

POTABILIZACIÓN DE AGUA DE LLUVIA RODADA POR MEDIO DE FILTRACIÓN EN MÚLTIPLES ETAPAS MODIFICADA, MÉXICO

Sofía E. Garrido Hoyos ⁽¹⁾

Dra. En Ciencias Químicas, Universidad de Granada España. Especialista en Hidráulica, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México. Trabajos relacionados con el tratamiento del agua para uso y consumo humano, aguas residuales y/o aprovechamiento de lodos. Inscrita al Sistema Nacional de Investigadores nivel 1, CONACYT.



Martha Avilés Flores ⁽¹⁾

Maestría en Química en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Especialista en Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México.

Antonio Ramírez González ⁽¹⁾

Maestro en Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de México (UNAM), Especialista en Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México. Profesor y Coordinador de la Maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM, Campus Morelos.

Luis Ángel Barrera Morteo ⁽²⁾

Ingeniero Bioquímico, Instituto Tecnológico de Veracruz. Actualmente realiza la maestría en Ingeniería Ambiental en la Universidad Autónoma de México (UNAM) Campus-Morelos.

Arturo González Herrera ⁽¹⁾

Maestro en Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica de Madrid, España. Especialista en Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México.

Leticia Montellano Palacios ⁽¹⁾

Maestría en Administración, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Proyectos: Disposición final de los lodos producidos en la potabilización del agua, eliminación de precursores de trihalometanos mediante adsorción específica en minerales que contienen calcio, evaluación de plantas potabilizadoras.

Rosa María Ramírez Chávez ⁽³⁾

Ingeniero Civil, Universidad Autónoma de México (UNAM). Actualmente es profesora de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y realiza la maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM, Campus Morelos.

Octavio Cervantes Hernández ⁽⁴⁾

Maestro en Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de México (UNAM). Actualmente trabaja para el Gobierno del Estado de Michoacán, México en proyectos de construcción.

Dirección (1): Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550, México. Tel.: (+52) 777 3293662 - Fax: (+52) 777 3194381 - e-Mail: sgarrido@tlaloc.imta.mx.

Palabras claves: Agua de lluvia, tratamiento, filtración en múltiples etapas.

RESUMEN

En la zona norte del estado de Morelos se tienen serios problemas para el abastecimiento de agua para uso y consumo humano, derivados principalmente de las condiciones geográficas y del subsuelo que predomina en la zona, el cual está constituido por materiales permeables que hacen que el agua producto de la precipitación pluvial (800-2342 mm al año), se infiltre hasta capas impermeables que se encuentran a más de 500 metros de profundidad, lo que hace muy difícil y costosa la extracción del vital líquido. El objetivo de este proyecto fue desarrollar un sistema de captación y tratamiento de agua de lluvia a nivel domiciliario y colectivo en la zona norte del estado de Morelos. Teniendo en cuenta las limitaciones de infraestructura y la poca gestión en comunidades rurales no servidas por los sistemas centralizados de las grandes ciudades; se seleccionó, diseñó, desarrolló y evaluó a nivel piloto un sistema de tratamiento de filtración en múltiples etapas modificada (FIMEM) para tratar el agua de las ollas de la localidad, Villa Nicolás Zapata, municipio de Totolapan. Las eficiencias obtenidas en el sistema de tratamiento fueron: Color y Turbiedad >90%. Cabe destacar que el agua obtenida para uso y consumo humano cumple con la NOM-127-SSA1-1994. Para el caso de Jumiltepec, municipio de Ocuiltepec se diseñó y desarrolló un sistema de captación, conducción, almacenamiento y tratamiento (filtro de arena-grava) del agua de lluvia captada en el techo de la iglesia de la comunidad.

INTRODUCCIÓN

En muchos lugares del mundo con alta o media precipitación y en donde no se dispone de agua en cantidad y calidad necesaria para consumo humano, se recurre al agua de lluvia como fuente de abastecimiento. La captación y almacenamiento de agua de lluvia ha sido practicada por más de 4000 años. En el caso de México, las aguadas (depósitos artificiales), fueron utilizadas en tiempos precolombinos, para irrigar cultivos en áreas pequeñas. En zonas arqueológicas de la península de Yucatán, así como en Xochicalco, Mor., desde el año 300 a.C., se emplearon sistemas de captación, conocidos como *chultus*, los cuales tienen como función recolectar el agua de lluvia de los patios y conducirla mediante canales a depósitos construidos con piedra para ser usada posteriormente (Anaya, 2004). En muchos países alrededor del mundo como Tailandia, Japón, Taiwán, Corea, India, Colombia, Costa Rica, Haití, la captación de agua de lluvia es una fuente alterna para el suministro doméstico. En las Islas Vírgenes por Ley (Título 29, Sección 308, V. I.Code) las casas deben construir una azotea, o área de captación, que exceda de 8 m².

