



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Recursos Hídricos y Ambiental

Propuesta de un sistema de desinfección solar para el tratamiento de agua pluvial bajo condiciones rurales

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Recursos Hídricos y Ambiental)

Presenta:

Marcela Susana Duhne Ramírez

Dirigido por:

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortazar

SINODALES

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortazar
Presidente

Dr. Nabil Mobayed Khodr
Secretario

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos
Vocal

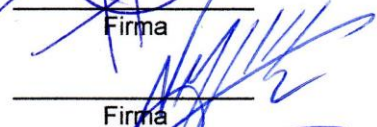
Dra. Karen Esquivel Escalante
Suplente

M. en C. Alba Aurora Díaz Pereira
Suplente

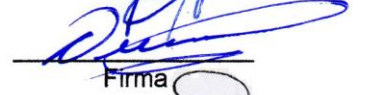
Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad



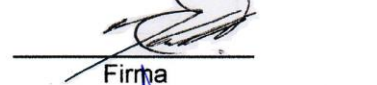
Firma



Firma



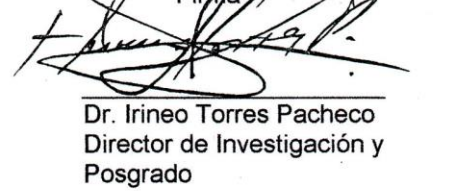
Firma



Firma



Firma



Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

RESUMEN

La escasez de agua es una realidad a nivel mundial, nacional y local. Ésta se acentúa en las comunidades rurales debido a la falta de infraestructura existente, la lejanía entre casas-habitación y densidad de población, por lo cual la captación pluvial se vuelve viable en este contexto. Sin embargo, es necesario asegurar la calidad del agua que consume toda persona para evitar enfermedades diarreicas; una persona requiere al menos 7 litros de agua al día para beber, preparar alimentos y limpieza diaria personal (lavado de dientes y manos). Para lo cual se seleccionaron la filtración y desinfección solar como métodos de tratamiento de agua. El primero consiste en pasar agua a través de un medio poroso para la remoción de contaminantes, y la desinfección solar consiste en utilizar radiación solar directa e incremento de la temperatura del agua para disminuir la contaminación microbiológica. La investigación que se presenta a continuación tiene como objetivo el diseño de los componentes (pre-tratamiento y tratamiento) de un sistema de desinfección de agua de lluvia recolectada y almacenada en comunidades rurales. Para lo cual, se realizaron tres pruebas experimentales. La primera, consta de la remoción de contaminantes mediante columnas de filtración en un sistema de carga constante donde se evalúa la turbidez y el flujo en tres diferentes medios filtrantes. La segunda y la tercera, buscan determinar el efecto de la radiación solar directa e inhibida en el incremento de la temperatura del agua y remoción de contaminación microbiológica (medida a través de Coliformes Totales) en un periodo de 8 horas en días diferentes. Para esto se construyeron sistemas de tubos hechos con cobre y manguera negra rígida; así como canales de PVC blancos y negros recubiertos con una placa de vidrio. Los resultados obtenidos determinan el tiempo de retención del agua en cada componente del sistema, así como los materiales y dimensiones de los mismos. La temperatura del agua obtenida tras 8 horas se encuentra sobre los 40 grados Celsius, por lo cual deberá ser enfriada si se desea un uso inmediato de la misma. La información obtenida en conjunto con la identificación del potencial de implementación del sistema, hace viable posteriores validaciones del sistema propuesto y su implementación en el Estado de Querétaro.

(Palabras clave: potabilización de agua, remoción microbial, desinfección solar, captación pluvial, calidad de agua, filtración)

SUMMARY

Water is a scarce resource; its availability varies geographically and temporarily. Due to unavailable hydraulic infrastructure, distance between homes and population density, rural population has no access to drinking water. In this article, the proposal is to use water harvesting, filtration and solar disinfection to fulfill the need of drinking water in such communities. Water harvesting consists of catching and storing precipitation, filtration occurs when water passes through a porous medium to remove contamination and solar disinfection consists of using radiation and temperature rise to decrease microbiological contamination. The purpose of this research paper is to design the components (water pretreatment and treatment) of a disinfection system of water harvested in rural communities of Querétaro. Pretreatment consists of filtering water; in this study, both sand and activated carbon are tested measuring turbidity and discharge in a constant head system. Treatment consists in rising water temperature and radiation exposure, temperature increase and total coliforms in an eight-hour period are measured in three different days, for which copper pipelines, black rigid hoses and glass over a white and a black PVC channel are tested. The results obtained in this study, determine the required residence time on each stage of water's disinfection, allowing a posterior definition of the components materials and dimensions. The water's temperature obtained at the end is above 40 degrees Celsius; therefore, water must be stored to reduce its temperature or a cooling system will be needed to allow immediate use of water. The data obtained makes feasible a posterior design proposal of a solar disinfection system of rainwater harvested in Querétaro.

(Key words: solar disinfection, rainwater harvesting, drinking water quality, microbiological contamination, filtration, water treatment)

AGRADECIMIENTOS

Gracias...

- A mi esposo, Israel.
- A mis padres.
- Al CONACyT.
- A la Universidad Autónoma de Querétaro.
- A Vinculación Tecnológica de la UAQ.
- Al Dr. Miguel Ángel Domínguez.
- A los miembros del sínodo.
- A mis profesores.
- A Andrea, Ana, Nohemí, Jaime y Josabet.
- A la Escuela Secundaria de Pie de Gallo.
- A los compañeros de la maestría.
- A Ale, Chío y Alondra.

ÍNDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación	4
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
II. Revisión de la literatura	8
2.1 Antecedentes.....	8
2.2 Marco teórico.....	12
2.2.1 Uso del agua pluvial	12
2.2.2 Tratamiento del agua pluvial.....	18
III. METODOLOGÍA	34
3.1 Metodología preliminar	34
3.1.1 Selección del sitio y análisis de calidad de agua.....	34
3.1.2 Biofiltración como alternativa para la desinfección de agua pluvial. ..	40

3.1.3	Pruebas del método de desinfección solar	44
3.2	Metodología final	46
3.2.1	Diseño de los componentes del sistema de desinfección solar	46
3.2.2	Pre-tratamiento: Filtro.....	47
3.2.3	Tratamiento: Desinfección solar.	51
3.3	Potencial de aplicación del prototipo del sistema de desinfección solar en comunidades rurales del Estado de Querétaro.....	57
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
4.1	Resultados preliminares.	65
4.1.1	Selección del sitio y análisis de calidad de agua.....	65
4.1.2	Biofiltración como alternativa para la desinfección de agua pluvial. ..	68
4.1.3	Resultados de las pruebas del método de desinfección solar	72
4.2	Resultados con la propuesta final del sistema de desinfección solar.	77
4.2.1	Diseño de los componentes del sistema de desinfección solar	77
4.2.2	Pre-tratamiento: Filtro.....	77
4.2.3	Tratamiento: Desinfección solar.	77
4.3	Identificación del potencial de aplicación del prototipo del sistema de desinfección solar en comunidades rurales del Estado de Querétaro.....	80
V.	CONCLUSIONES	82
VI.	LITERATURA CITADA	85
APÉNDICE.....		7-1
7.1	APÉNDICE 1: LISTADO DE ABREVIACIONES	7-1
7.2	APÉNDICE 2: Cálculo de la Nubosidad (Apuntes de clase).....	7-2

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
2-1. Distribución de la espectral de la radiación solar (Gueymard, 2004; Bériz y Álvarez, 2008).....	26
3-1. Escuelas del proyecto "Ecotecnias Escolares" implementado en el 2012.	36
3-2. Información adicional de las localidades dónde se ubican las escuelas del proyecto "Ecotecnias Escolares" implementado en el 2012.	36
3-3. Materiales para construir una cisterna con capacidad de 12,000 litros. (Fuente: Reporte Técnico del proyecto "Ecotecnias Escolares")......	37
3-4. Normas utilizadas para el análisis de las muestras de agua.	39
3-5. Material, herramienta y consumibles requeridos para la construcción e instalación de los biofiltros.....	42
3-6. Características de la placa petrifilm para recuento de <i>E. coli</i> y coliformes totales marca 3M.....	43
3-7. Valores estandarizados para el criterio: Índice de Marginación para propósitos de la EMC.	60
3-8. Valores estandarizados para el criterio: PMA para propósitos de la EMC.....	60
3-9. Matriz de comparación por pares.	63
3-10. Índice aleatorio (<i>r.i.</i>) (Alonso y Lamata, 2006)	64
4-1. Tabla comparativa de límites permisibles contra concentración de contaminantes obtenidos de las muestras de agua de lluvia almacenadas en cisternas de ferrocemento.....	66
4-2. Tabla comparativa de límites permisibles contra concentración de contaminantes obtenidos de las muestras de agua de lluvia de Pie de Gallo y de los biofiltros instalados. Fecha de toma de muestra: 7 de noviembre de 2013.	71
4-3. Tabla comparativa de límites permisibles contra concentración de contaminantes obtenidos de las muestras de agua de lluvia de Pie de Gallo y desinfección solar. Fecha de toma de muestra: 7 de noviembre de 2013 y 9 de noviembre de 2013, respectivamente.....	73
4-4. Factores de ponderación para cada criterio.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1-1. Grado de presión en las Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) de México.	3
2-1. Clasificación de sistemas de captación de agua de lluvia de Gould y Nissen-Petersen (1999).	13
2-2. Mecanismos de transporte de las partículas.....	24
2-3. Composición de los nucleótidos (ejemplo marcado en rojo, dónde en verde se muestra la base nitrogenada, en naranja la pentosa y en amarillo el fosfato). Fuente: Sierra, 2008.	27
2-4. Mutación debido a la radiación UV. Fuente: Allen, 2001.....	29
2-5. Gráfica de la sinergia entre temperatura y radiación UV que permite la inactivación de coliformes fecales.	32
3-1. Mapa de ubicación de escuelas de comunidades seleccionadas para el proyecto "Ecotecnias Escolares" y la presente investigación.....	35
3-2. Componentes de un biofiltro.....	41
3-3. Diagrama con el procedimiento para la construcción e instalación de los biofiltros.	42
3-4. Fotografía de botella colocada sobre lámina acanalada.	45
3-5. Esquema con la propuesta de los componentes a diseñar.	47
3-6. Representación de las conexiones de cada LM35 instalado para medición de la temperatura del agua y temperatura ambiente.....	55
3-7. Escala de medida para asignar juicios de valor.	62
4-1. Cisterna de ferrocemento y biofiltro localizados en Pie de Gallo, Querétaro (fotografía tomada el 1 de agosto de 2013).	68
4-2. Fotografía de biofiltro instalado tras su reubicación.....	69
4-3. Fotografía de los biofiltros 2 y 3 instalados.....	70
4-4. Fotografía de las botellas de PET transcurridas 4 horas de la prueba del 5 de diciembre de 2013.....	75
4-5. Gráfica de la radiación solar medida contra la radiación de un día despejado.	76
4-6. Protoboard con los sensores de LM35 instalados para la medición de la temperatura.....	78
4-7. Modelo físico construido para evaluar aumento de la temperatura.	79

4-8. Modelo físico construido para evaluar el efecto de la radiación solar para desinfectar el agua pluvial.	79
4-9. Mapa con los resultados de la evaluación multicriterio.	81

I. INTRODUCCIÓN

La presente tesis se presenta como un requisito para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Recursos Hídricos y Ambiental. Una de las áreas de estudio de estas disciplinas es el aprovechamiento del agua de lluvia, sin embargo, para su aprovechamiento doméstico el agua de lluvia debe contar con la calidad de agua necesaria para evitar enfermedades diarreicas. A través de esta tesis se pretende obtener los parámetros para el diseño de un prototipo de un sistema de desinfección de agua de lluvia recolectada y almacenada en comunidades rurales. Para lo cual se estudian los métodos de filtración (específicamente la biofiltración) y desinfección solar.

La filtración es un método de tratamiento dónde las partículas contaminantes presentes en el agua son removidos por el paso de la misma a través de un medio poroso. Éste tiene la capacidad de desinfectar el agua si su diseño permite la formación de una capa biológica que desactiva los microorganismos patógenos. Por otro lado, la desinfección solar es un método de tratamiento dónde la radiación ultravioleta (específicamente la UV-A) y la radiación infrarroja (la cual aumenta la temperatura del agua) generan un efecto sinérgico capaz de afectar la duplicación del ácido nucleico y la síntesis de proteínas, además de cambiar la estructura molecular, y por último dificultar la respiración y el transporte de nutrientes a través de la membrana de los microorganismos patógenos presentes en el agua.

Estos dos métodos de tratamiento se estudiarán por separado y finalmente se integran en un prototipo de desinfección de agua pluvial capaz de implementarse en localidades rurales.

1.1 Descripción del problema

La captación pluvial es una técnica milenaria, sin embargo, debido a la contaminación microbiológica y mineral del agua superficial y subterránea, así como la escasez del agua que existe en la actualidad a nivel local, regional, nacional e internacional; ésta se ha retomado en los últimos años. Para comprender la escasez de agua para consumo humano, se cita información de la ONU-Agua (2012), la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2011) y Diop *et al.* (2007). El volumen total de agua en el mundo es de aproximadamente 1 386 millones de km³; de los cuales, menos del 0.1 por ciento (110 mil km³) está técnicamente disponible para consumo humano. Particularmente, México anualmente cuenta con 460 km³ de agua dulce renovable (Conagua, 2011); sin embargo, la cantidad de agua disponible varía por ubicación geográfica, habiendo zonas con escases de los recursos hídricos tal como lo menciona la ONU-Agua (2012) en la información presentada en el Día Mundial del Agua 2012:

La escasez de agua ya afecta (...) a más del 40 por ciento de la población de nuestro planeta. Actualmente, 1 600 millones de personas viven en países o regiones con escasez absoluta de agua. (...) La principal razón (...) es el consumo excesivo de agua para la producción de alimentos. (...) La producción de alimentos en algunas partes de América del norte ya es insostenible debido al agotamiento del agua del subsuelo.

Homólogamente, en México, la distribución temporal nos dice que la mayoría de la lluvia ocurre en verano, la distribución espacial indica que precipitación abundante ocurre en ciertas regiones (sureste del país) y la densidad poblacional no está relacionada con la distribución pluvial (Figura 1-1). Adicional a esto existen problemáticas locales (a nivel comunidad) que requieren ser solucionadas para que la población tenga acceso al agua (Conagua, 2011).

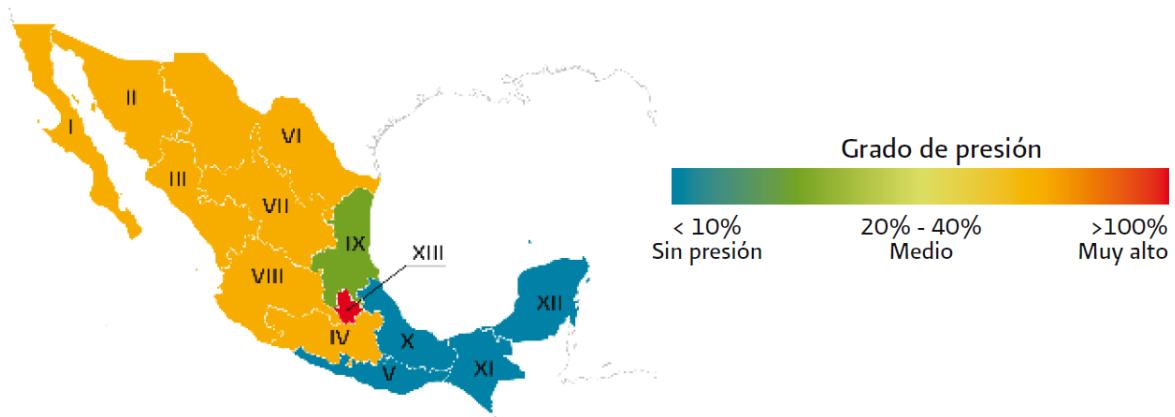


Figura 1-1. Grado de presión en las Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) de México.

El abastecimiento de agua potable por medio de redes se considera un gasto viable para localidades o zonas urbanas. Sin embargo para comunidades rurales, esto no se presenta como una inversión viable. Por lo cual, 8 de cada 10 habitantes del mundo sin acceso al agua potable se localizan en comunidades rurales (Naciones Unidas, 2010). En México, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) define como localidad rural, aquellas poblaciones que se encuentran en una superficie de 100 km² y que tienen en el último censo de población, menos de 2 500 habitantes (Villalvazo *et al.*, 2002). En el país, más de 7 millones de habitantes que habitan en zonas rurales y no tienen acceso al agua potable, acorde al Censo de Población y Vivienda del 2010 (Conagua, 2011). Por lo cual se requieren otras fuentes de abastecimiento de agua potable, aun cuando estas comunidades estén dispersas en el territorio.

El agua además de ser escaza, en ciertas regiones no cuenta con la calidad necesaria para su consumo. Idealmente el agua de lluvia es pura: sin embargo, durante la precipitación, el agua se contamina con la presencia de contaminantes en el aire, y al contacto con la vegetación, fauna, suelo e

infraestructura construida por el hombre (techos de casas y edificios, carreteras y otros). Asimismo, en lugares en donde se recolecta la lluvia, su almacenamiento no necesariamente es el apropiado. De manera que el tratamiento es necesario para ser tener un agua apta para el uso y consumo humano.

Por otro lado, de acuerdo a información de la Organización Mundial de la Salud, en el 2005, había 1.1 billones de personas en el mundo sin acceso al agua potable. Esta escasez está relacionada con enfermedades que ocasionan cada año 1.6 millones de muertes, de éstas el 90 por ciento son niños menores a 5 años. La mayoría de estos casos se ubican en comunidades rurales de países en vías de desarrollo (Varderzwaag *et al.*, 2009). A estas enfermedades se les denominan enfermedades hídricas y tienen origen principalmente de microorganismos encontrados en heces humanas o animales. La infección ocurre por el contacto entre el hombre y el agente infeccioso en alguna de las fases del ciclo del agua. En México, los agentes biológico-infecciosos son los de mayor preocupación para la salud de la población, debido a la falta de tratamiento de las aguas para consumo humano y a las diversas rutas de infección que intervienen a través del agua (alimentos, bebidas, aspiración y respiración). Las enfermedades gastrointestinales son el principal problema de salud en el país, siendo los niños menores de 5 años el grupo más vulnerable a este tipo de padecimientos que provocan diarrea aguda y, en ocasiones, muerte por deshidratación, fenómeno acentuado en localidades rurales (Conagua, 2007).

1.2 Justificación

Como se mencionó anteriormente, las enfermedades hídricas están directamente relacionadas con la falta de agua potable, hoy en día hay más de 7 millones de habitantes de comunidades rurales sin acceso al agua potable (29.3 por ciento del total de habitantes de comunidades rurales), hay escasez física de agua, representada por un grado de presión de 41.9 por ciento sobre los recursos

hídricos en la Región Hidrológica de la cuenca Lerma-Santiago-Pacífico. Aproximadamente, 80 mil habitantes en el estado de Querétaro aún no cuentan con agua para uso y consumo humano. En Querétaro, se tienen comunidades con precipitación media anual mayor a 400 mm, siendo así una posible fuente de agua la recolección de agua de lluvia.

