	-	-	-	-	0	7,478
	20	-	-	-	-	0	7,390
	21	-	-	-	-	0	7,302
	22	-	-	-	-	0	7,214
	23	-	-	-	-	0	7,126
	24	-	-	-	-	0	7,038
	25	-	-	-	-	0	6,950
	26	-	-	-	-	0	6,862
	27	-	-	-	-	0	6,774
	28	-	-	-	-	0	6,686
	29	-	-	-	-	0	6,598
	30	-	-	-	-	0	6,510
	31	-	-	-	-	0	6,422

ANEXO 8. BALANCE DIARIO OFERTA-DEMANDA DE AGUA PLUVIAL  
(continuación)

Mes	Día	P <sub>i</sub> (mm)	p (P <sub>i</sub> >1.25 mm)	P <sub>n</sub> (mm)	P <sub>e</sub> (mm)	v <sub>i</sub> (L)	V <sub>i</sub> (L)
	1	-	-	-	-	0	6,334
	2	-	-	-	-	0	6,246
	3	-	-	-	-	0	6,158
	4	-	-	-	-	0	6,070
	5	-	-	-	-	0	5,982
	6	-	-	-	-	0	5,894
	7	-	-	-	-	0	5,806
	8	-	-	-	-	0	5,718
	9	-	-	-	-	0	5,630
	10	-	-	-	-	0	5,542
	11	-	-	-	-	0	5,454
	12	-	-	-	-	0	5,366
	13	-	-	-	-	0	5,278
	14	-	-	-	-	0	5,190
NOVIEMBRE	15	-	-	-	-	0	5,102
	16	-	-	-	-	0	5,014
	17	-	-	-	-	0	4,926
	18	-	-	-	-	0	4,838
	19	-	-	-	-	0	4,750
	20	-	-	-	-	0	4,662
	21	-	-	-	-	0	4,574
	22	-	-	-	-	0	4,486
	23	-	-	-	-	0	4,398
	24	-	-	-	-	0	4,310
	25	-	-	-	-	0	4,222
	26	-	-	-	-	0	4,134
	27	-	-	-	-	0	4,046
	28	-	-	-	-	0	3,958
	29	-	-	-	-	0	3,870
	30	-	-	-	-	0	3,782

ANEXO 8. BALANCE DIARIO OFERTA-DEMANDA DE AGUA PLUVIAL  
(continuación)

Mes	Día	P <sub>i</sub> (mm)	p (P <sub>i</sub> >1.25 mm)	P <sub>n</sub> (mm)	P <sub>e</sub> (mm)	v <sub>i</sub> (L)	V <sub>i</sub> (L)
	1	-	-	-	-	0	3,694
	2	-	-	-	-	0	3,606
	3	-	-	-	-	0	3,518
	4	-	-	-	-	0	3,430
	5	-	-	-	-	0	3,342
	6	-	-	-	-	0	3,254
	7	-	-	-	-	0	3,166
	8	-	-	-	-	0	3,078
	9	-	-	-	-	0	2,990
	10	-	-	-	-	0	2,902
	11	-	-	-	-	0	2,814
	12	-	-	-	-	0	2,726
	13	-	-	-	-	0	2,638
	14	-	-	-	-	0	2,550
	15	-	-	-	-	0	2,462
DICIEMBRE	16	-	-	-	-	0	2,374
	17	-	-	-	-	0	2,286
	18	-	-	-	-	0	2,198
	19	-	-	-	-	0	2,110
	20	-	-	-	-	0	2,022
	21	-	-	-	-	0	1,934
	22	-	-	-	-	0	1,846
	23	-	-	-	-	0	1,758
	24	-	-	-	-	0	1,670
	25	-	-	-	-	0	1,582
	26	-	-	-	-	0	1,494
	27	-	-	-	-	0	1,406
	28	-	-	-	-	0	1,318
	29	-	-	-	-	0	1,230
	30	-	-	-	-	0	1,142
	31	-	-	-	-	0	1,054

ANEXO 8. BALANCE DIARIO OFERTA-DEMANDA DE AGUA PLUVIAL  
(continuación)

Mes	Día	P <sub>i</sub> (mm)	p (P <sub>i</sub> >1.25 mm)	P <sub>n</sub> (mm)	P <sub>e</sub> (mm)	v <sub>i</sub> (L)	V <sub>i</sub> (L)
ENERO	1	-	-	-	-	0	966
	2	-	-	-	-	0	878
	3	-	-	-	-	0	790
	4	-	-	-	-	0	702
	5	-	-	-	-	0	614
	6	-	-	-	-	0	526
	7	-	-	-	-	0	438
	8	-	-	-	-	0	350
	9	-	-	-	-	0	262
	10	-	-	-	-	0	174
	11	-	-	-	-	0	86
	12	-	-	-	-	0	-2
	13	-	-	-	-	0	-90
	14	-	-	-	-	0	-178