El promedio anual de precipitaciones (lluvias) para el territorio Mexicano es de 1500 kilómetros cúbicos de agua. Si se aprovechara el 3% de esa cantidad, se podría abastecer a 13 millones de mexicanos que actualmente no cuentan con agua potable; se darían dos riegos de auxilio a 18 millones de hectáreas de temporal; se abastecerían 50 millones de animales y se regarían 100 mil hectáreas de invernadero (Anaya, 2004).

La captación, tratamiento y aprovechamiento de agua de lluvia es una importante fuente de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, pecuario y agrícola para las comunidades rurales con población menor a 2500 habitantes, que presentan dificultades para su abastecimiento por su topografía, aislamiento, dispersión de caseríos o ausencia de fuentes de suministro, ya sean superficiales o subterráneas. Por lo tanto es una tecnología alternativa que ha cobrado relevancia en los últimos años impulsada por el concepto de desarrollo sustentable, basado en la orientación del cambio tecnológico para garantizar la satisfacción de las necesidades humanas presentes y futuras, con relación a los alimentos, agua, energía, etc. Las ventajas que presentan estas tecnologías son las siguientes:

- Alta calidad físico-química del agua de lluvia.
- Empleo de mano de obra y/o materiales locales.
- Escaso o nulo consumo de energía.
- Facilidad para su construcción, bajo mantenimiento y operación.
- Ahorro de tiempo al recolectar el agua de lluvia.

A su vez las desventajas son:

- Alto costo inicial que puede impedir su implementación por parte de las familias de bajo recursos económicos.
- La cantidad de agua captada depende de la precipitación del lugar y del área de captación.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema de captación y tratamiento de agua de lluvia a nivel domiciliario y colectivo en la zona norte del estado de Morelos.

ZONA DE ESTUDIO

El criterio de selección de las dos comunidades en estudio, fue con base en un diagnóstico poblacional, socioeconómico, infraestructura hidráulica y participación social, producto de la información existente y visitas realizadas a 18 comunidades situadas al norte del estado de Morelos (Figura 1), con una escasez importante de agua para uso y consumo humano, Tabla 1, (INEGI, 2000, CEAMA, 2001).



Figura 1. Estado de Morelos, municipios caso de estudio

Tabla. 1 Resultado del diagnóstico en las comunidades estudiadas.

Localidad	Habitantes (año 2000)	Índice de marginación	Precipitación media anual (mm)	Infraestructura hidráulica existente	Sistema de captación	Participación social
Jumiltepec (Ocuiltepec)	3704	-0.664 Medio	1110	Fuente de abastecimiento: pozo profundo y manantial. Dos cárcamos de bombeo y dos tanques de almacenamiento de 100 m ³ c/u. Cloración no existe. Redes de conducción y distribución en regular estado, 35 años.	Domiciliario	Excelente
Villa Nicolás Zapata (Totolapan)	293	-0.153 Alto	1150	No existe sistema de agua potable ni alcantarillado.	Colectivo	Buena

METODOLOGÍA

Calidad del agua de lluvia

Se analizaron tres puntos de muestreo en tres fechas diferentes (noviembre 2004 a julio 2005). El primero de ellos fue al agua de lluvia captada del techo de una casa y almacenada en una cisterna; el segundo fue para el agua de lluvia rodada del sistema colectivo, Villa Nicolás Zapata (Figura 2) y el tercero el agua captada del techo de la iglesia en Jumiltepec. Los análisis físico-químicos y microbiológicos se realizaron según las Normas Mexicanas y Métodos Hach.

Estudio de Caso Villa Nicolás Zapata

Prueba de tratabilidad

Para evaluar la eficiencia de eliminación de turbiedad y color principalmente se realizaron pruebas a escala laboratorio.

- Prueba de jarras: se realizó en jarras de 2 litros para obtener, tipo y dosis de coagulante y pH óptimo para el agua rodada. Los coagulantes escogidos para las pruebas de jarras fueron: sulfato de aluminio, cloruro férrico, BUFLOC (poliacrilamida) y PAX (polímero de alto peso molecular).
- Filtración en Múltiples Etapas Modificada (FIMEM).



Figura 2. Olla No.1 Villa Nicolás Zapata, Totolapan, Morelos.