En las comunidades rurales se pueden aplicar tecnologías a nivel domiciliario o comunitario, siendo las primeras más viables a nivel investigación tanto por el costo de implementación como por la efectividad en la disminución del riesgo de contagio de enfermedades diarreicas y las muertes relacionadas con éstas. Los sistemas de tratamiento se han promovido globalmente por la Organización Mundial de la Salud (Sobsey, 2006; Palaniappan *et al.*, 2010). Dentro de las tecnologías a implementar se encuentran filtros de arena (flujo lento o a presión), filtros de cartucho, biofiltros, métodos de desinfección simples (ebullición del agua y aplicación de cloro o yodo), método de desinfección solar, desinfección por medio de lámparas ultravioleta, equipo de destilación solar y filtros de cerámica.

El agua que se recolecta en comunidades rurales tiene una menor concentración de contaminantes que en zonas urbanas, estudios realizados en las mismas muestran que la contaminación depende principalmente del arrastre del agua en la techumbre (Ahammed y Meera, 2006). Los techos de lámina de acero galvanizado y losa de concreto, contaminan microbiológicamente y con metales el agua.

La filtración es un método en donde las partículas contaminantes presentes en el agua son removidos por el paso de la misma a través de un medio poroso, esto se logra principalmente mediante mecanismos físicos (cribado, sedimentación, impacto inercial, intercepción, adhesión y adsorción). La biofiltración ocurre cuando el diseño del filtro permite la formación de una capa

biológica en los primeros 5 a 10 cm superiores del medio filtrante; ésta desactiva los microorganismos patógenos y bacterias presentes en el agua.

Los biofiltros tienen la ventaja de permitir la remoción de metales y microorganismos, es por esto que son recomendados sobre el uso de filtros tradicionales, filtros de cartucho y otros métodos de desinfección. Adicional a esto, sus gastos de mantenimiento son mínimos y su construcción se puede hacer con materiales locales. Económicamente, los biofiltros son una opción factible en comparación con métodos de tratamiento compuestos (filtración y desinfección de luz ultravioleta). Por último, el flujo de salida por día se estima entre 30 y 60 litros al día, lo cual permite el abastecimiento de agua de una familia, a diferencia de los filtros de cerámica cuyos poros se obstruyen de manera que 10 días tras su implementación no cumplen con la demanda.

Sin embargo, la implementación social de los biofiltros es un reto, debido a que su operación requiere de la constancia de quien lo adopta. Por lo cual, se plantea remover contaminantes microbiológicos mediante una técnica que se publicó por UNICEF en 1984 (Noble, 2012) conocida como desinfección solar. Este método de no genera residuos como la aplicación de cloro y requiere de una fuente de energía como el fuego. Debido a que éste método únicamente desinfecta, es necesario la creación de un sistema de desinfección donde la filtración y la desinfección solar se implementen de manera simultánea con un flujo continuo durante el día.

1.3 Hipótesis

El agua de lluvia almacenada en cisternas en localidades rurales con clima semi-árido, como Querétaro, se puede tratar para cumplir con las especificaciones

de la normatividad vigente de agua apta para uso y consumo humano. El tratamiento de ésta es posible realizarlo de manera eficiente y económico potenciando el efecto combinado de los rayos UV-A y los rayos infrarrojos presentes en la radiación solar disponible.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Proponer y evaluar un sistema de desinfección solar eficiente y económico para el tratamiento de agua pluvial recolectada en condiciones rurales.

1.4.2 Objetivos específicos

- Revisar el efecto del uso de biofiltros como método de desinfección de agua.
- Seleccionar el medio filtrante como pre-tratamiento del sistema de desinfección solar.
- Evaluar el efecto de la temperatura del agua sobre la desinfección de ésta.
- Evaluar el efecto de la radiación solar sobre la desinfección del agua pluvial.
- Proponer un prototipo para un sistema de flujo continuo semi-automático para desinfección de agua pluvial recolectada y almacenada bajo condiciones rurales.
- Efectuar un análisis multicriterio para identificar el potencial de aplicación del prototipo en comunidades rurales del Estado de Querétaro.

II. Revisión de la literatura

Este capítulo se divide en dos secciones, antecedentes y marco teórico. En Antecedentes se presenta una revisión de investigaciones previas de métodos de tratamiento y desinfección de agua de lluvia. Mientras que Marco Teórico se subdivide en uso de agua pluvial y tratamiento del agua pluvial con el fin de comprender las definiciones, componentes y modelos teóricos que sustentan la presente investigación.

2.1 Antecedentes

La recolección de agua de lluvia consiste en captar los escurrimientos superficiales para usos productivos: agrícola, industrial o doméstico. La recolección de agua de lluvia comenzó como una forma rudimentaria de irrigación hace más de 5000 años en Mesopotamia. Los sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico perdieron su importancia a principios del siglo pasado debido al rápido crecimiento de las ciudades y a los sistemas de distribución del agua a nivel domiciliario. Sin embargo, debido a la contaminación microbiológica y mineral del agua superficial y subterránea, así como la escasez del recurso, la captación de agua de lluvia se ha vuelto más relevante a nivel mundial. Esta técnica se utiliza hoy en día como control de avenidas, así como fuente de abastecimiento de agua potable. Cabe destacar que pese a que el agua de lluvia se considera como no contaminada, su calidad es alterada debido a la contaminación atmosférica, la contaminación animal y vegetal, la condición y tipo de material que compone el techo, así como la ubicación y condiciones del almacenamiento de la misma (Jordan *et al.*, 2008). Por tal motivo el agua de lluvia requiere de un tratamiento previo a su consumo y uso doméstico.

Los principales contaminantes presentes en el agua recolectada son microorganismos y metales. Diversos estudios han mostrado que los sistemas de captación de agua de lluvia contaminan microbiológicamente y con organismos patógenos el agua captada a menos que se tengan ciertos cuidados en la recolección y almacenamiento de la misma (Ahammed y Meera, 2006). Asimismo, se ha reportado en agua recolectada elevados niveles de metales tóxicos (Ahammed y Meera, 2006). Por lo tanto es necesario el tratamiento para remover dichos contaminantes de manera que se cumpla con la normatividad vigente y tenga la calidad para uso doméstico y consumo humano.

Dos sistemas complejos, los cuales requieren conocimiento técnico para su mantenimiento e instalación son los prototipos instalados en Arizona, EUA y México. En Tucson, Arizona, Estados Unidos, Jordan *et al.* (2008) revisaron la remoción de la contaminación microbial en cisternas que almacenan agua de lluvia recolectada en techos, por medio de un sistema de filtración a presión. Para esto se utilizó una bomba, un tanque hidroneumático, dos filtros de polipropileno (uno de 20 micras y otro de 5 micras, ambos de 20 pulgadas de largo), un filtro de papel impregnado con carbono activado y un esterilizador de luz ultravioleta (con lámpara de 22 W). El agua previa a tratamiento tiene parámetros fuera del estándar de la normatividad estadounidense para plomo, zinc, turbidez y parámetros bacteriológicos (E. coli, Enterococci y HPC). Esta investigación muestra la efectividad de este tipo de sistemas para lograr la purificación del agua con excepción de la remoción de HPC. Como conclusión realizaron las siguientes recomendaciones: utilizar impermeabilizantes (*reflective roof coating*) que cumplan con los estándares y certificación de NSF Internacional; asegurar la aprobación de los sistemas instalados por medio de pruebas de caracterización del agua captada (al instalar el sistema) y previo a su consumo; y hacer limpieza y mantenimiento de las techumbres. Mientras tanto, en México, el Colegio de Postgraduados en su manual publicado por Anaya y Martínez (2007), proponen el uso de un sistema

similar al implementado por Jordan *et al.* en Arizona. Este sistema está instalado a nivel comunitario y funge como purificadora de agua para una comunidad. Adicional a los componentes que utilizan en Arizona, éste proyecto utiliza ósmosis inversa. El costo de un proyecto como estos es alto en comparación con un proyecto doméstico a implementarse en comunidades rurales.

Considerando que la propuesta de esta tesis es la instalación de un sistema de desinfección mediante filtración y desinfección solar, en cuanto a filtración y biofiltración es importante mencionar proyectos como el realizado en la India, por Ahammed y Meera (2006). Ellos han reportado la remoción de metales pesados, coliformes totales y coliformes fecales presentes en agua potable de manera efectiva en agua recolectada por techos de lámina de acero galvanizado y concreto por medio de una columna de filtración de arena cubierta con hidróxido de acero. Los parámetros utilizados para caracterizar el agua recolectada los obtuvieron por medio de pruebas conforme a las técnicas descritas por la *American Public Health Association* (APHA) en 1995. La problemática para implementar este tipo de sistemas radica en el método de obtención del medio filtrante que sólo se ha realizado en laboratorio.

No obstante, van Halem *et al.*, en 2007 estudiaron los filtros por medio de vasijas de cerámica impregnadas con plata (*ceramic silver-impregnated pot filter*, CSF) provenientes de fábricas de Cambodia, Ghana y Nicaragua. Ellos midieron el tamaño efectivo de los poros, el flujo de purificación de agua y la eficiencia de remoción de microorganismos, identificando que este sistema de filtración remueve tres de cuatro indicadores bacteriológicos (coliformes totales, *E. coli*, esporas *Clostridium* y *MS2 bacteriophages*), turbidez y metales pesados. Sin embargo, pese a su efectividad de remoción, se tiene que revisar su desempeño en agua que contiene arsénico. Las características del material, específicamente porosidad, no está dentro del rango que marca la ficha técnica del equipo; y, finalmente, el

desempeño del equipo es deficiente, al no tener la capacidad para abastecer la demanda requerida tras 12 semanas de uso (al saturarse el material).

Mientras, en Posoltega, Nicaragua, Vanderzwaag *et al.* (2009) realizaron en 2007 una evaluación de las condiciones, uso y desempeño de 234 biofiltros de arena instalados previamente en 1999 y 2004. Ellos caracterizaron las condiciones de los biofiltros, evaluaron el funcionamiento los biofiltros en uso e identificaron las variables determinantes para aquellas casas-habitación que aún utilizan los sistemas. Para su estudio, en las casas identificadas dónde se implementaron los biofiltros realizaron cuestionarios y pruebas de calidad de agua; obteniendo como resultados que sólo en 24 casas los sistemas siguen en uso y funcionando como deben, demostrando que la implementación del sistema fue fallida y se atribuye en gran parte a que los biofiltros de concreto instalados en 2004 se agrietaron.

Por otro lado, si hablamos de desinfección solar se debe hacer referencia a las investigaciones realizadas en Korea por Amin y Han (2009) sobre desinfección mediante colectores solares (SOCO-DIS) y desinfección solar (SODIS) de agua de lluvia. Sus investigaciones se centraron en identificar la remoción de la contaminación biológica utilizando botellas de PET con agua de lluvia, sobre diferentes superficies. El estudio se realizó a lo largo del 2008 identificando radiaciones promedio de 880 W/m² en verano, 300 W/m² en invierno y 580 W/m² el resto de las estaciones. Ellos concluyeron que la SODIS no es efectiva para la completa desinfección del agua de lluvia a lo largo del año, sin embargo, con el uso de colectores solares mejora la eficiencia de la desinfección entre un 20 y 30 por ciento. Dos años más tarde, en el 2011, estos mismos autores buscaron mejorar la eficiencia de la desinfección solar mediante la reducción del pH del agua con limón y vinagre, evaluado durante radiaciones de 200 a 450 W/m².

Mientras tanto, en Inglaterra, Alotaibi y Heaselgrave (2011) estudiaron la eficiencia para inactivar tres diferentes virus entéricos mediante SODIS por sí sola y el uso de la adición del potenciador riboflavin. La adición del químico antes mencionado es capaz de aumentar la eficiencia del SODIS. Como se revisará más adelante, el uso de potenciadores para aumentar la eficiencia del SODIS es una práctica e investigación que se ha reaplicado en la actualidad en diferentes partes del mundo y por diferentes autores.

De la misma manera, en la Universidad Autónoma de Querétaro se han realizado investigaciones previas del tema, como la investigación realizada por Uribe-Ibarra (2008) dónde somete agua residual tratada con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ a un postratamiento con radiación solar para generar agua con calidad conforme a la normatividad mexicana para utilizarla en la producción de hortalizas a escala invernadero.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Uso del agua pluvial

2.2.1.1 Recolección

La recolección de agua de lluvia consiste en captar los escurrimientos superficiales de la misma para usos productivos (agrícola, industrial o doméstico), en lugar de permitir que ésta cause erosión de suelo. La recolección de agua de lluvia comenzó como una forma rudimentaria de irrigación, ya que se almacenaba agua para mejorar el rendimiento y capacidad de las cosechas (Critchley y Siegert, 1991).

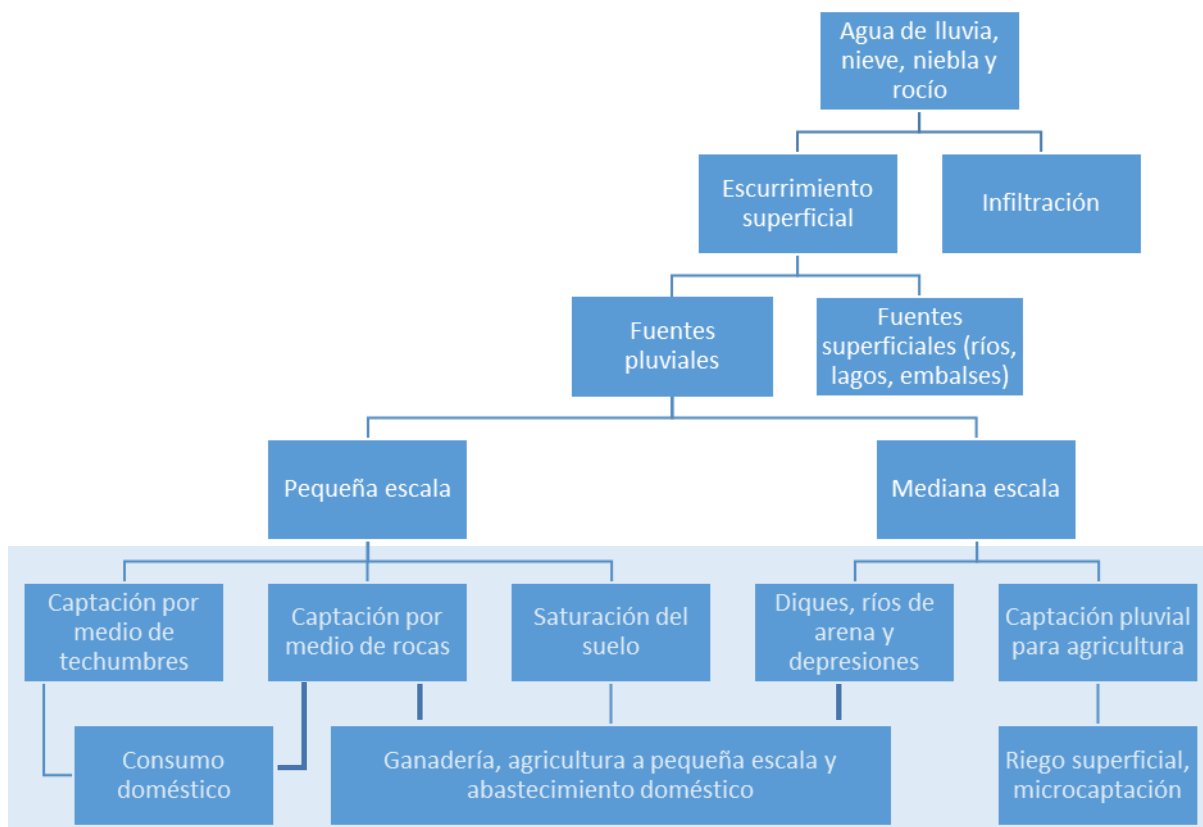


Figura 2-1. Clasificación de sistemas de captación de agua de lluvia de Gould y Nissen-Petersen (1999).

La recolección de agua de lluvia se puede clasificar en base al tamaño de área de captación o escala, como propone Gould y Nissen-Petersen (1999). La Figura 2-1 muestra parte de la clasificación propuesta por dichos autores, para lo cual parte del ciclo de agua y la disponibilidad de la misma en el ambiente en forma de precipitación, nieve, niebla y rocío. El agua disponible puede escurrir o infiltrarse. Como se muestra, los escurrimientos dan pautas a fuentes superficiales de agua o fuentes pluviales. Las fuentes pluviales pueden tener diferentes escalas, aprovechando los sistemas a pequeña y mediana escala para consumo y

abastecimiento doméstico. Para el presente trabajo, los sistemas de captación de interés serían mediante techumbres o en base a rocas.

2.2.1.2 Sistema de captación de agua de lluvia mediante techumbres

En México, el Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI) que forma parte del Colegio de Postgraduados, ha realizado investigación y convoca a diplomados sobre sistemas de captación de agua de lluvia. Anaya y Martínez son dos de sus investigadores. Ellos redactaron un manual (2007) en el que se describen los siguientes componentes de los sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico:

- Área de captación. Ésta es la superficie sobre la cual cae el agua de lluvia. Para este fin se utilizan los techos de casas habitación, escuelas, bodegas o invernaderos, techos cuenca (estructuras diseñadas para la captación de agua de lluvia las cuales constan de un techo y un retardador de evaporación), y laderas o superficies que se revisten de algún material impermeable tras un mínimo movimiento de tierras.
- Sistema de conducción. Éste es el conjunto de canaletas o tuberías de diferentes materiales y formas que conducen el agua de lluvia del área de captación al sistema de almacenamiento a través de bajadas.
- Infraestructura de almacenamiento. Éstos son cisternas o tanques donde se almacena el agua de lluvia captada. Los materiales de las cisternas o tanques pueden ser plásticos (fibra de vidrio, polietileno y PVC), metales (barril de acero o tanque de acero galvanizado), concreto (ferrocemento, piedra y bloque de concreto) y madera (madera roja, abeto, pino, cedro y ciprés, envueltos con cables de acero de alta tensión).

- Filtración. La filtración es un proceso para separar un sólido del líquido en el que está suspendido, al hacerlo pasar, a través de un medio poroso (filtro) y por el cual, el líquido puede pasar fácilmente. El agua de lluvia se requiere filtrar con una malla o un filtro modular de sedimentos (para reducir turbidez), de igual manera, las primeras lluvias del año es necesario separarla para su uso posterior en aplicaciones que no requieran alta calidad del agua.
- Tratamiento de agua. El agua de lluvia una vez captada, con el fin de tener una calidad apta para uso y consumo humano requiere tratamiento adicional. El tratamiento difiere dependiendo de la calidad del agua de la fuente algunos que se usan con más frecuencia son la desinfección con cloro, filtración (lecho profundo, carbón activado, suavizador y pulidor), ósmosis inversa, desinfección por luz ultravioleta y ozono.
- Sistema de distribución del agua de lluvia captada. Su objetivo es distribuir de la infraestructura de almacenamiento el agua que ya fue tratada a toda la casa-habitación. Este sistema puede constar desde una llave, hasta un conjunto de tuberías con diversas salidas.

Para poder diseñar e implementar un sistema de captación pluvial, es imperativo conocer la demanda a abastecer, así como la disponibilidad histórica y geográfica del recurso hídrico. Asimismo, hay dos modos de dimensionar funcionalmente los sistemas: “dimensionado condicionado por la demanda y dimensionado condicionado por la aportación” (López-Patiño *et al.*, 2011). Cabe destacar que en costo es el abastecimiento del agua lo que más impacta en el desarrollo del proyecto.

2.2.1.3 Aprovechamiento y reuso del agua de lluvia

A continuación se presenta un recuento de los diferentes usos que se le ha dado al agua captada alrededor del mundo desde hace más de 5000 años. En el valle de India (3000 a 1500 A.C.) se encuentra evidencia arqueológica de construcción de embalses o presas para recolectar agua de lluvia, además de la construcción de pequeños depósitos para almacenar agua de lluvia para regar los cultivos y consumo humano (Public Health Engineering Department, Government of Meghalaya). En América Latina y el Caribe, desde hace más de tres siglos éstos se han utilizado para la recolección de agua proveniente de los techos era almacenada en cisternas de diferentes tipos y materiales. Existe evidencia de embalses desarrollados por los Mayas, donde en zonas bajas, se almacenaba agua de lluvia, un ejemplo es en Tikal. Ellos construyeron tres tipos diferentes de represas o embalses de acuerdo con su ubicación: al centro de las ciudades, residenciales y en ubicaciones aisladas (Pandey et al., 2003). En México, durante la época colonia, era común el diseño de diversos Sistemas de Captación del Agua de Lluvia en las haciendas, en los conventos y en las casas-habitación; se observan vestigios de estas tecnologías en los conventos de Santo Domingo (Oaxaca, Méx.), Acolman, (Edo. de Méx.) y Zacatecas (Zacatecas, Méx) (Anaya y Martínez, 2007).

Hoy en día se utiliza en Alemania, Japón, Kenya, entre otros países y su uso depende de las necesidades de cada país. En Japón, los sistemas de captación pluvial tienen dos propósitos, fuente de abastecimiento y control de avenidas. En la isla de Japón, Toshima, es pequeña; no tiene ríos o manantiales y el agua subterránea es salada, por lo cual los sistemas de captación de agua de lluvia son la única fuente de agua para su población. De igual manera en ese país, se utilizan las carreteras como medio de captación pluvial la cual se almacena en un embalse aguas abajo, además de tener sistemas comerciales y domésticos de captación. Por último, en Japón, así como en Alemania, la captación pluvial por

medio de techos permite el control de avenidas y por lo cual no se requiere ampliar la red de drenaje pluvial mientras que también se evita ampliar la capacidad de la red de abastecimiento de agua. El uso que se le da al agua captada es doméstico, pero no tiene la calidad para consumo humano, por lo cual es utilizada para regar, baños y lavado de ropa (Gould y Nissen-Petersen, 1999).

Además de los usos antes mencionados, la captación pluvial es una fuente alternativa de agua cuando las fuentes de abastecimiento del recurso no se encuentran disponibles localmente. Un ejemplo es en Kenya, en el área semiárida del distrito de Kajiado conocida como Kisamese, se desarrolló por medio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) un proyecto de captación pluvial con el fin de ahorrar a sus habitantes hasta 8 horas diarias en búsqueda de agua potable. En éste se instaló un sistema de captación de agua pluvial en la escuela de la comunidad y se aplicó esta tecnología para usos domésticos, ambientales y productivos. De esta manera, se beneficiaron hasta el 2010 a 936 familias (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2010).

Cabe destacar, como se menciona en este subtema y el anterior, que dependiendo del uso que se le quiera dar al agua recolectada es imperativo que se le dé un tratamiento para contar con la calidad requerida. Anaya y Martínez (2007) proponen un sistema que requiere de electricidad y conocimiento técnico para su operación y mantenimiento, sin embargo, no son los únicos métodos de tratamiento. Esto da pauta al desarrollo del tema de la presente tesis.

2.2.2 Tratamiento del agua pluvial

2.2.2.1 Normatividad sobre la calidad de agua

La calidad del agua está establecida por medio de normas nacionales e internacionales vigentes. Éstas determinan los límites permisibles de las características del agua dependiendo del uso que se le dé a la misma. Para uso y consumo humano es imperativo considerar a nivel internacional la guía de calidad de agua para consumo humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS). En Estados Unidos, aplican las normas de los organismos de la Food and Drug Administration (FDA) y la Environmental Protection Agency (EPA). Y homológamente, en México, existe la MODIFICACIÓN a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, la cual establece los límites permisibles para las diferentes características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua para uso y consumo humano; adicional a esta norma, están las NOM-041-SSA1-1993 sobre las especificaciones sanitarias para el agua envasada y NOM-179-SSA1-1998 sobre el control de calidad que deben tener los sistemas de almacenamiento público. Todas estas instituciones y sus respectivas normas o guías separan la contaminación en características microbiológicas, físicas y organolépticas, y químicas (metales, hidrocarburos aromáticos y plaguicidas).

Para esta tesis las características a medir son coliformes totales, turbidez, sólidos disueltos totales, fenoles, potencial de hidrógeno y temperatura.

2.2.2.2 Métodos de tratamiento de agua

Asimismo, dependiendo de la calidad del agua de la fuente de abastecimiento y el uso que se le quiera dar a la misma se pueden encontrar los métodos de tratamiento que aplica utilizar. De acuerdo a las características antes descritas se nombran y se describen brevemente los diferentes métodos de

tratamiento. Las definiciones descritas a continuación provienen de la MODIFICACIÓN de la NOM-127-SSA1-1994 y se complementan con las citas que se incluyen.

- Adsorción – remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución. Uno de los medios más conocidos para esto es:
 - Carbón activado. Este funciona como tratamiento para mejorar las características físicas y organolépticas, además de remover fenoles o compuestos fenólicos, hidrocarburos aromáticos, mercurio (requiere carbón activado granular o en polvo dependiendo de la concentración del mismo), plaguicidas, sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y trihalometanos (requiere carbón activado granular).
- Coagulación química – adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.
- Desinfección – destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos. Este proceso es útil cuando se tiene contaminación microbiológica. Entre los métodos de desinfección se encuentran:
 - Ozonización
 - Desinfección con cloro
 - Desinfección solar o SODIS por sus siglas en inglés
 - Desinfección con rayos o luz ultravioleta (UV)
- Floculación – aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos.
- Intercambio iónico – proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se

pone en contacto. Este proceso remueve arsénico, aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total, plomo, hierro, manganeso, nitratos, nitritos, cloruros, sodio, sulfatos y zinc, además de reducir la dureza del agua y los sólidos disueltos totales.

- Ósmosis inversa – proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltos en el agua, en el cual por medio de altas presiones se fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniéndose en dicha membrana los iones y moléculas de mayor tamaño. Este proceso remueve arsénico, aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total, plomo, hierro, manganeso, cloruros y sulfatos.
- Oxidación – pérdida de electrones de un elemento, ion o compuesto por la acción del oxígeno u otro agente oxidante.
 - Oxidación con ozono permite la remoción de fenoles o compuestos fenólicos y trihalometanos.
 - Oxidación con aireación permite la remoción de trihalometanos.
- Sedimentación – proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas en el agua, por efecto gravitacional.
- Filtración – remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada. Algunos medios filtrantes son los siguientes:
 - Filtración por medio de arena recubierta con hidróxidos de hierro y aluminio. Éste es un método efectivo de filtración de agua para remover bacteria, virus y turbidez (Ahammed y Chaudhuri, 1996; Lukasik et al., 1999), así como metales pesados (Bailey et al., 1992; Theis et al., 1992; Liu et al., 2005).
 - Polímeros – estos permiten se lleve acabo la microfiltración, debido a que los poros suelen ser de 1 a 50 micras. Asimismo, si se tienen poros de menor tamaño se le conoce a dicho proceso como nanofiltración.

- Filtración por medio de arena – Este es un método usado comúnmente para la remoción de partículas del agua, sin embargo no es un método efectivo para remover microorganismos.
- Este método cuando está en diversas etapas o combinada con coagulación y sedimentación permite la remoción de contaminación microbiológica.
- Combinado con coagulación, floculación y sedimentación sirve para remover mercurio, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal y sólidos disueltos totales.
- Combinado con oxidación, coagulación, floculación y sedimentación sirve para mejorar las características físicas y organolépticas, además de remover arsénico, aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total, plomo y fenoles o compuestos fenólicos.

Estos diferentes procesos u operaciones tienen diferente grado de efectividad, complejidad y costo, por lo cual su implementación en proyectos de tratamiento de agua para uso y consumo humano varía de acuerdo a su escala. De modo que Palaniappan et al. (2010) propone una clasificación de proyectos de acuerdo a su escala, ya que en base a la misma se aplican diferentes tecnologías.

- Nivel municipal. La fuente del agua puede ser subterránea (pozos), superficial (ríos, lagos, canales y embalses) o salada (de los océanos). Tras su transporte esta es purificada por lo cual se llevan los procesos de: remoción de sólidos o escombros, pretratamiento (ablandamiento y neutralización), floculación, sedimentación, filtración y desinfección. El método más usado para esto último es por medio de cloro u ozono.
- Nivel comunitario. Plantas de filtración o desinfección a nivel comunitario, con el fin de proveer agua potable proveniente de fuentes existentes de agua. Modelos como el de la organización: Water Health International, buscan instalar y cobrar por el agua de la comunidad en que se instala con el fin de hacer la planta de tratamiento instalada autosustentable. Con estos proyectos

se espera abastecer a comunidades de menos de 3,000 habitantes con 20 litros de agua al día. También hay proyectos en caso de desastres.

- Nivel domiciliario. En la última década se le ha dado un mayor auge a estos sistemas. Los tratamientos a nivel domiciliario o point-of-use water treatment (en inglés) consisten en desinfectar el agua, por medio de luz UV, cloro u ebullición, previo a su consumo; por lo que cada familia es responsable del tratamiento del agua que consumirá. De acuerdo a la estrategia utilizada y a la capacidad de adquisición de la población se definen diferentes tecnologías para tratar el agua. Así, se busca eliminar los intermediarios y beneficia directamente al usuario final. Estos sistemas de tratamiento se han promovido globalmente por la Organización Mundial de la Salud ya que son soluciones efectivas en costo (con 1 dólar de inversión se obtienen 60 dólares de beneficios) y son capaces de disminuir radicalmente el riesgo de enfermedades diarreicas y muertes relacionadas (Sobsey, 2006).

Los métodos de tratamiento a investigar en esta tesis caen dentro de la clasificación de métodos a nivel domiciliario. A continuación se presenta un mayor detalle de la base teórica de correspondiente a los métodos de filtración y desinfección solar.

2.2.2.3 Modelo de filtración

La filtración es un proceso con mecanismos de remoción físicos, químicos y biológicos. Los mecanismos que se llevan a cabo dependen de las variables definidas en para el diseño de los filtros como las características del medio filtrante, porosidad del lecho filtrante, profundidad de lecho filtrante, tasa de filtración, pérdida de carga disponible y características del afluente. Estas variables se definen considerando que el flujo de agua a través de un filtro obedece a la ley de Darcy, la cual se presenta a continuación.

$$\frac{Q}{A} = k \frac{h}{l} \quad (2-1)$$

Dónde h es la pérdida de carga en el lecho en [L], l es la profundidad del lecho en [L], Q es la descarga en [$L^3 T^{-1}$], A es el área del lecho en [L^2] y k es el coeficiente de permeabilidad en [$L T^{-1}$]. Por lo tanto, la tasa de filtración es directamente proporcional a la cabeza o energía disponible de filtración y a la permeabilidad del lecho e inversamente proporcional al espesor del medio. Cabe destacar que para cumplir con la Ley de Darcy, es decir, que la relación entre el caudal y el gradiente hidráulico sea lineal, se requiere un régimen laminar. Específicamente, el número de Reynolds debe ser menor a 1 y en caso de estar entre 1 y 10 puede cumplirse o no la ley de Darcy (Sánchez, 2013).

El coeficiente de permeabilidad del lecho (k) depende de la textura y la estructura del material (su tipo, grado y características de agregación), además del fluido, si éste no fuera agua.

Para poder modelar lo que ocurre en el medio filtrante y su saturación, esta ecuación se deberá combinar con una ecuación de conservación de masa dónde se consideren las características del afluente, tales como la concentración de sólidos suspendidos.

Los mecanismos de remoción físicos ocurren al filtrarse el agua a través del medio poroso, dónde las partículas inertes, materia orgánica y microorganismos son removidos por medio de cribado, sedimentación, impacto inercial, intercepción, adhesión y adsorción (Romero, 1999). El cribado permite a las partículas más grandes que los poros ser retenidas mecánicamente y a las más pequeñas mediante oportunidad de contacto. La sedimentación, impacto inercial y la intercepción ocurre en el medio filtrante (ver Figura 2-2) éstas se llevan a cabo

cuando las partículas entran en contacto con la superficie del medio filtrante. Cabe destacar que las partículas pesadas no siguen las líneas de corriente por lo cual impactan o se sedimentan en el medio poroso al entrar en contacto con el mismo. La intercepción por otro lado ocurre con partículas más pequeñas que las anteriores, las cuales se mueven con las líneas de corriente y al entrar en contacto con el medio filtrante son removidas. Asimismo, las partículas flocculantes se adhieren a la superficie del medio filtrante y a medida que éste se tapona la fuerza cortante superficial aumenta hasta que ya no hay remoción adicional por lo cual habrá fugas del material contaminante al fondo del filtro apareciendo turbidez en el efluente. Por último, la adsorción física ocurre cuando los contaminantes del agua se atraen al medio filtrante por medio de fuerzas electrostáticas, electrocinéticas y de Vander Waals, lo cual permite la retención del contaminante sobre el medio filtrante. Este mecanismo en conjunto con la adsorción química son las que juegan un papel más importante en la filtración (Romero, 1999).

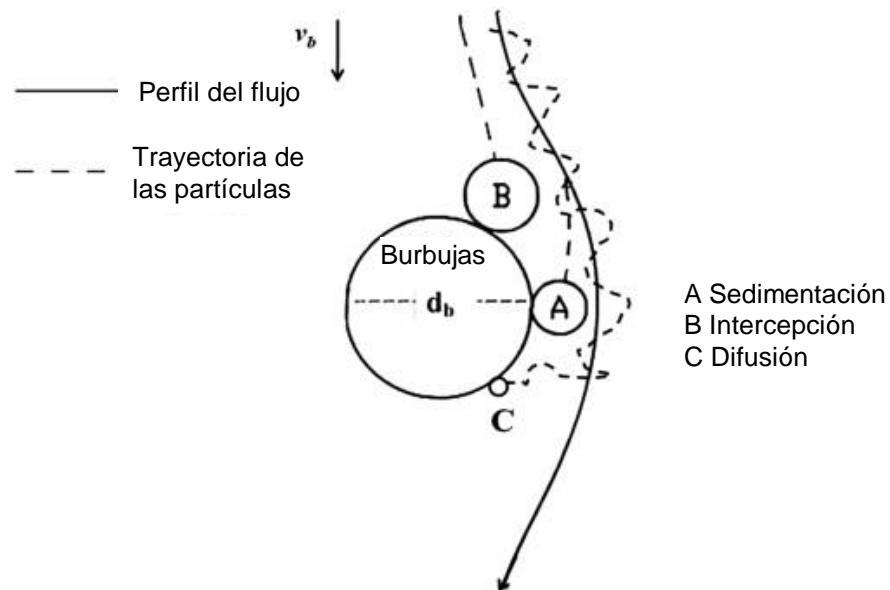


Figura 2-2. Mecanismos de transporte de las partículas.

La adsorción química ocurre cuando existe una atracción entre partículas generando enlaces e interacciones químicas; cabe destacar que se pueden inducir reacciones químicas agregando clavos u otros componentes al biofiltro (Noble, 2012). Simultáneamente, dentro de los filtros ocurre la floculación; este fenómeno físico-químico ocurre cuando partículas más grandes capturan partículas más pequeñas y forman partículas aún más grandes.

Mecanismos biológicos de remoción se pueden llegar a cabo si en el filtro se crea una capa pegajosa de material biológico, mejor conocida como capa biológica o *schmutzdecke*, que se forma en la superficie del material filtrante. En esta capa los microorganismos son inactivados por medio de degradación y/o depredación biológica de la materia orgánica (Vanderzwaag et al., 2009), además de reducir el volumen de poro para promover la remoción de partículas contaminantes.

La remoción de contaminantes de este método está ligada a las características del medio filtrante. Los medios filtrantes utilizados y evaluados en investigaciones previas son arena, tezontle y carbón activado, considerando que puede haber variaciones de los mismos.

2.2.2.4 Modelo de desinfección solar

La desinfección solar es un método de tratamiento que se remontan sus registros desde los egipcios. Éste se basa en la radiación solar, específicamente los rayos UV-A y rayos infrarrojos. Los efectos sinérgicos de estos dos componentes de la radiación solar disminuyen la carga de microorganismos patógenos presentes en el agua. Cabe destacar que después de los egipcios, este

método fue retomado por los ingleses a finales de la década de 1870 y, finalmente, con el surgimiento de las botellas de PET, se retomó por Arca *et al.* en 1970.

La radiación solar (280 – 4000 nm) se divide en tres rangos de longitud de onda (ver el Cuadro 2-1) radiación ultravioleta (UV), luz visible y radiación infrarroja. La desinfección solar utiliza, como se menciona anteriormente, únicamente la radiación ultravioleta y la infrarroja. A continuación se estarán describiendo cómo éstas llevan a cabo la desinfección solar.

Cuadro 2-1. Distribución de la espectral de la radiación solar (Gueymard, 2004; Bériz y Álvarez, 2008)

Radiación	Zona de longitud de onda (nm)	Contenido (%)
Ultravioleta	280 - 380	7
Visible	380 - 780	47.3
Infrarroja	780 - 4000	45.7

La radiación ultravioleta, conforma menos del 8 por ciento de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra (Navntoft *et al.*, 2012). La radiación UV se clasifica de acuerdo a su longitud de onda en radiación UV-A, UV-B y UV-C, siendo la radiación UV-A, la fracción de radiación con un rango de longitud de onda más alto, cercano a la luz violeta. La longitud de onda de la radiación UV-A está entre el rango de 315 a 380 nm, mientras que para UV-B y UV-C los rangos son 280 a 315 nm y 100 a 280 nm, respectivamente (McGuigan *et al.*, 2012). Es importante mencionar que de acuerdo a cómo se mida la radiación hay autores que utilizan las longitudes de onda nominales, en lugar de las presentadas en el enunciado anterior, lo cual definiría a la radiación UV-A con una longitud de onda de 320 a 400 nm. Dicho esto, la radiación solar únicamente se compone de radiación UV-B y UV-A. De igual manera, la radiación UV-A compone el 95% del espectro de radiación UV transmitida por el sol y que llega a la superficie de la tierra; por lo

tanto, estudios realizados se han enfocado en el efecto germicida de la radiación UV-A o de la radiación solar UV como un conjunto (Navntoft *et al.*, 2009; McGuigan *et al.*, 2012). La luz ultravioleta (UV) afecta a los microorganismos patógenos de manera directa (cuando interactúa con el ADN, ácidos nucleicos y las enzimas de las células vivas) e indirecta (mediante la oxidación). Para entender lo anterior, se definirán algunos términos básicos a continuación.

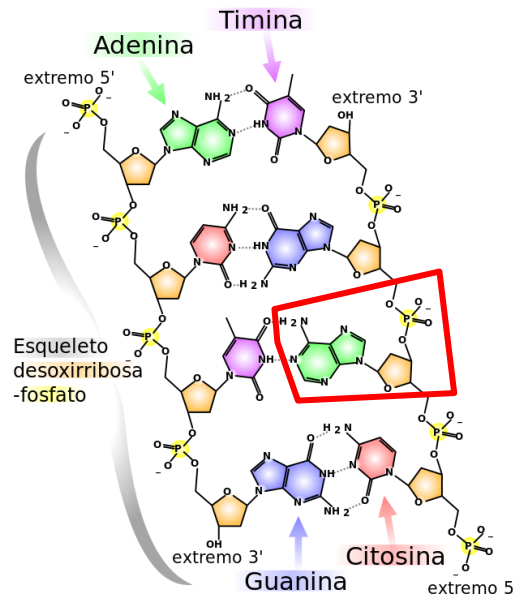


Figura 2-3. Composición de los nucleótidos (ejemplo marcado en rojo, dónde en verde se muestra la base nitrogenada, en naranja la pentosa y en amarillo el fosfato). Fuente: Sierra, 2008.

El ADN y el RNA son ácidos nucleicos ubicados en el centro de las células y en algunos organelos; éstos almacenan información genética de organismos vivos y son responsables de la transmisión hereditaria. Las unidades que forman los ácidos nucleicos son los nucleótidos. Éstos se componen de tres unidades (ver Figura 2-3): una pentosa (monosacárido de 5 carbonos la cual se unen mediante enlaces covalentes las otras dos unidades), una base nitrogenada y un grupo fosfato. Las bases nitrogenadas se clasifican en tres grupos de acuerdo a la

estructura de la cual se derivan, dos de las cuales son complementarias; las bases derivadas de la estructura de la purina (bases purinas, como adenina y guanina) son complementarias a las bases derivadas de la estructura de la pirimidina (bases piridiminas, como timina, citosina y uracilo). La complementariedad de las bases permite la reapiación del ADN, la transcripción del ADN a ARN (mediante una enzima llamada polimerasa que sintetiza un ARN mensajero que mantiene la información de la secuencia del ADN) y la traducción del ARN en proteínas (dónde se convierte una secuencia del ARN mensajero en una cadena de aminoácidos que formarán una proteína).

De manera directa, la radiación UV-B al que son sometidas los microorganismos llega al ADN y es absorbida por las bases piridiminas: timina y citosina. La luz UV rompe los puentes de hidrógeno del emparejamiento y promueve la formación de nuevos enlaces con bases pirimidinas adyacentes, formando dímeros de piridimina (pares conectados por enlaces covalentes). Los dímeros de pirimidina son una mutación que previenen el emparejamiento de la timina y citosina con sus bases purinas complementarias. Asimismo, donde se ubica el dímero, cambia la forma de la molécula de ADN (ver Figura 2-4); evitando que las enzimas polimerasas copien el ADN en esta región. En algunos casos, estas enzimas se pueden saltar el dímero, dando como resultado la supresión de dos bases de la cadena del ADN; en otras ocasiones, las polimerasa “adivina” la base a la que pertenece esa posición e incorpora una secuencia aleatoria. Además de no permitir la transcripción del ADN, también impiden la reapiación del mismo, por lo cual la célula no se divide y puede morir.

Cada célula tiene una cierta cantidad de mecanismos o sistemas de reparación de ADN a su disposición (Serment-Guerrero y Breña-Valle, 2010; McGuigan *et al.*, 2012). Las bacterias pueden evitar el proceso de mutación, eliminando directamente la lesión al restituir la estructura original del ADN mediante la fotorreactivación. Este proceso lo lleva a cabo la enzima fotoliasa la

cual reconoce a los dímeros de pirimidina causados por la radiación UV y aprovechando las radiaciones con longitudes de onda del espectro azul presentes en la luz solar, “rompe los enlaces que se formaron entre las dos pirimidinas adyacentes, restaurando en un sólo paso la estructura del ADN” (Serment-Guerrero y Breña-Valle, 2010).

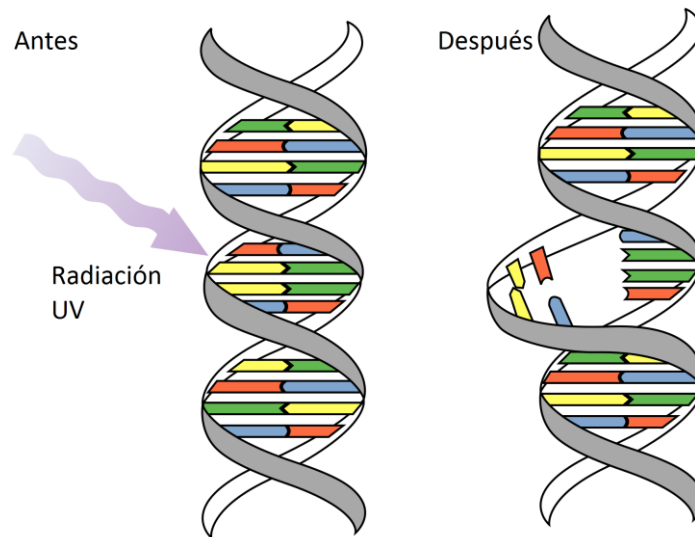


Figura 2-4. Mutación debido a la radiación UV. Fuente: Allen, 2001.

Otros procesos menos específicos de reparación tienen la capacidad de reconocer, cortar y eliminar las bases afectadas y los nucleótidos dañados permitiendo que el espacio generado se rellene por una polimerasa de ADN. Estos procesos se les conocen como mecanismos de escisión, ocurren a nivel de una sola base o nucleótido, o bien de tramos con un número determinado de nucleótidos, sin embargo este mecanismo reconoce únicamente cierto tipo de bases dañadas (Serment-Guerrero y Breña-Valle, 2010; Dunlop *et al.*, 2011; McGuigan *et al.*, 2012), Otra opción de recuperación implica un intercambio de material entre moléculas de ADN mediante la recombinación. La recombinación implica intercambio de material entre moléculas del ADN, cuando hay al menos dos

copias de mismo. Este proceso puede ser un intercambio entre ambas, o sólo una de ellas puede recibir material nuevo; y “es la única posibilidad de recuperar material genético” (Serment-Guerrero y Breña-Valle, 2010).

Por último, se encuentra la respuesta SOS que es un sistema más complejo que los mecanismos antes mencionados. Esta se ha estudiado por Stavans (2006), y Serment-Guerrero y Breña-Valle (2010) en la enterobacteria *Escherichia coli*, identificando que más de 40 genes son responsables de estos procesos. La respuesta SOS se activa cuando el ADN contiene una gran cantidad de dímeros de pirimidina que impiden la re replicación del mismo. La tarea de estos genes es detectar el daño, repararlo mediante cortes o recombinaciones y, en caso necesario, mutar el ADN con el fin de permitir su re replicación (Stavans, 2006; Serment-Guerrero y Breña-Valle, 2010).

De manera indirecta, la radiación UV-A no tiene la energía para modificar de manera directa las bases del ADN; sin embargo, la desinfección solar es capaz de llevarse a cabo mediante las reacciones con los productos de la radiólisis del agua. Los principales productos son iones hidroxilo (OH^+), superóxido (HO_2^+), hidronio (H^+) y por subsecuentes reacciones, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y radicales libres como el radical hidroxilo (OH^\bullet) (Serment-Guerrero y Breña-Valle, 2010; Dunlop *et al.*, 2011; McGuigan *et al.*, 2012). Todas estas especies son muy reactivas, se pueden formar de manera intracelular atacando cualquiera de los componentes del ADN (al romper los enlaces dobles y generar reacciones que dan a lugar rupturas del mismo), provocando la oxidación de amino ácidos en las proteínas y de ácidos grasos polisaturados en los lípidos (Serment-Guerrero y Breña-Valle, 2010; Dunlop *et al.*, 2011; McGuigan *et al.*, 2012). Adicionalmente, los productos de la radiólisis del agua se pueden formar fuera de las células 33–35, inactivando a las mismas 36 a una temperatura mayor a los 45°C , donde de manera sinérgica se lleva a cabo una pasteurización lenta de las moléculas,

además la temperatura permite inhibir los mecanismos de reparación del ADN (McGuigan *et al.*, 2012; McGuigan *et al.*, 1988).

La radiación UV-A que atraviesa la atmósfera es capaz de propagarse en materiales transparentes e interactuar directamente con el ADN, los ácidos nucleicos y las enzimas de las células vivas. Esta interacción afecta la duplicación del ácido nucleico y la síntesis de proteínas; también cambia la estructura molecular, además afecta la respiración, y el transporte de nutrientes a través de la membrana. Finalmente, junto con el oxígeno disuelto produce compuestos tóxicos (radicales libres de oxígeno y peróxidos de hidrógeno) que interfieren con las estructuras celulares y matan a los patógenos (Solarte *et al.*, 1997; Meierhofer y Wegelin, 2003). Bosshard *et al.* (2010) demostraron que la oxidación de las proteínas debido a la radiación es crucial en la desactivación y posterior muerte de microorganismos en el agua.

De igual manera, los microorganismos son sensibles al aumento de temperatura, ya que: causa importantes cambios en algunos parámetros físicos y químicos del agua, eleva la tasa de reacciones químicas y bioquímicas, decrece la solubilidad de los gases y aumenta la tasa metabólica de los microorganismos.

El tercer componente de la radiación solar es la radiación infrarroja o de onda larga (longitud de onda superior a 780 nm). Ésta tampoco la puede ver el ojo humano y al ser absorbida por el agua, eleva su temperatura y genera el efecto de pasteurización cuando la temperatura llega a 70-75°C.

Conjuntando los fenómenos antes descritos, el aumento de temperatura a 50° C y la radiación UV-A, se produce un efecto sinérgico que facilita la desinfección solar (Solarte *et al.*, 1997; Simon *et al.*, 2007; Blanco *et al.*, 2009). Mismo que a través del modelo propuesto por Geeraerd *et al.* (2009) permite

generar la curva de los procesos de inactivación de coliformes totales que se llevan a cabo en SODIS como se muestra en la Figura 2-5.

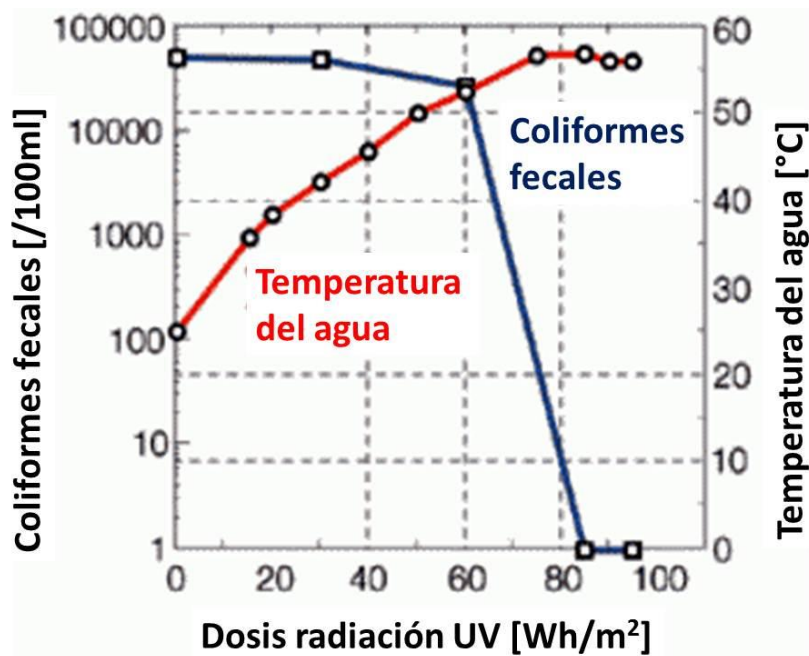


Figura 2-5. Gráfica de la sinergia entre temperatura y radiación UV que permite la inactivación de coliformes fecales.

Publicaciones recientes como las de Rincón y Pulgarín (2004), Davies *et al.* (2009), Amin y Han (2011), Alotaibi y Heaselgrave (2011) y Castillo-Ledezma (2011) analizan el rol al adicionar potenciadores a la desinfección solar. Algunos de estos potenciadores son dióxido de titanio, peróxido de hidrógeno, riboflavin, vinagre y limón, los cuales promueven la oxidación aumentando la eficiencia de inactivación de los microorganismos patógenos presentes en el agua.

El parámetro más utilizados para evaluar la eficacia SODIS es presencia de coliformes fecales mediante organismos indicadores como la *Escherichia coli*,

sin embargo estudios se han realizado para conocer el efecto de SODIS en bacterias o virus determinados.

III. METODOLOGÍA

La metodología a seguir en la presente investigación se divide en cuatro etapas. La primera consiste en la revisión de la literatura cuyo resultado se presenta en el capítulo anterior por lo cual se omitirá en esta sección, la segunda se le ha llamado Antecedente y consta de muestreos e implementación de desinfección solar y biofiltración utilizando agua de lluvia almacenada en la cisterna de ferrocemento instalada en la escuela telesecundaria de la localidad Pie de Gallo, Querétaro. Lo realizado en dicha comunidad dio pauta para realizar el estudio central de esta tesis y tercera etapa de la investigación, la cual se presenta en la sección Diseño de los componentes del sistema de desinfección solar. Por último, se busca la identificación localidades rurales potenciales del estado de Querétaro para implementar la recolección pluvial y el diseño del prototipo resultado del presente trabajo.

3.1 Metodología preliminar

Esta etapa consistió en pruebas de campo para entender la viabilidad de implementar los sistemas de biofiltración y desinfección solar una localidad rural. Esta etapa comenzó al definir el sitio de estudio y se compone del análisis de calidad de agua de lluvia almacenada en cisternas de ferrocemento instaladas por la UAQ, la instalación de tres biofiltros y pruebas realizadas de desinfección solar en botellas de PET transparente colocadas sobre lámina galvanizada.

3.1.1 Selección del sitio y análisis de calidad de agua.

A partir de la identificación de localidades en dónde la Universidad Autónoma de Querétaro ha realizado proyectos previos de ecotecnias, se toma como punto de partida el proyecto: Servicio Profesional para la implementación del Proyecto “Ecotecnias Escolares” en cuatro escuelas de cuatro municipios, durante

el año 2012. Como parte de este proyecto se instalaron cisternas de ferrocemento, huertos urbanos y biofiltros de aguas grises. En los siguientes cuadros y figura se muestra la información de las escuelas, las localidades a las que pertenecen y su ubicación geográfica, respectivamente.

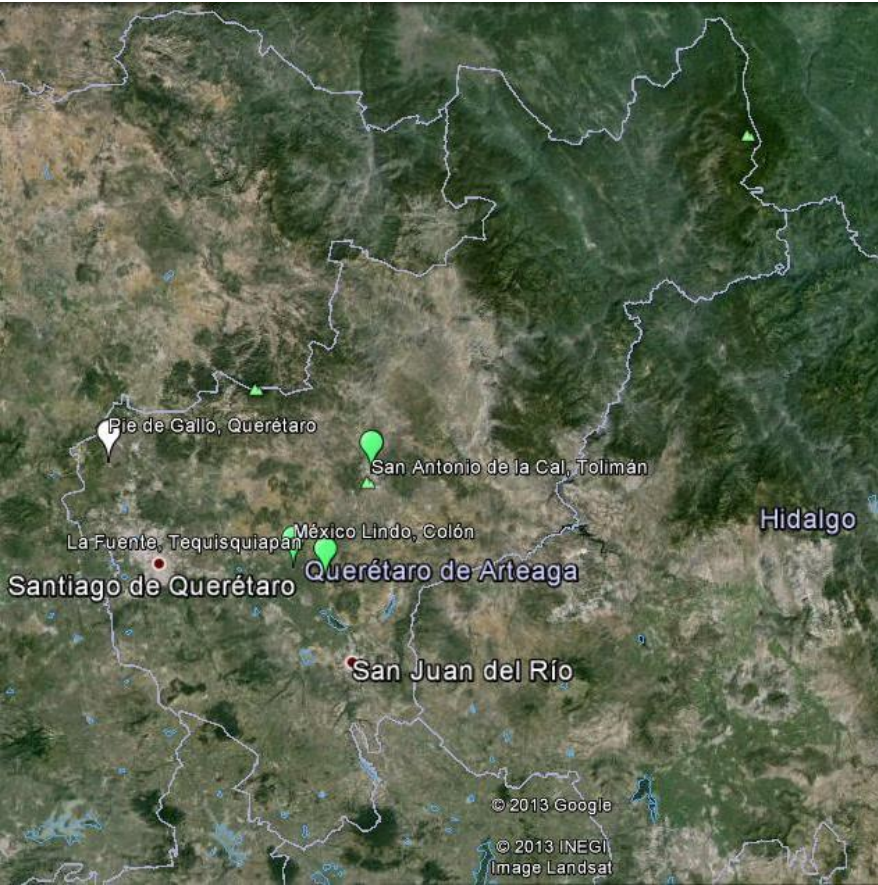


Figura 3-1. Mapa de ubicación de escuelas de comunidades seleccionadas para el proyecto "Ecotecnias Escolares" y la presente investigación.

Cuadro 3-1. Escuelas del proyecto "Ecotecnias Escolares" implementado en el 2012.

Nombre de la escuela	Localidad	Municipio	Nivel
Valentín Gómez Farías	San Antonio de la Cal	Tolimán	Secundaria
General Lázaro Cárdenas	México Lindo	Colón	Primaria General
Juan Enrique Pestalozzi	La Fuente	Tequisquiapan	Secundaria
República de Argentina	Pie de Gallo	Querétaro	Secundaria

Cuadro 3-2. Información adicional de las localidades dónde se ubican las escuelas del proyecto "Ecotecnias Escolares" implementado en el 2012.

Nombre de la Localidad	<i>Pie de Gallo</i>	<i>México Lindo</i>	<i>La Fuente</i>	<i>San Antonio de la Cal</i>
Municipio	Querétaro	Colón	Tequisquiapan	Tolimán
Clave	220140075	220050023	220170007	220180047
Número de habitantes	4089	836	4272	2721
Cercanía a Cabeceras Municipales y otras localidades	8.5 km - Z.U. Qro 6.1 km - Santa Rosa J.	8.6 km - Pedro Escobedo 21.9 km - Z.U. Qro 18.8 km - SJR	13.1 km SJR	9.2 km - S.P. Tolimán 2.5 km - Bernal

En el 2012, se instalaron las 4 cisternas de ferrocemento ubicadas en las escuelas antes mencionadas. Las cisternas tienen una altura de 2.5 m, captan agua de una o dos aguas de techos cercanos a las mismas y tienen una capacidad de 12,000 litros. El material que se utilizó fue comprado de manera local y se anexan las cantidades de los mismos en el Cuadro 3-3.

Cuadro 3-3. Materiales para construir una cisterna con capacidad de 12,000 litros.
(Fuente: Reporte Técnico del proyecto “Ecotecnias Escolares”.)

20 bultos	cemento
1 bulto	cal
15 metros	malla electrosoldada 6×6-6/6 (gruesa)
30 metros	tela gallinero 20-25-1.75
15 metros	tela gallinero 20-25-1.50
5 kg	alambre recocido
½ viaje	arena
3 carretillas	grava
1 pz.	niple galvanizado 2 × 8"
2 pz.	niple galvanizado ½ × 4"
1 pz.	codo galvanizado ½"
1 pz.	tee galvanizada ½"
1 pz.	tapón cachucha 2"
1 pz.	llave nariz ½"
½ m	tubo pvc 2"
2 pz.	adaptador p/ manguera ½"
2.5 mts.	manguera tipo ind. 5/8"
2 pz.	abrazadera sinfin 5/8"
1 pz.	puerta de fierro p/registro 60 × 40cm

La construcción de las cisternas de ferrocemento consistió de nueve pasos que se resumen a continuación. Primero, se tejió la malla electrosoldada con la tela de gallinero mediante una serie de amarres. Enseguida, se formó un cilindro, se colocó la base del mismo y se sentó en un firme colado, redondo de 10 cm de espesor. Posteriormente se cimbró la cisterna y colocaron las salidas de agua: el desagüe en la base, la toma de agua a 30 cm de la base y el desagüe para prevenir desbordamiento en la parte superior. Lo cual da pauta al proceso de repellado (aplicación de mezcla en la parte exterior del cilindro). Después, se armó

y colocó la tapa de la cisterna; para finalmente impermeabilizar y conectar la cisterna al techo de la escuela utilizando tubo PVC.

Algunas de las recomendaciones realizadas tras su construcción fueron que la cisterna nunca debe quedarse completamente sin agua, se deberá mantener con agua hasta el nivel de la llave; cuando se esté acercando la temporada de lluvias es importante que se barran los techos para mantenerlos libres de basura; se requiere lavar la cisterna por lo menos una vez al año, sólo con agua; se requiere impermeabilizar el exterior de la cisterna cada vez que sea necesario; y el agua de la cisterna se usará para riego y limpieza. (Para mayor información favor de consultar los manuales de ecotecnias realizados y publicados por la UAQ).

Con el fin de caracterizar el agua de lluvia captada y almacenada en cisternas de ferrocemento en localidades rurales del estado de Querétaro, se realizó un muestreo del agua en cada una de las cuatro localidades en noviembre del 2013.

Los muestreos de agua de lluvia realizados en las cuatro cisternas de ferrocemento instaladas en el 2012 con el proyecto “Ecotecnias Escolares” se realizaron acorde a los requisitos sanitarios de la NOM-014-SSA1-1993 “Procedimientos Sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento públicos y privados”. En la cual se estipula que se requiere para la toma de muestra para análisis bacteriológico: frascos de polipropileno estériles y para análisis físico-químico: envases de plástico inertes al agua de dos litros de capacidad como mínimo, con tapones del mismo material que proporcionen cierre hermético. El procedimiento seguido es para toma de muestras en bomba de mano o grifo del sistema de distribución para el análisis bacteriológico y físico-químico correspondiente.

Para los análisis se utilizaron los servicios de la Unidad de Servicios Químicos de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Universitario, y el Laboratorio de Calidad de Suelo y Agua de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Aeropuerto. Las normas que se utilizaron para hacer cada uno de ellos se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 3-4. Normas utilizadas para el análisis de las muestras de agua.

Característica	Norma
Características microbiológicas	
Organismos coliformes totales, coliformes fecales y <i>Escherichia Coli Presuntiva</i>	NMX-AA-042-1987
Características físicas y organolépticas	
Color (UCV en escala de platino cobalto)	NMX-AA-045-SCFI-2001
Turbiedad (UTN)	
Características químicas	
Cadmio	NMX-AA-051-SCFI-2001
Cromo total	
Plomo	
Cobre	
Manganeso	
Hierro	
Zinc	
Mercurio	
Cloro residual libre	NMX-AA-100-1987
Dureza total (como CaCO ₃)	NMX-AA-072-SCFI-2001
Fenoles o compuestos fenólicos	NMX-AA-050-SCFI-2001
Sulfatos (como SO ₄)	EPA METHOD 300.1
Cloruros como Cl ⁻	
Fluoruros (como F ⁻)	
Sodio	
Nitratos (como N)	
Nitritos (como N)	
pH ó potencial de hidrógeno	NMX-AA-008-SCFI-2000
Nitrógeno amoniacal	
Cianuros (como CN ⁻)	
Sólidos disueltos totales (SDT)	NMX-AA-034-SCFI-2001

Característica	Norma
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	NMX-AA-039-SCFI-2001

Los resultados de los mismos se compararon con la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, en caso de ser necesario, éstos se complementaron con la NOM-041-SSA1-1993 sobre las especificaciones sanitarias para el agua envasada.

3.1.2 Biofiltración como alternativa para la desinfección de agua pluvial.

Adicionalmente a caracterizar la calidad de agua de lluvia almacenada en cisternas de ferrocemento en el estado de Querétaro, se instalaron tres biofiltros y se obtuvo agua de lluvia para las pruebas de desinfección solar realizadas en esta etapa de la investigación. La telesecundaria República de Argentina, localizada en la localidad de Pie de Gallo, Querétaro, se seleccionó para realizar esta etapa debido a su distancia de la Zona Urbana del Estado de Querétaro. El fin de esta implementación es comprender el funcionamiento en campo del sistema de biofiltración y la eficacia del método en la remoción de contaminación presente en el agua.

Los biofiltros instalados durante el periodo agosto a diciembre del 2013 se componen de la primera capa de la cama filtrante, material para drenado del agua filtrada, contenedor de plástico del biofiltro, placa difusora, tapa del biofiltro y sistema de control de flujo de salida. Las respectivas dimensiones de cada componente se muestran en la Figura 3-2.

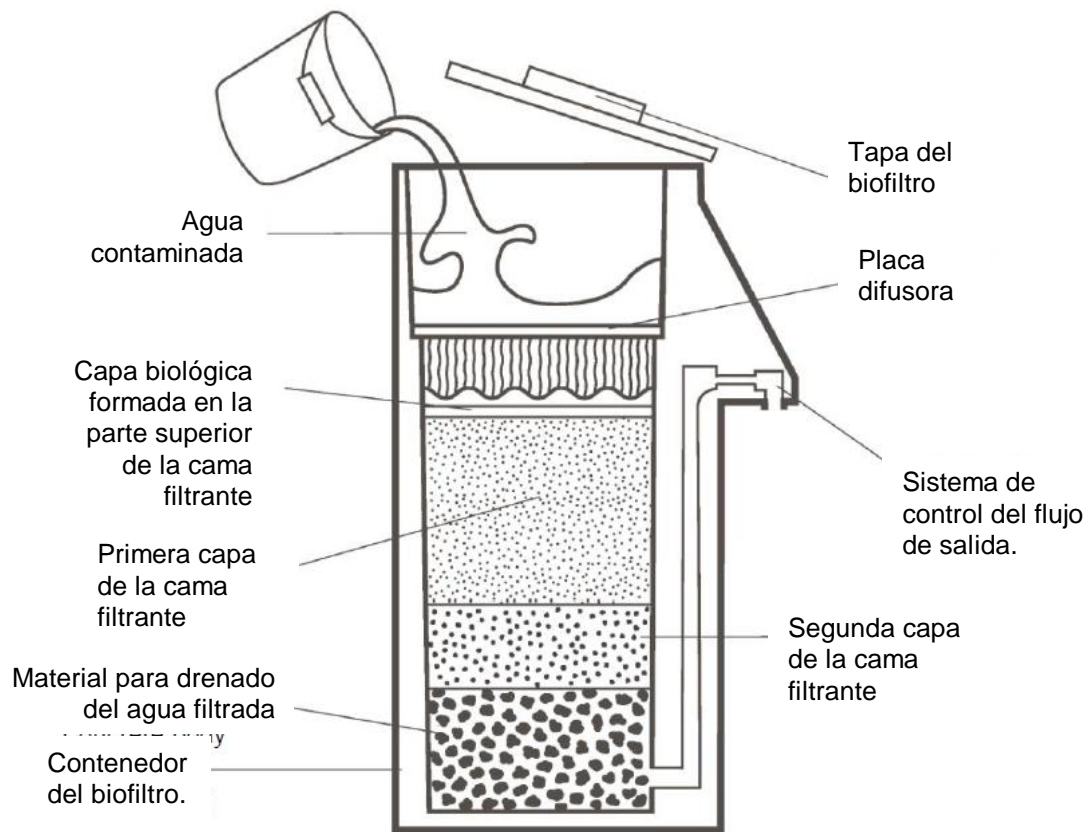


Figura 3-2. Componentes de un biofiltro.

Las variables independientes fueron la media filtrante seleccionada, dos biofiltros se instalaron de arena fina y un tercero se instaló con una primera capa de 10 cm de tezontle y el resto de arena fina.

La instalación y construcción de los biofiltros se divide en tres etapas (ver), la primera es la preparación del recipiente, la segunda es la preparación de la media filtrante, la tercera es la puesta en marcha que consiste en el relleno del biofiltro y remoción de finos. Favor de ver el Cuadro 3-5, para el listado de material, herramienta y consumibles necesarios para la fabricación de los biofiltros instalados.

Cuadro 3-5. Material, herramienta y consumibles requeridos para la construcción e instalación de los biofiltros.

<p>Materiales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Media filtrante <ul style="list-style-type: none"> • Arena • Tezontle • Grava y arena de separación • Grava para drenaje • Cesto de plástico con tapa. • Tubo de PVC ced. 40, ½" diámetro. • Bolsa de plástico, negra. 	<p>Herramienta:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mallas. (0.053 mm, 1.25 mm, 4.76 mm, 9.52 mm) • Taladro, broca 3/16" y sacabocados 5/8" • Pala, Cubetas y Flexómetro <p>Consumibles:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lija • Pegamento PVC • Cloro (100 mg/l)
--	--

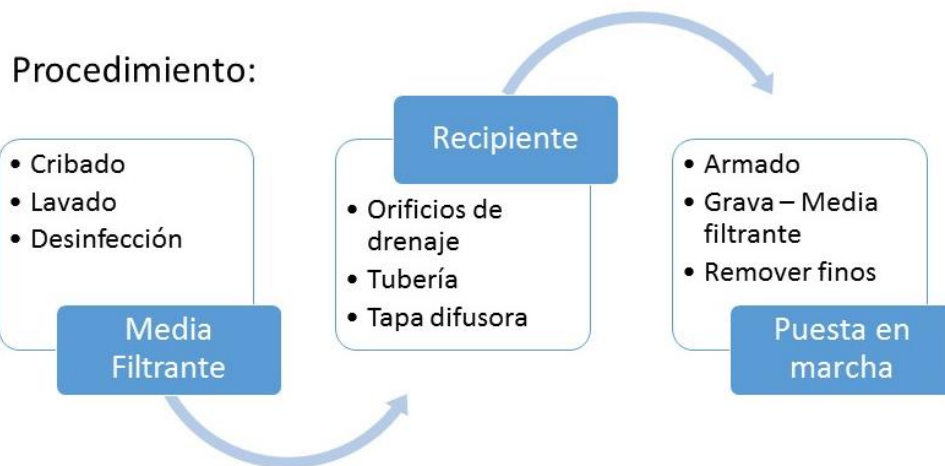


Figura 3-3. Diagrama con el procedimiento para la construcción e instalación de los biofiltros.

La operación del biofiltro consiste en verter diariamente dos veces al día, 18 litros de agua de lluvia dentro del biofiltro, de manera que el agua tiene un

tiempo de retención de aproximadamente 8 y 14 horas, respectivamente. Por lo cual, se solicita a un grupo encargado para cada biofiltro; este grupo diariamente entre 8 y 9 de la mañana le coloca 18 litros de agua al mismo. Durante la tarde y el fin de semana, la responsabilidad de esta tarea es de los investigadores.

El muestreo y análisis de agua de lluvia y agua filtrada se realizó durante los meses de octubre y noviembre del 2013. El muestreo se realizó de manera semanal, tanto de las entradas como salidas del sistema, el agua de lluvia y agua filtrada, respectivamente.

El procedimiento consta de tomar una muestra de agua de lluvia (acorde a la NOM-014-SSA1-1993) de la cisterna de ferrocemento por la tarde, al colocarle agua a los filtros. Con una pipeta esterilizada desechable, tomar una muestra de agua de 1 ml de la botella con el agua muestreada y se colocar en una placa petrifilm para recuento de *E. coli* y coliformes totales marca 3M (ver características de la misma en el Cuadro 3-6). Ésta se guardó y se tomaron fotografías para observar el crecimiento de microorganismos. En las mismas, se realizó el conteo de unidades formadoras de colonias por placa y se reportaron los resultados. Este mismo procedimiento se siguió para tomar las muestras y análisis del agua de salida de los biofiltros.

Cuadro 3-6. Características de la placa petrifilm para recuento de *E. coli* y coliformes totales marca 3M

Característica	Descripción
Marca	3M
Contenido de la placa	Nutrientes de Bilis Rojo Violeta, un agente gelificante soluble en agua fría, un indicador cromogénico que facilita la detección de colonias al teñirlas de color rojo y un indicador de actividad de glucuronidase.

Asimismo, se toma el flujo de salida del biofiltro con el fin de identificar el grado de saturación de la media filtrante, esto se realizó de manera periódica al inicio de la instalación del mismo y de manera puntual, una vez pasados 15 días de la instalación.

Por último, se realizó un muestreo del agua filtrada y desinfectada mediante biofiltración acorde a la NOM-014-SSA1-1993 “Procedimientos Sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento públicos y privados” y los resultados fueron analizados en la Unidad de Servicios Químicos de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Universitario, y el Laboratorio de Calidad de Suelo y Agua de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Aeropuerto. Las normas que se utilizaron para hacer cada uno de ellos se presentaron en el Cuadro 3-4. Los resultados de los mismos se compararon con la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización” y cuando fue necesario se complementaron con la NOM-041-SSA1-1993 sobre las especificaciones sanitarias para el agua envasada. Asimismo se calculó la capacidad de remoción de los contaminantes.

3.1.3 Pruebas del método de desinfección solar

Para la parte de desinfección solar primero se realiza la limpieza de botellas de PET de 1 litro de agua con cloro (concentración de 1 ml / 100 ml) y jabón. Después de secarse, se enjuagan con agua destilada. Posteriormente, se enjuaga cada una 3 veces con agua de lluvia, como descrito por la NOM-014-SSA1-1993, y se realiza el llenado de $\frac{3}{4}$ de la botella. Se obtiene una muestra de 1 ml utilizando una pipeta desechable esterilizada y se inocula la muestra en una

placa petrifilm para recuento de *E. coli* y coliformes totales marca 3M. Terminado el muestreo, se termina de llenar la botella asegurando no dejar cavidades en la misma. Las botellas se colocan en el techo de lámina galvanizada del estacionamiento del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería ver Figura 3-4. Transcurridas 7 horas, se abren las botellas y se obtienen nuevamente una muestra para realizar el análisis microbiológico.

Adicional a las pruebas realizadas durante los meses de octubre y noviembre, con el fin de entender la sinergia entre radiación y la temperatura del agua, se llenaron 16 botellas de plástico con agua de lluvia almacenada en Pie de Gallo el jueves 5 de diciembre de 2013. Al día siguiente, todas se colocaron sobre el techo de lámina galvanizada del estacionamiento del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y cada media hora se removi6 una de las botellas del mismo. Posteriormente, se obtuvo la temperatura, conductividad, pH y análisis microbiológico.

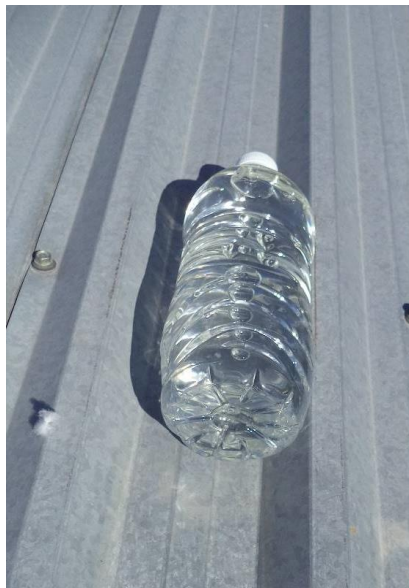


Figura 3-4. Fotografía de botella colocada sobre lámina acanalada.

Los resultados de esta sección se presentan comparándolos con los valores de radiación solar obtenidos de la interpolación de valores obtenidos con los piranómetros de las estaciones climatológicas existentes en la zona urbana de Querétaro.

3.2 Metodología final

3.2.1 Diseño de los componentes del sistema de desinfección solar

En base a los resultados obtenidos en la etapa previa, se identificó que la desinfección solar es el método viable para tratamiento y desinfección de agua de lluvia. Se consideraron dos componentes básicos para conformar el sistema de desinfección solar: pre-tratamiento (mediante filtración) y tratamiento (desinfección solar). El pre-tratamiento tiene el objetivo de remover sólidos suspendidos y eliminar color en el agua, mientras que el tratamiento busca reducir la carga patógena en el agua. El esquema propuesto que conforma lo anterior se presenta en la Figura 3-5.

En esta etapa se realizó el trabajo experimental que permitió realizar la propuesta del sistema del sistema de desinfección solar para el tratamiento de agua pluvial. El trabajo experimental que se describe a continuación se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, Campus Centro Universitario, de la Universidad Autónoma de Querétaro. Durante esta etapa se evaluaron diferentes materiales y métodos, los cuales se describen a continuación.



Figura 3-5. Esquema con la propuesta de los componentes a diseñar.

3.2.2 Pre-tratamiento: Filtro.

El objetivo era seleccionar el medio filtrante y las dimensiones del filtro (largo y ancho) que permitieran la remoción de sólidos suspendidos y eliminar el color del agua pluvial.

3.2.2.1 Elementos del Modelo Físico

El modelo físico consta de un sistema de carga constante construido a partir de los siguientes elementos: un tanque, una cubeta de entrada (ésta mantiene constante la carga de entrada al sistema), tubería de PVC y mangueras de conducción, contenedor para la media filtrante y cubetas para almacenar el

agua de salida. El sistema construido permite el retrolavado del medio filtrante posterior a cada prueba realizada.

3.2.2.2 Variables independientes

En esta etapa se evaluaron tres diferentes medios filtrantes a cargas constantes. Los medios filtrantes a evaluar fueron arena, carbón activado comercial y carbón activado fabricado en la UAQ. Asimismo los filtros se colocaron desde 0.5 m hasta 2 m de diferencia de altura, a intervalos de 0.5 m. La altura máxima fue seleccionada considerando las dimensiones de los tanques de ferrocemento instalados por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro en localidades del estado.

Obtención y preparación de los medios filtrantes

La arena utilizada se obtuvo de un banco de material local. Éste material fue cribado utilizando dos mallas, la primera de 1.25 mm y la segunda de 0.053 mm. Posteriormente, el material con diámetros entre 0.053 mm y 1.25 mm se enjuagó con el fin de limpiar y remover los finos del material. Finalmente, se dejó el material en una solución de hipoclorito de sodio durante 30 min, con el fin de desinfectarla. Posteriormente se enjuagó y puso a secar el material.

El carbón activado comercial se compró, por lo cual no requirió de alguna preparación previa al procedimiento descrito más adelante.

El carbón activado realizado en la UAQ, se creó a partir de cáscara de naranja. El procedimiento que se llevó a cabo para la generación del mismo consideró la investigación de Cobb *et al.* (2012) y se presenta a continuación:

1. Preparación y secado de las cáscaras de naranja.
 - a. Recolectar cáscara de naranja en comercios con venta de jugo.

- b. Limpiar la cáscara al remover el gabazo.
 - c. Cortar la cáscara y ponerla a secar al sol durante dos días.
2. Preparación de carbón
- a. Tarar el recipiente (Lata y tapa con un pequeño hoyo).
 - b. Pesar los trozos de cáscara de naranja seca.
 - c. Durante 4 horas dentro de una lata de aluminio con un pequeño hoyo en la misma, colocar la lata a fuego directo para generar el carbón.
 - d. Dejar enfriar el material.
 - e. Pesar el material.
 - f. Lavar el material (quitar la ceniza y dejar secar al sol) durante 1 día
 - g. Pesar el material seco.
3. Activación del carbón
- a. Hacer una disolución al 25% de cloruro de calcio. (disolver 1 gramo de cloruro de calcio anhidro por cada 3 gr ó ml de agua)
 - b. Meter en la disolución de cloruro de calcio, la cáscara de naranja calcinada (utilizar un vaso de precipitados). Dejar reposar por 24 horas.
 - c. Lavar la cáscara de naranja (después de las 24 horas).
 - d. Meter al horno a 100°C durante 3 horas.
 - e. Dejar enfriar y pesar el carbón activado obtenido.

Cabe destacar que previo a comenzar con la prueba se hizo una limpieza de la media filtrante al dejar fluir agua proveniente de la llave a través de la media filtrante hasta obtener una turbidez constante medida con 15 minutos de diferencia.

3.2.2.3 Sistema de medición y obtención de datos

Las variables dependientes del experimento son turbidez, color y caudal. A continuación se describe la forma en que se obtuvieron los datos de cada una de ellas a lo largo de las 4 horas de la prueba y los instrumentos utilizados.

La toma de muestra de entrada se realizó en el desfogue de la cubeta que mantiene la carga constante en el sistema utilizando el procedimiento descrito por la NOM-014-SSA1-1993, se realizaron tres muestreos y análisis de la misma a lo largo de la prueba con fines de control. Asimismo, se realizó cada 15 minutos el muestreo del agua de salida de cada uno de los filtros acorde a la misma norma. Todos los análisis se hicieron por triplicado para cada parámetro.

Una vez realizado el muestreo se procedió a medir la turbidez en unidades nefelométricas de turbidez (UNT). Para lo cual se utilizó un turbidímetro portátil para la medición de esta variable acorde al procedimiento descrito por el proveedor. Posteriormente, se tomó el valor de color mediante un espectrofotómetro para la medición de esta variable acorde al procedimiento descrito en el manual del proveedor.

Para definir el caudal de salida, se toma tres veces el tiempo de llenado de una probeta de 500 ml. Mediante la fórmula $Q = V / t$, donde Q es el flujo (en litros por segundo), V es volumen (0.5 L) y t el tiempo de llenado (en segundos). Los tres flujos son promediados para obtener el flujo correspondiente.

Adicionalmente, se midió el potencial de hidrógeno (pH) al realizarse cada uno de los muestreos para medir color y turbidez, con el fin de llevar un control de dicha variable. Por último, se analizaron los sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos suspendidos totales (SST) a la mitad y al final de la prueba para relacionar color y turbidez con SDT y SST.

3.2.2.4 Cálculos de remoción de contaminantes

La remoción se entiende como la capacidad del medio filtrante para eliminar parte de la concentración de contaminantes que se encuentra en el agua

pluvial. La efectividad de remoción de contaminantes de cada medio es un porcentaje que se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Remoción (\%)} = ((C_i - C_f) \times 100) / C_i \quad (3-1)$$

Dónde, C_i es la concentración inicial y C_f es la concentración final.

Asimismo, se grafica el caudal contra el cambio de carga con el fin de obtener la conductividad hidráulica del medio filtrante.

3.2.3 Tratamiento: Desinfección solar.

La desinfección solar constó de dos diseños de experimentos diferentes que se evaluaron de manera simultánea durante cuatro días por un periodo de 8 horas. Pese a las diferencias entre los experimentos, las variables dependientes de cada uno descritos en el sistema de medición y la obtención de datos aplican para ambos.

El primer diseño de experimentos buscó evaluar la carga patógena presente en el agua al aumentar la temperatura de la misma utilizando diferentes materiales. Esto implicó el uso de sistemas de tuberías para únicamente evaluar el cambio de temperatura.

El segundo diseño de experimentos tuvo como objetivo evaluar la carga patógena presente en el agua con la aplicación de radiación directa. De manera que en este experimento se busca entender la relación sinérgica existente entre el aumento de temperatura y radiación UV-A para la remoción de la carga patógena presente en agua de lluvia.

3.2.3.1 Evaluación del aumento de la temperatura.

Modelo Físico

El modelo físico para consta de tres juegos de un arreglo de tubería de cobre de $\frac{1}{2}$ pulgada, un arreglo de tubería de cobre de $\frac{1}{2}$ pulgada pintada de color negro, un arreglo de tubería de cobre de $\frac{3}{4}$ de pulgada y un arreglo de manguera rígida. El arreglo seleccionado se obtuvo al identificar la cantidad de agua necesaria para realizar los muestreos a lo largo de las 8 horas de duración del experimento. A cada uno de los arreglos de tubería de cobre se le colocó una lámina galvanizada en la parte posterior que tiene la función de un colector solar (Amin y Han, 2009b). Cada juego de tuberías se colocó de sobre una tabla de triplay inclinada a 31 grados con respecto a la horizontal apuntando al sur, siguiendo las recomendaciones de la investigación realizada por Bériz y Álvarez (2008). Los arreglos se tienen por triplicado con el fin de evaluar los resultados para tres muestras de agua diferentes que se describen en la sección siguiente.

Variables independientes

Las variables independientes a evaluar propias de este diseño de experimentos fueron el color de las tuberías y material de las mismas. Adicional a esto, las variables del ambiente que se midieron y tienen un efecto sobre los resultados del experimento son la temperatura ambiente y radiación solar.

3.2.3.2 Evaluación del efecto de la radiación solar.

Modelo Físico

El modelo físico para consta de cuatro pares de canales de un metro de longitud hechos con PVC cédula 40 de dos pulgadas de diámetro instalados en dos cajones diferentes de madera con cubierta de vidrio y colocados de manera horizontal. Cada canal del par es diferente, el primero es de color blanco y el segundo se pintaron sus paredes con pintura epóxica de color negro; cabe destacar que a cada uno de ellos se le colocan hasta un litro de muestra de agua. Se cuentan con cuatro pares de canales con el fin de evaluar los resultados para tres muestras de agua diferentes que se describen en la sección siguiente; y el cuarto par tiene agua de lluvia pero se coloca sobre el vidrio papel aluminio para inhibir la radiación UV-A y poder medir únicamente el efecto de la temperatura sobre la remoción de coliformes totales (Amin y Han, 2009a).

Variables independientes

Las variables independientes a evaluar propias de este diseño de experimentos fueron el color de las tuberías y fenoles. Adicional a esto, las variables del ambiente que se midieron y tienen un efecto sobre los resultados del experimento son la temperatura ambiente y radiación solar.

3.2.3.3 Obtención y preparación del agua a evaluar.

Cada uno de los modelos físicos se evaluó con tres muestras de agua. La primera fue agua de lluvia, la segunda fue una dilución de agua de lluvia y agua residual tratada y la tercera fue agua destilada. Estas muestras se seleccionaron con el fin de poder medir la efectividad de remoción de coliformes totales para

cada diseño experimental ya que se mide la efectividad para condiciones naturales (agua de lluvia), para un caso extremo (dilución de agua residual tratada con agua de lluvia) y se toma un control o blanco (agua destilada). A continuación se describe cómo se obtuvo cada una de las muestras.

El agua de lluvia se obtuvo de la cisterna instalada entre el edificio B y C, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro Campus Centro Universitario.

La segunda muestra de agua se generó un día previo al experimento realizado colocando 0.5 litros de agua de residual tratada de plantas de tratamiento del estado de Querétaro (se utilizó agua de la planta de tratamiento de Cadereyta así como de la planta de tratamiento de la UAQ Campus Aeropuerto) por cada 9.5 litros de agua de lluvia.

El agua destilada se utilizada provino de garrafas en presentación de 20 L de la marca JT Baker.

Cabe destacar que previo a comenzar con la prueba se colocaron ocho horas (8 am a 4 pm) las tuberías y canales con agua destilada, con el fin de realizar una desinfección previa de las tuberías utilizando el método a probar.

3.2.3.4 Sistema de medición y obtención de datos

Las variables dependientes del experimento fueron temperatura del agua, coliformes totales y fenoles (únicamente para el segundo diseño de experimentos). Estas variables se obtuvieron de la siguiente manera.

La temperatura del agua se monitoreó cada hora a través de mediciones puntuales de termistores LM35 colocados en las tuberías de agua. Se utilizó una

coliformes totales y coliformes fecales. Con el fin de corroborar los resultados obtenidos.

Adicional a esto, se midieron las variables de turbidez, pH, radiación solar y temperatura ambiente con el fin de tener un control de las condiciones bajo las cuales se realizó el experimento. La turbidez y pH se realizaron como se describe en el modelo experimental anterior, las mediciones se realizaron a las 0, 4 y 8 horas a lo largo del experimento. La radiación solar se obtiene de las lecturas del piranómetro ubicado en la estación meteorológica de la UAQ Campus Centro Universitario, cada hora y la temperatura ambiente se toma tanto de los datos de la estación meteorológica, así como de un termistor, LM35 localizado en el área de la prueba.

3.2.3.5 Cálculos de remoción de contaminantes

La remoción se entiende como la capacidad del tratamiento para eliminar parte de la concentración de contaminantes que se encuentra en el agua pluvial. La efectividad de remoción de contaminantes es un porcentaje calculado con la fórmula:

$$\text{Remoción (\%)} = ((C_i - C_f) \times 100) / C_i \quad (3-2)$$

Dónde, C_i es la concentración inicial y C_f es la concentración final del contaminante a evaluar.

Para este experimento se grafica la temperatura del agua con respecto a la remoción de coliformes totales para el primer diseño experimental presentado en esta sección, así como la radiación y temperatura del agua con respecto a la remoción de coliformes totales para el segundo diseño experimental.

Cálculo de nubosidad.

La nubosidad se define por la Agencia Estatal de Meteorología española como “la fracción de cielo cubierto de nubes de un cierto género, de una cierta especie, de una cierta variedad, de una cierta capa o de una combinación de nubes.” Ésta se mide en octavos y se determina el índice de nubosidad presente a lo largo de la prueba realizada con el fin de comprender si hay un mayor potencial de remoción en la carga patógena con respecto a las condiciones climáticas puntuales de la prueba. El procedimiento seguido es el descrito por Mobayed (2013).

Propuesta de un prototipo.

Con base en resultados obtenidos se realiza una propuesta de dimensiones, longitudes y materiales que conformarán el prototipo. La propuesta de tiempo de retención del sistema de desinfección solar se hizo con base en un balance térmico. Para lo cual se determinó la temperatura y la radiación para el cual se hará el diseño correspondiente, y posteriormente se revisaron entradas contra salidas para obtener los resultados correspondientes.

3.3 Potencial de aplicación del prototipo del sistema de desinfección solar en comunidades rurales del Estado de Querétaro.

Esta etapa de la tesis consiste en realizar una evaluación multicriterio (EMC), esto es un conjunto de técnicas para seleccionar, rechazar o jerarquizar un número de alternativas partiendo de múltiples criterios y objetivos en conflicto

(Voogd, 1983; Colson y De Bruin, 1989; Janssen y Rietveld, 1990; citados por Gómez y Barredo, 2006). La EMC que se realizó utiliza sistemas de información geográficos (SIG) para llevar a cabo procedimientos espaciales y temáticos simultáneos de análisis. Por lo cual se utilizará la plataforma ArcGIS, un SIG creado por ESRI (Environmental Systems Research Institute), la cual permite trabajar diversas capas de información referenciada geográficamente.

El objetivo a cubrir es identificar las comunidades rurales del estado de Querétaro dónde puede ser viable la implementación social de sistemas de captación y los métodos de tratamiento aquí planteados.

Para cumplir con este objetivo, la EMC se utilizó la información existente de diversas fuentes como el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), la Gerencia de Energías No Convencionales, Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). De cada una de estas fuentes se obtuvo información tabular estadística de las localidades del estado de Querétaro con menos de 2500 habitantes actualizada al censo de población del 2010 y en formato vectorial (extensión *shape*) la ubicación geográfica de las mismas, los valores puntuales (por localidad) de la Irradiación Solar Global publicados en el Explorador de Recursos Renovables (2010), las precipitaciones normales de las estaciones ubicadas en Querétaro y a 10 km del límite estatal para el periodo 1981 – 2010, así como los días de lluvia en promedio por año y de manera tabular el índice de marginación calculado por CONAPO en el 2010, respectivamente.

Con base en esta información, se definen las alternativas a evaluar. Éstas se conforman de localidades rurales del estado de Querétaro con menos de 2500 habitantes (criterio adaptado desde el Censo de Población de 1970 por el INEGI para definir una localidad rural) con ninguna vivienda particular habitada con agua entubada dentro de la vivienda o en el terreno de la misma. Asimismo, se

consideran localidades con más de 3 viviendas habitadas, ya que debido al principio de confidencialidad que marca la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, el INEGI no genera información para unidades geográficas que tienen menos de tres viviendas.

Cada alternativa se evalúa en base a cinco criterios sociales (número de habitantes por localidad, número de habitantes promedio por vivienda, índice de marginación, red pública de agua potable disponible y presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales) y tres criterios climatológicos (PMA, número de días con lluvia en el año y radiación solar global), Como se puede observar no se considera ninguna variable directamente relacionada con la instalación de biofiltros, debido a que el medio filtrante es arena, misma que se vende en conjunto con el material de construcción, por tanto, se asume se puede comprar o está disponible y es de fácil acceso a lo largo del estado. Posteriormente, se obtienen los valores de cada uno de los ocho criterios para cada una de las alternativas o localidades. Estos valores se estandarizaron a una escala de valores entre cero y uno para la presente investigación. La estandarización de los valores de cada criterio se hizo mediante funciones de transformación o mediante la asignación de un valor adimensional. Se utilizaron asignación de valores adimensionales para los criterios de índice de marginación (ver Cuadro 3-7), red pública de agua potable disponible, presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales y precipitación media anual. El criterio de red pública de agua potable disponible se obtiene del censo de población y vivienda, con esta información se busca favorecer a las localidades en donde no hay identificada una red pública de agua potable (valor de 1); por otro lado, con el criterio de presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales se identifican las localidades con centro de salud y/o escuelas (preescolar, primaria, secundaria y preparatoria); cabe destacar que para ambos criterios, las localidades cuya

información no está disponible se definió un valor de 0.5. Con el criterio de precipitación media anual, se buscó favorecer a las regiones que presentan una menor precipitación media anual considerando que es ahí donde las necesidades de agua potable son mayores, éstos se muestran en el Cuadro 3-8, cabe destacar que no hay una base técnica que sustente los valores mostrados en la misma.

Cuadro 3-7. Valores estandarizados para el criterio: Índice de Marginación para propósitos de la EMC.

Índice de marginación (Clasificación CONAPO)	Valor
Muy alto	1
Alto	0.75
Medio	0.5
Bajo	0.25
Muy Bajo	0

Cuadro 3-8. Valores estandarizados para el criterio: PMA para propósitos de la EMC.

Rango de PMA	Valor
250 a 500 mm	1
500 a 750 mm	0.8
750 a 1000 mm	0.6
250 a 500 mm	0.4
250 a 500 mm	0.2

Por otro lado, se utilizaron funciones de transformación para el resto de los criterios favoreciendo las localidades con más habitantes, mayor número de habitantes promedio (considerando que la inversión se realizará por vivienda y esto representará beneficiar a una mayor población con una menor inversión), mayor número de días promedio con lluvia y mayor radiación solar diaria. La función de transformación que se utilizó para obtener la escala normalizada de 0 a 1 de cada uno de los criterios se muestra a continuación.

$$m_i = \frac{x_i - \min.x_i}{\max.x_i - \min.x_i} \quad (3-3)$$

Dónde, m_i es el valor estandarizado del criterio de priorización i , x_i es el valor a estandarizar, $\min.x_i$ es el valor mínimo de dicho criterio y $\max.x_i$ es el valor máximo del mismo. (Barba-Romero y Pomerol, 1997; citado por Gómez y Barredo, 2006).

Posteriormente, se definió el factor de ponderación (w_j) para cada criterio, con el fin de poder integrar el modelo de decisión para la presente investigación. Para esto se utilizó el método de comparación de pares de Saaty propuesto en 1977, también conocida como la ponderación eigen-pesos por pares. Para lo cual, se hizo una matriz cuadrada de comparación por pares de los siete factores (ver Cuadro 3-9) y en esta matriz se asignó en cada celda un juicio de valor (a_{ij}), que representa la importancia relativa de cada factor en la columna principal (i) con otros de la fila principal (j). La escala de medida para la asignación de juicios de valor (a_{ij}), es una escala del tipo continuo (ratios o razón) que va desde un valor mínimo de 1/9 hasta 9 (Saaty, 1977, 1980; citado por Gómez y Barredo, 2006) y se muestra a continuación.

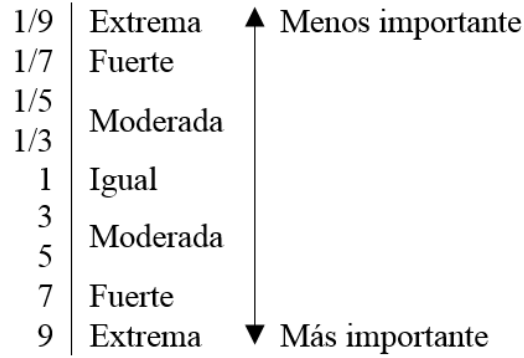


Figura 3-7. Escala de medida para asignar juicios de valor.

Asimismo, en la diagonal solamente se asignaron valores de uno, denotando la igualdad en la comparación de cada factor consigo mismo, ver Cuadro 3-9.

Una vez asignados los juicios de valor, se calculó el eigenvector principal de la matriz y posteriormente se normalizó para obtener los factores de ponderación (w_j) para cada criterio. Para obtener el eigenvector principal de la matriz, primero se normalizaron los valores al obtener el cociente entre cada valor y el valor de la sumatoria de cada columna. Posteriormente, los valores normalizados se sumaron por filas obteniendo así el eigenvector principal. Finalmente, se normalizó el vector principal dividiendo entre el número de factores obteniendo así el eigenvector principal normalizado que representa los pesos (w_j) de cada criterio.

Cuadro 3-9. Matriz de comparación por pares.

FACTOR	HL	HV	IM	RP	IA	PM	DL	RS
HL	1	2	1/3	3	3	1/3	1	1
HV	½	1	1/5	2	2	1/5	1/2	1/2
IM	3	5	1	5	5	1	3	2
RP	1/3	½	1/5	1	1	1/4	½	½
IA	1/3	½	1/5	1	1	1/5	1/3	1/3
PM	3	5	1	4	5	1	3	2
DL	1	2	1/3	2	3	1/3	1	1
RS	1	2	1/3	2	3	1/2	1	1

Definición de variables: HL = número de habitantes por localidad, HV = número de habitantes promedio por vivienda, IM = índice de marginación, RP = red pública de agua potable disponible, IA = presencia de instituciones para apoyar la implementación social, PM = precipitación media anual, DL = número de días con lluvia en el año y RS = radiación solar.

Una vez hecho esto, se calculó la consistencia mediante la razón de consistencia (c.r.), ver la ecuación siguiente.

$$c.r. = c.i./r.i. \quad (3-4)$$

Dónde, *c.i.* es el índice de consistencia, el cual se obtuvo de la siguiente manera: $c.i. = (\lambda_{MAX} - n)/(n - 1)$, siendo λ_{MAX} el valor del eigenvector máximo, obtenido a partir del producto del eigenvector principal normalizado por la matriz de comparación de factores; y *n* el número de factores en la matriz de comparación. Por otra parte, *r.i.* es el índice aleatorio (ver valores en el Cuadro 3-10), el cual representa el índice de consistencia de una matriz recíproca generada aleatoriamente a partir de la escala presentada en la Figura 3-7. Por lo cual, el índice aleatorio que acorde a Alonso y Lamata (2006), ver Cuadro 3-10, es

de 1.4056 para $n = 8$. Fue necesario asegurar un valor de índice de consistencia menor a 0.1 el cual indica que los juicios de valor asignados son satisfactorios.

Cuadro 3-10. Índice aleatorio ($r.i.$) (Alonso y Lamata, 2006)

n	$r.i.$
5	1.1086
6	1.2479
7	1.3417
8	1.4056
9	1.4499
10	1.4854

Por último, las alternativas fueron ponderadas, de acuerdo al modelo general de capacidad definido en la ecuación 3 y se generó un mapa con los resultados correspondientes, colocando la jerarquización de las comunidades aptas para la implementación de los sistemas de potabilización de agua captada con los colores verde, amarillo y rojas, dividiendo el total de localidades entre cada clase.

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \quad (3-5)$$

Dónde, r_i son los valores de capacidad de cada alternativa, w_j es el factor de ponderación para cada criterio j , x_{ij} son las alternativas valoradas en base al criterio j y n es el número de criterios involucrados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos en cada una de las etapas que formaron parte de la presente investigación, asimismo, en cada una de la misma se hará la discusión correspondiente de los mismos.

4.1 Resultados preliminares.

4.1.1 Selección del sitio y análisis de calidad de agua.

Se realizaron dos muestreos y su respectivo análisis de límites permisibles de contaminantes en laboratorio al agua almacenada en la cisterna de ferrocemento de Pie de Gallo, así como un muestreo y su respectivo análisis de límites permisibles de contaminantes en laboratorio al agua almacenada en las cisternas de ferrocemento de las localidades de México Lindo, La Fuente y San Antonio de la Cal. En el siguiente cuadro se muestran los resultados obtenidos, así como los límites permisibles estipulados en la MODIFICACIÓN a la NOM-127-SSA1-1994 la cual establece los límites permisibles de las diferentes características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua para uso y consumo humano; adicional y la NOM-041-SSA1-1993 sobre las especificaciones sanitarias para el agua envasada.

Cuadro 4-1. Tabla comparativa de límites permisibles contra concentración de contaminantes obtenidos de las muestras de agua de lluvia almacenadas en cisternas de ferrocemento.

Característica *	NOM-127	NOM-041	Pie de Gallo (7-nov-2013)	San Antonio de la cal (12-nov-2013)	La Fuente (12-nov-2013)	México Lindo (12-nov-2013)
Características microbiológicas						
Organismos Coliformes totales (NMP/100 ml)	no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 ml	no detectables**	12	540	920	> 2,400
Organismos coliformes fecales E. Coli (NMP/100 ml)	no debe contener en ninguna muestra de 100 ml		2.2 < LC	8 < LC	17 < LC	920 < LC
Características físicas y organolépticas						
Color (UCV en escala de platino cobalto)	20	15	90	5	2.5	65
Características químicas						
Cadmio	0.005	0.005	< LC	< LC	< LC	< LC
Cloro residual libre	0.2 – 1.5	0.1 (tiempo de contacto mínimo de 30 min)	< LC	< LC	< LC	< LC
Cloruros como Cl ⁻	250	250	1.39	<LC	1.39	1.5
Cobre	2		< LC	< LC	< LC	< LC
Cromo total	0.05		< LC	< LC	< LC	< LC
Dureza total (como CaCO ₃)	500	200	20.34	20.34	10.65	59.08
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3		< LC	< LC	< LC	< LC
Hierro	0.3	0.3	< LC	< LC	< LC	< LC
Fluoruros (como F ⁻)	1.5		0.12	0.27	0.29	0.48
Manganeso	0.15	0.05	< LC	< LC	< LC	< LC

Característica *	NOM-127	NOM-041	Pie de Gallo (7-nov-2013)	San Antonio de la Cal (12-nov-2013)	La Fuente (12-nov-2013)	México Lindo (12-nov-2013)
Mercurio	0.001		< LC	< LC	< LC	< LC
Nitratos (como N)	10	10	10.81	< LC	< LC	< LC
Nitritos (como N)	1	0.05	< LC	< LC	< LC	< LC
pH ó potencial de hidrógeno	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	7.96	8.02	8.5	7.55
Plomo	0.01		< LC	< LC	< LC	< LC
Sodio	200		9.4	<LC	6.52	9.17
Sólidos disueltos totales (SDT)	1000	500	60	34	78	170
Sulfatos (como SO ₄ ⁻)	400	250	8.06	8.07	7.07	217
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.5	0.5	< LC	< LC	< LC	< LC
Zinc	5	3	< LC	< LC	< LC	< LC

* Unidades de todas las características partes por millón (ppm = 1 mg/L), a menos que se especifique lo contrario. Algunos acrónimos que encontrarás para otras unidades son: UCV = Unidades de color verdadero y UTN = Unidades de turbiedad nefelométricas.

** Técnica del número más probable.

Como se puede observar, de las muestras analizadas en noviembre, para Pie de Gallo se muestra que tanto las características microbiológicas, como nitratos y color, la muestra está fuera de los límites permisibles. Los resultados de los análisis de La Fuente y San Antonio de la Cal, realizados en noviembre indican que únicamente las características microbiológicas se encuentran fuera de rango. Por último, México Lindo arroja valores fuera del límite de contaminantes permitidos por la norma tanto para las características microbiológicas como color.

4.1.2 Biofiltración como alternativa para la desinfección de agua pluvial.

Como se menciona en la metodología, se tienen identificadas cuatro escuelas en donde se implementó el Proyecto “Ecotecnias Escolares”. Basándose en la información descrita de cada comunidad en el capítulo anterior, un recorrido a las escuelas y considerando la cercanía a la Zona Urbana de Querétaro, se seleccionó la Secundaria República de Argentina localizada en la localidad de Pie de Gallo, Querétaro. En esta telesecundaria se instalaron los tres biofiltros y se obtuvo agua para las primeras pruebas de desinfección solar.



Figura 4-1. Cisterna de ferrocemento y biofiltro localizados en Pie de Gallo, Querétaro (fotografía tomada el 1 de agosto de 2013).

El primer biofiltro de arena se instaló el jueves 1 de agosto de 2013, en la Secundaria República de Argentina. De éste se obtuvieron los datos de flujo en los primeros quince días su implementación y se identificó la formación de larvas en el espejo de agua en la superior del mismo. El día 16 de agosto de 2013, se encontró vandalizado, por lo cual se reubicó a un almacén dentro de la Secundaria República de Argentina comenzando nuevamente su funcionamiento.



Figura 4-2. Fotografía de biofiltro instalado tras su reubicación.

El biofiltro de arena se reubicó el día 27 de agosto de 2013 con apoyo del grupo “C” de segundo grado de la Secundaria República de Argentina, comenzando a funcionar el 28 de agosto del mismo año. Se identificó la formación de larvas nuevamente, por lo cual se removieron y se colocó una bolsa de plástico en la parte superior del mismo, funcionando como tapa a partir del 9 de septiembre de 2013.

El segundo biofiltro de arena con tezontle se instaló el 17 de septiembre de 2013, con el grupo “C” de tercer grado de la secundaria República de Argentina. Empezando a funcionar el día: 22 de septiembre de 2013. Desde un inicio se colocó la bolsa de plástico en la parte superior del mismo.

Finalmente, se instaló un tercer biofiltro de arena el día 7 de noviembre de 2013. Éste comenzó su funcionamiento el 14 de noviembre de 2013 y nos arroja resultados sobre los primeros 30 días.



Figura 4-3. Fotografía de los biofiltros 2 y 3 instalados.

De acuerdo a las mediciones realizadas se identifica que el menor flujo de operación de los biofiltros se registró, aproximadamente, cuando el recuento de organismos empieza a ser 0. Esto mismo se identificó para la variable de turbidez de salida de los filtros; es decir, la turbidez de salida es menos cuando el recuento de microorganismos empieza a ser 0. El pH de las muestras tomadas varió entre 6 y 8 desde el periodo entre octubre y diciembre del 2013. Se identificó que tras un periodo de estiaje mayor, el pH incrementa. La conductividad del agua de lluvia fue en promedio 90 S/cm. Cabe destacar que no hubo recuento de *E. coli* en ninguna de las muestras de agua de lluvia.

El día 7 de noviembre de 2013 se realizó un muestreo y su respectivo análisis de la muestra en laboratorio. Éste nos arrojó los resultados que se muestran en el cuadro siguiente.

Cuadro 4-2. Tabla comparativa de límites permisibles contra concentración de contaminantes obtenidos de las muestras de agua de lluvia de Pie de Gallo y de los biofiltros instalados. Fecha de toma de muestra: 7 de noviembre de 2013.

Característica	NOM-127	NOM-041	Agua Lluvia	Biofiltro de Arena	Biofiltro de Tezontle
Características microbiológicas					
Organismos Coliformes totales (NMP/100 ml)	no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 ml	no detectables**	12	< LC	2
Organismos coliformes fecales (NMP/100 ml)	no debe contener en ninguna muestra de 100 ml		2.2	< LC	1.1
E. Coli (NMP/100 ml)			<LC	< LC	<LC
Características físicas y organolépticas					
Color (UCV en escala de platino cobalto)	20	15	90	80	70
Características químicas					
Cadmio	0.005	0.005	<LC	<LC	<LC
Cianuros (como CN-)	0.07				
Cloro residual libre	0.2 – 1.5	0.1 (tiempo de contacto mínimo de 30 min)	<LC	<LC	<LC
Cloruros como Cl ⁻	250	250	1.39	<LC	1.39
Cobre	2	<LC	<LC	<LC	<LC
Cromo total	0.05	<LC	<LC	<LC	<LC
Dureza total (como CaCO ₃)	500	200	20.34	31.96	30.02
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3		<LC	<LC	<LC
Hierro	0.3	0.3	<LC	<LC	<LC

Característica	NOM-127	NOM-041	Agua Lluvia	Biofiltro de Arena	Biofiltro de Tezontle
Fluoruros (como F-)	1.5		0.12	0.12	0.21
Manganeso	0.15	0.05	<LC	<LC	<LC
Mercurio	0.001		<LC	<LC	<LC
Nitratos (como N)	10	10	10.81	3.55	4.1
Nitritos (como N)	1	0.05	<LC	<LC	<LC
pH ó potencial de hidrógeno	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	7.96	7.61	7.79
Plomo	0.01		<LC	<LC	<LC
Sodio	200		9.4	<LC	5.74
Sólidos disueltos totales (SDT)	1000	500	60	88	110
Sulfatos (como SO ₄ ⁻)	400	250	8.06	4.73	51
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.5	0.5	<LC	<LC	<LC
Zinc	5	3	<LC	<LC	<LC

* ppm = partes por millón; UCV = Unidades de color verdadero ; UTN = Unidades de turbiedad nefelométricas; 1 ppm = 1 mg/l; µg/l

** Técnica del número más probable

Los resultados el análisis nos indican que el agua filtrada mediante el biofiltro de arena y los obtenidos de la desinfección solar cumplen con 25 de los 26 características analizadas, debido al color que tiene el agua, ambos no cumplen con las características analizadas de la NOM-127-SSA1-1994. Asimismo, cabe destacar que hay 22 características que no fueron analizadas debido agua pluvial es la fuente de la misma, entre las cuales se encuentran plaguicidas, características radiactivas e hidrocarburos aromáticos

4.1.3 Resultados de las pruebas del método de desinfección solar

Se colocaron botellas de agua de 1.5 L y 1 L sobre el techo de lámina galvanizada del estacionamiento del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería los días 3, 8, 25 y 29 de octubre. Además de colocar dos botellas de agua de 1 L rellena con agua pluvial almacenada en la localidad de Pie de Gallo

sobre techo de concreto en Epigmenio González 513, Col. Real del Parque, el 2 de noviembre de 2013. Tras 8 horas de exposición a la luz solar todas las fechas antes mencionadas, los resultados indican ausencia de coliformes totales, siendo el límite de concentración menor a 0.5 UFC/ml.

De igual manera, se tomó una muestra el 7 de noviembre de 2013, la cual se dejó durante 8 horas expuesta al sol. Posteriormente, las botellas de PET se llevaron el 9 de noviembre de 2013 a realizar análisis de laboratorio. Los resultados de los análisis se muestran a continuación.

Cuadro 4-3. Tabla comparativa de límites permisibles contra concentración de contaminantes obtenidos de las muestras de agua de lluvia de Pie de Gallo y desinfección solar. Fecha de toma de muestra: 7 de noviembre de 2013 y 9 de noviembre de 2013, respectivamente.

Característica	NOM-127	NOM-041	Agua Lluvia	Desinfección solar	LC	
Características microbiológicas						
Organismos totales (NMP/100 ml)	Coliformes	no deben ser detectables en ninguna muestra de 100 ml	no detectables**	12	< LC	1.1
Organismos fecales (NMP/100 ml)	coliformes	no debe contener en ninguna muestra de 100 ml		2.2	< LC	1.1
E. Coli			<LC	< LC	1.1	
Características físicas y organolépticas						
Color (UCV en escala de platino cobalto)	20	15	90	45		
Características químicas						
Cadmio	0.005	0.005	<LC	<LC	0.0013	
Cloro residual libre	0.2 – 1.5	0.1 (tiempo de contacto mínimo de 30 min)	<LC	<LC	0.04	
Cloruros como Cl ⁻	250	250	1.39	1.5	0.22	
Cobre	2		<LC	<LC	0.015	

Cromo total	0.05		<LC	<LC	0.015
Dureza total (como CaCO ₃)	500	200	20.34	16.46	
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3		<LC	<LC	0.008
Hierro (ppm)	0.3	0.3	<LC	<LC	0.3
Fluoruros (como F ⁻)	1.5		0.12	0.27	
Manganeso	0.15	0.05	<LC	<LC	0.21
Mercurio	0.001		<LC	<LC	0.001
Nitratos (como N)	10	10	10.81	3.78	
Nitritos (como N)	1	0.05	<LC	<LC	0.1
Nitrógeno amoniacal	0.5	0.5			0.04
pH ó potencial de hidrógeno	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	7.96	7.39	
Plomo	0.01		<LC	<LC	0.014
Sodio	200		9.4	2.53	0.1
Sólidos disueltos totales (SDT)	1000	500	60	72	
Sulfatos (como SO ₄ ⁻)	400	250	8.06	7.06	
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.5	0.5	<LC	<LC	0.005
Zinc	5	3	<LC	<LC	0.1

* ppm = partes por millón; UCV = Unidades de color verdadero ; UTN = Unidades de turbiedad nefelométricas; 1 ppm = 1 mg/l; µg/l

** Técnica del número más probable

Con base en los resultados de ausencia de coliformes totales y coliformes fecales tras 8 horas de exposición a la luz solar, de todas las muestras, se optó por realizar el procedimiento antes descrito en el capítulo de metodología, dónde el día 5 de diciembre de 2013 se colocan 16 botellas de 1 L con agua de lluvia y cada media hora comenzando a las 9:15 am, se mide la temperatura y se hace la inoculación de 1 ml de agua en la placa 3M, para realizar el recuento de coliformes totales. Ver Figura 4-4.



Figura 4-4. Fotografía de las botellas de PET transcurridas 4 horas de la prueba del 5 de diciembre de 2013.

Los resultados de la prueba indican que tras dos horas de exposición a la radiación solar ya no hay presencia de coliformes totales. La máxima temperatura alcanzada son 38.5°C , a las 14:45 hrs. Asimismo, en la Figura 4-5, se presenta la gráfica de radiación solar medida, indicando que con una radiación solar máxima de 468 W/m^2 y una radiación solar promedio de 221.38 W/m^2 , se puede realizar la desinfección solar de agua de lluvia. Sin embargo, esto es un dato puntual aplicable sólo para estas condiciones y habrá que analizar los datos medidos en más de un día a través de la repetición del experimento para poder sacar conclusiones válidas. De igual manera, se revisa la radiación solar medida contra la radiación de un día despejado, obtenida como una fracción de la radiación solar extraterrestre, ver Figura 4-5.

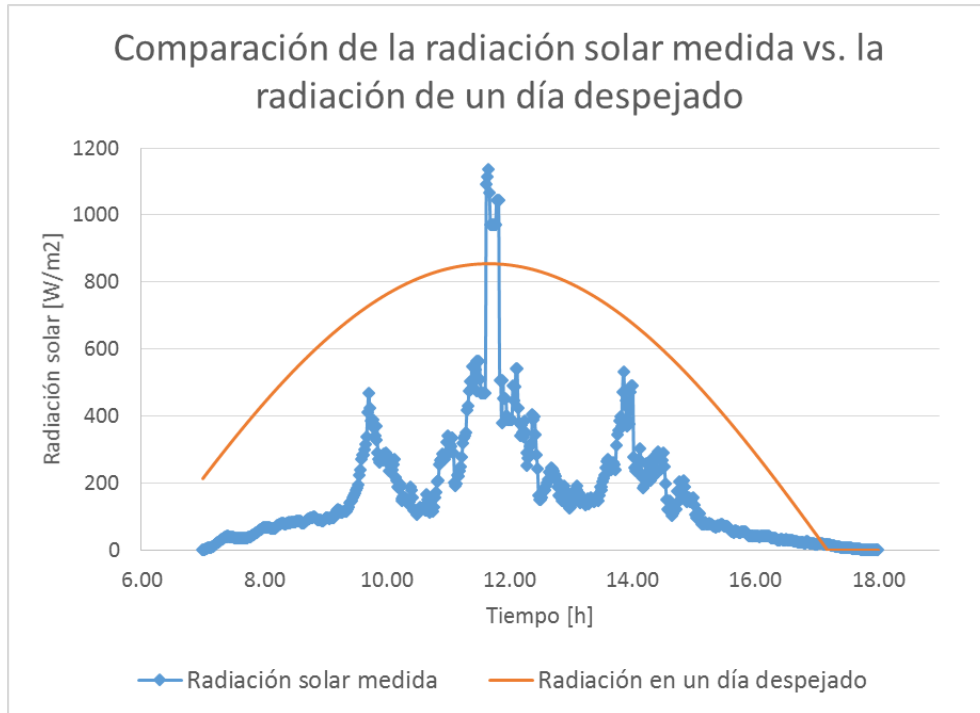


Figura 4-5. Gráfica de la radiación solar medida contra la radiación de un día despejado.

Esta gráfica nos indica que aún si tener la radiación total de un día despejado, se logra la desinfección solar. Sin embargo, la radiación solar medida fue mayor a la radiación de un día despejado, lo cual indica que la fracción utilizada de para obtener ésta última variable no es del todo correcta. Aun así observamos en la gráfica un comportamiento similar de ambas radiaciones, ya que el máximo medido y el máximo calculado se localizan a las 11:39 am.

4.2 Resultados con la propuesta final del sistema de desinfección solar.

4.2.1 Diseño de los componentes del sistema de desinfección solar

El diseño de los componentes se hizo en base a las secciones que se presentan a continuación, al final de cada una se hace la propuesta del componente correspondiente.

4.2.2 Pre-tratamiento: Filtro.

A partir de las cáscaras de naranja secas y pesadas, se obtiene un hay una eficiencia del 20.28% en peso de la producción de carbón activado, por lo cual se procede a realizar el carbón activado en base al procedimiento descrito en el capítulo anterior.

4.2.3 Tratamiento: Desinfección solar.

Se anexa la curva de calibración de los termistores LM35 así como las imágenes de los sistemas construidos para realizar las pruebas descritas en la metodología.

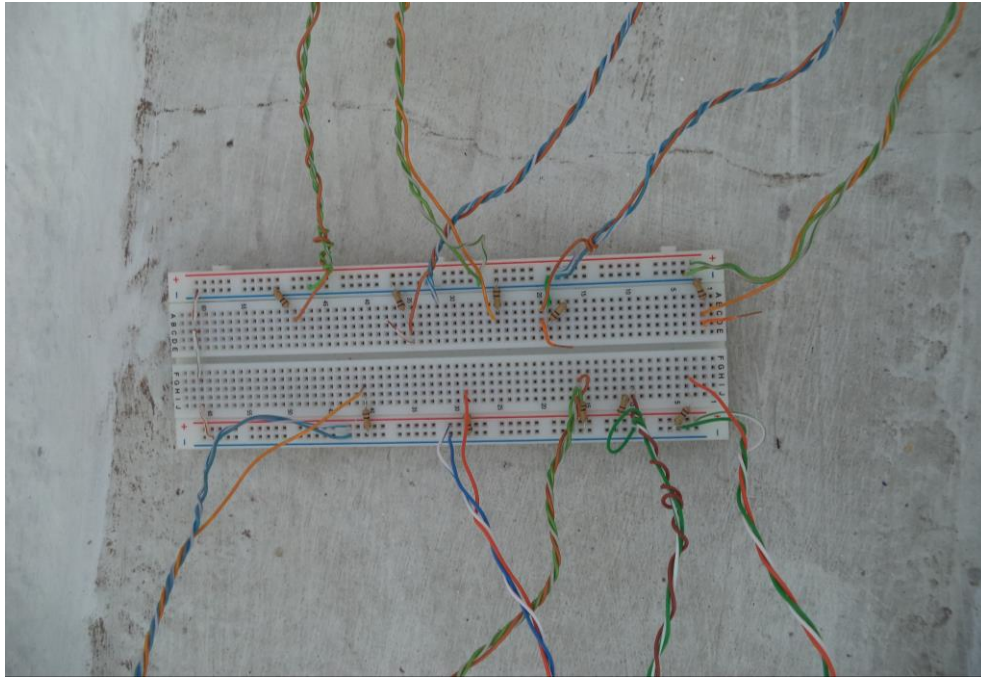


Figura 4-6. Protoboard con los sensores de LM35 instalados para la medición de la temperatura.



Figura 4-7. Modelo físico construido para evaluar aumento de la temperatura.



Figura 4-8. Modelo físico construido para evaluar el efecto de la radiación solar para desinfectar el agua pluvial.

4.3 Identificación del potencial de aplicación del prototipo del sistema de desinfección solar en comunidades rurales del Estado de Querétaro.

En el estado de Querétaro se tienen 2,637 localidades rurales de menos de 2500 habitantes. De las cuales 138 comunidades tienen más de 50 habitantes y no cuentan con agua potable en ninguna de sus viviendas, lo cual representa un total de 21,426 habitantes que no disponen de agua entubada dentro de la vivienda, o fuera de la vivienda pero dentro del terreno, por lo cual deben satisfacer su necesidad mediante suministro con redes públicas, pipas, pozos, ríos, arroyos, lagos u otro. Estas 138 comunidades representan las alternativas a jerarquizar, por lo cual para cada una se obtuvieron los valores correspondientes, los cuales se estandarizaron siguiendo los criterios y metodología descrita en la sección anterior.

Por otro lado se obtuvieron los factores de ponderación para cada uno de los criterios, los cuales se muestran en el Cuadro 4-4. La razón de consistencia asociada a dicha ponderación es de 0.014, es decir, es menor a 0.1 indicando que es consistente.

Una vez estandarizados los valores obtenidos y teniendo los factores de ponderación, procedemos a multiplicar ambas variables como nos indica la ecuación 3, la cual define el modelo general de capacidad. Esto nos arroja como resultado las 138 comunidades rurales en orden jerárquico las cuales se clasifican y muestran en la Figura 4-9. Cabe destacar que cuatro de las cinco localidades clasificadas como prioritarias se ubican en el municipio de Cadereyta de Montes y todas ellas se tienen un grado de marginación Muy Alto.

Cuadro 4-4. Factores de ponderación para cada criterio.

Criterio	w_j , Factor de ponderación
Número de habitantes por localidad	0.11
Número de habitantes promedio por vivienda	0.06
Índice de marginación	0.26
Red pública de agua potable disponible	0.05
Presencia de instituciones para apoyar la implementación social	0.04
Precipitación Media Anual	0.26
Número de días con lluvia en el año	0.1
Radiación solar	0.12

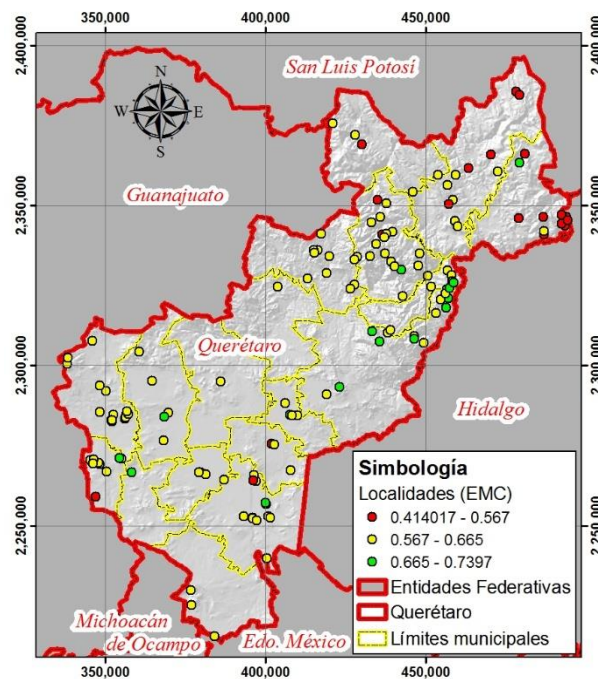


Figura 4-9. Mapa con los resultados de la evaluación multicriterio.

V. CONCLUSIONES

Los resultados y discusión de los mismos, los cuales se presentan en el capítulo anterior dan pauta para las conclusiones que se mencionan a continuación.

Los métodos de biofiltración y desinfección solar permiten la remoción de microorganismos patógenos presentes en el agua de lluvia, sin embargo, únicamente la desinfección es un método que permite obtener resultados replicables para la zona semi-árida de México, específicamente, la ciudad de Querétaro, en dónde se realizó esta investigación. Cabe destacar que la precipitación disponible en el 2013 fue de 505 mm, es decir, se obtuvo la precipitación media histórica.

Los análisis de agua de lluvia realizados en las localidades queretanas de Pie de Gallo, México Lindo, La Fuente y San Antonio de la Cal, ubicadas en los municipios de Querétaro, Colón, Tequisquiapan y Tolimán, respectivamente, nos indican que con un correcto mantenimiento del sistema de captación pluvial instalado, las características del agua que salen de la normatividad vigente son características microbiológicas, específicamente coliformes totales y fecales, así como su color. Lo cual justifica el utilizar el sistema de desinfección solar que se propone en la presente Tesis.

La biofiltración es un método que aún no ha sido automatizado y requiere de la constancia de las personas que lo utilizan. Éste, pese a ser un método simple, al no requerir de conocimiento especializado para su instalación y puesta en marcha, necesita constancia diaria por parte del usuario para agregar agua y evitar al tener la misma estancada dentro del filtro. De igual manera, el funcionamiento correcto del filtro depende de una operación correcta para lograr la formación de la biocapa, en la parte superior de la media filtrante.

La desinfección solar, desde las pruebas realizadas de manera rudimentaria (botellas de PET rellenas de agua de lluvia) durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, nos indican que es un método viable de desinfección de agua pluvial. Se identificó, a través de la revisión de la bibliografía y asesorías, que las botellas de PET pueden desprender fenoles, por lo cual, el sistema propuesto no utiliza éste material.

Debido a su efectividad en la remoción de coliformes totales y fecales, la desinfección solar es un tratamiento redituable para el agua pluvial. Sin embargo, el sistema propuesto aún no cubre las necesidades de la población, ya que este sistema arroja agua a más de 40° C. A esta temperatura no es viable el consumo inmediato del agua, por lo cual requiere permanecer almacenada durante una noche o adicionar un sistema de enfriamiento a la propuesta, resultado de la presente investigación.

En cuanto al potencial de aplicación del prototipo del sistema de desinfección solar en comunidades rurales del estado de Querétaro, se identificó que el índice de marginación es alto, ya que estamos en un 77.4 por ciento. De igual manera, se identifican 138 localidades con más de 50 habitantes y no cuentan con agua potable en ninguna de sus viviendas, lo cual representa un total de 21,426 habitantes que no disponen de agua entubada dentro de la vivienda, o fuera de la vivienda pero dentro del terreno. Al jerarquizar las mismas, se encuentra que el mayor potencial es en el Municipio de Cadereyta de Montes.

Por último, algunas recomendaciones y futuras líneas de investigación se mencionan a continuación.

Automatizar el proceso de sensado de la variable de temperatura para obtener una curva continua. Así como, automatizar el proceso del sistema de desinfección solar.

En un futuro, con los juegos de los componentes armados, se pueden utilizar para estudiar el funcionamiento de la desinfección de agua pluvial en diferentes localidades y durante periodos continuos. Es decir, se pueden poner a funcionar durante 30 días y evaluar los resultados obtenidos.

Estudiar la viabilidad de un sistema de desinfección solar como tratamiento o pos tratamiento de aguas residuales.

De igual manera se puede estudiar la capacidad de supervivencia de la biocapa en diferentes periodos de estiaje y aplicar este método para parcelas. Además de captar el agua de salida de parcelas de riego por gravedad para su posterior aprovechamiento y reuso.

VI. LITERATURA CITADA

- Ahammed, M. M. y V. Meera. 2006. Iron hydroxide-coated sand filter for household drinking water from roof-harvested rainwater. *Journal of Water Supply: Research & Technology – Aqua*. 55 (7-8): 493-498.
- Alonso, J.A. y M.T. Lamata. 2006. Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A New Approach. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 14 (4): 445-459.
- Alotaibi M. A. y W. Heaselgrave. 2011. Solar Disinfection of Water for Inactivation of Enteric Viruses and its Enhancement by Riboflavin. *Food Environ Virol*. 3: 70–73.
- Amin, M. T. y M. Y. Han. 2009. Roof-harvested rainwater for potable purposes: Application of solar collector disinfection (SOCO-DIS). *Water Res*. 43: 5225–5235.
- Amin, M. T. y M. Y. Han. 2011. Improvement of solar based rainwater disinfection by using lemon and vinegar as catalysts. *Desalination*. 276: 416-424.
- Anaya, M. y J. J. Martínez. 2007. Manual sobre sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano. 1ª ed. Colegio de Postgraduados, Estado de México, México.
- Bosshard, F., K. Riedel, T. Schneider, C. Geiser, M. Bucheli and T. Egli. 2010. Protein oxidation and aggregation in UVA-irradiated *Escherichia coli* cells as signs of accelerated cellular senescence. *Environ. Microbiol*. 1-15.
- Comisión Nacional del Agua. 2010. Atlas Digital del Agua, México 2012. Disponible en línea: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/index.html>
- Comisión Nacional del Agua. 2011. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Distrito Federal, México.
- CONAPO. 2012. Índice de marginación por localidad 2010. Disponible en línea: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010. Accesada el 13 de enero del 2013.

- Critchley, W. y K. Siegert. 1991. A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production. NR Department of the FAO, Roma, Italia. Disponible en línea: <http://www.fao.org/docrep/U3160E/U3160E00.htm>. Accesada el 28 sep. 2012.
- De la Vega E., S., Y. Tellez V. y J. López R. 2012. Índice de marginación por localidad 2010. Consejo Nacional de Población, México, D.F.
- Eastman, R. 2002. IDRISI Version 4.0 User's Guide. Clark University Graduate School of Geography, Worcester, MA.
- Elliott, M.A., C.E. Stauber, F. Koksall, F.A. DiGiano y M.D. Sobsey. 2008. Reductions of E. coli, echovirus type 12 and bacteriophages in a biosand filter. *Water Research*, 42 (10-11): 2662-2670.
- Gómez D., M., J. I. Barredo C. 2006. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. 2ª Ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.
- Gould J. y E. Nissen-Petersen. 1999. Rainwater Catchment Systems for Domestic Supply: Design, construction and implementation. 1ª ed. Intermediate Technology Publications, Warwick.
- INEGI. 2011. Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2010. México, D.F.
- Jordan, F.L., R. Seaman, J.J. Riley y M.R. Yoklic. 2008. Effective removal of microbial contamination from harvested rainwater using a simple point of use filtration and UV-disinfection device. *Urban Water J.* 5 (3): 209-218.
- Lantagnea, D., M. Klarmanb, A. Mayerc, K. Prestonc, J. Napotnikc y K. Jellisonc. 2010. Effect of production variables on microbiological removal in locally-produced ceramic filters for household water treatment. *Int. J. Environ. Health Res.* 20 (3): 171-187.
- López-Patiño, G., F. J. Martínez-Solano, V. S, Fuertes-Miquel y P. A. López-Jiménez. 2011. Dimensionado de depósitos domésticos de aguas pluviales utilizando series temporales de datos. *Tecnología y Ciencias del Agua.* 2 (1): 51-64.

Mani, S., Kanjur, R., Singh, I. y R. Reed. 2006. Comparative effectiveness of solar disinfection using small-scale batch reactors with reflective, absorptive and transmissive rear surfaces. *Water Research*, 40 (4): 721-727.

Noble, Niel. 2012. *Bio-sand Water Filters*. Practical Action. Reino Unido.

Noble, Niel. 2012. *SODIS – Solar Water Disinfection in Sri Lanka*. Practical Action. Reino Unido.

Secretaría de Salud. 1994. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-014-SSA1-1993 "PROCEDIMIENTOS SANITARIOS PARA EL MUESTREO DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PUBLICOS Y PRIVADOS". Disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/014ssa13.html>. Accesada el 10 oct. 2012.

Secretaría de Salud. 1994. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-041-SSA1-1993, BIENES Y SERVICIOS. AGUA PURIFICADA ENVASADA. ESPECIFICACIONES SANITARIAS. Disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/041ssa13.html>. Accesada el 10 oct. 2012.

Secretaría de Salud. 2000. MODIFICACION a la 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. Disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>. Accesada el 10 oct. 2012.

Servicio Meteorológico Nacional. 2012. *Climatología: Normales Climatológicas del periodo 1981-2010 y Estadística Descriptiva por estación*. Disponible en línea: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=177:queretaro&catid=14&Itemid=2. Accesada el 30 de octubre del 2013.

Solarte, Y., M. L. Salas, B. Sommer, C. Dierolf y M. Wegelin. 1997. Uso de la radiación solar (UV-A y temperatura) en la inactivación del *Vibrio cholerae* en agua para consumo humano. Factores que condicionan la eficiencia del proceso. *Colombia Médica*. 28 (003): 123-129.

Stavans, J. 2006. *The SOS Response of Bacteria to DNA Damage*. *Dynamics of Complex Interconnected Systems: Networks and Bioprocesses* NATO Science Series II. 232: 39-47.

- Vanderzwaag, J. C., J. W. Atwater, K. H. Bartlett, D. Baker. 2009. Field Evaluation of Long-Term Performance and Use of Biosand Filters in Posoltega, Nicaragua. *Water Qual. Res. J. Can.* 44 (2): 111-121.
- Van Halem, D., S. G. J. Heijman, A. I. A. Soppe, J. C. van Dijk y G. L. Amy. 2007. Ceramic silver-impregnated pot filters for household drinking water treatment in developing countries: material characterization and performance study. *Water Sci. Tech. Water Supply.* 7(5-6): 9-17.
- Villalvazo Peña, P, J. P. Corona Medina y S. García Mora. 2002. Urbano – Rural, constante búsqueda de fronteras conceptuales. *Notas. Revista de Información y Análisis.* 20: 17 – 24. INEGI, México D. F.

APÉNDICE

7.1 APÉNDICE 1: LISTADO DE ABREVIACIONES

- Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI)
- Conagua – Comisión Nacional del Agua
- INEGI – Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- Organización Mundial de la Salud (OMS)
- ONU – Organización de las Naciones Unidas.

7.2 APÉNDICE 2: Cálculo de la Nubosidad (Apuntes de clase)

Autor: Dr. Nabil Mobayed.

7.2.1 Ecuaciones generales

El efecto de la nubosidad, o índice de nubosidad, se puede expresar como octantes y es una relación entre la radiación solar medida en una estación meteorológica, contra la radiación en un día despejado. Esta última se estima como una fracción de la radiación extraterrestre y que, a falta de valores calibrados, se puede determinar como una fracción de la radiación solar extraterrestre, asociada con cierta hora del día (se entiende que del horario diurno).

La radiación dependerá de la ubicación geográfica de la estación y su elevación y se requiere hacer una corrección por el horario de verano a los valores obtenidos.