El concepto de FIMEM implica tener más de una etapa de tratamiento. Estas etapas eliminan progresivamente los contaminantes para producir agua para uso y consumo humano con criterios de continuidad, cantidad y calidad a un costo manejable por los usuarios (Figura 3). Cada una de estas etapas puede diferir en los mecanismos y eficiencias en la eliminación de contaminantes (Galvis *et al.*, 1998).



Figura 3. Sistema de filtración en múltiples etapas modificada (FIMEM).

Se adoptaron dos unidades de filtros gruesos en serie, el primero de flujo descendente en capas, FGDC1 y el segundo de flujo ascendente en capas, FGAC2 y una unidad de filtro lento de arena, FLA. Los parámetros de diseño y granulometría de las unidades de filtración se encuentran en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Parámetros de diseño de las unidades de filtración.

Parámetro	FGDC1	FGAC2	FLA
Características generales			
Velocidad filtración (m h ⁻¹)	0.75	0.75	0.31
Gasto (L d ⁻¹)	115.35	115.35	115.35
Área superficial (m ²)	0.0064	0.0064	0.0154
Profundidad del lecho (m)	0.9	0.9	0.67

En general el filtro, FGDC1, se operó como floculador de lecho de grava, descendente, eliminando el material más pesado o de mayor tamaño y sólidos suspendidos, gradualmente se va avanzando en el filtro, FGAC2, en la eliminación de sólidos más pequeños y por último en el filtro, FLA, se puede incluir la eliminación de los microorganismos, para finalizar en la desinfección.

Tabla 3. Granulometría de las unidades de filtros.

Diámetro (mm)	Altura (m)		
	FGDC1	FGAC2	FLA
19-25	0.30 ¹		
13-19	0.15 ¹	0.15 ¹	
6.3-13	0.45 ¹	0.15 ¹	0.05 ¹
3.36-6.3		0.15 ²	0.05 ²
1.68-3.36		0.45 ³	0.07 ³
0.425-0.28			0.50 ^{3*}
Soporte	0.30	0.30	0.17
Lecho Filtrante	0.60	0.60	0.50

¹Grava, TE: 6.2 mm; ²Gravilla; TE: 1.2 mm; ³Arena; ^{3*}TE: 0.23 mm.

El proceso de coagulación y floculación se efectúa en el FGDC1. La mezcla rápida se realizó con un gradiente de velocidad (G) de 209.5 s⁻¹ y tiempo nominal de 2.4 min. Para la floculación de lecho de grava el gradiente de velocidad (G) y tiempo nominal para cada sección fue: Sección 1: 0,628 s⁻¹, 23.83 min; Sección 2: 2.137 s⁻¹, 11.91 min; Sección 3: 2.04 s⁻¹, 35.74 min.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad del agua

En la Tabla 4 se muestra la caracterización del agua cruda de lluvia para los sistemas domiciliario casa e iglesia, colectivo y agua tratada.

Tabla 4. Caracterización del agua de lluvia cruda y tratada.

Parámetro	Domiciliario, Casa	Domiciliario, Iglesia	Colectivo (min-máx)	Agua tratada, Colectivo	NOM 127-SSA1-1994
Físicos					
Color verdadero (UPt-Co)		7.5	125 - 15	0.16	20
Turbiedad (UTN)	0.85	30	180 - 23.8	5.20	5
Sólidos suspendidos totales (mg L ⁻¹)		1.5	44 - 13		
Químicos					
pH	7.88	6.17	6.86 - 6.63	7.04	6.5-8.5
Aluminio (mg L ⁻¹)		0.11	2.72 - 0.61	0.14	0.2
Carbono orgánico total (mg L ⁻¹)		3.58	4.07 - 3.76		
Hierro (mg L ⁻¹)	0.01	0.05	3.75 - 0.2	0.05	0.3
N-NH ₃ (mg L ⁻¹)	0.31	0.17	0.45 - 0.13		0.5
Microbiológicos					
Coliformes totales (NMP 100 mL ⁻¹)	Presente	4.95 10 ²	13 - <2	Ausencia	2
Coliformes fecales (NMP 100 mL ⁻¹)	Presente	3.91 10 ²	4 - <2	Ausencia	0

Con respecto a la calidad de agua de lluvia a nivel domiciliario en general es buena, cumple con la NOM-127-SSA1-1994, a excepción de la turbiedad, pH y coliformes que se presentan debido a las condiciones inadecuadas de conducción, almacenamiento y ausencia de tratamiento del agua.

Como se observa en la tabla 4 los rangos de los parámetros del agua cruda para el sistema colectivo son altos los cuales dependen de la época de estiaje o de lluvias. De acuerdo con varios autores (Cleasby, 1991; Spencer *et al.*, 1991), turbiedades mayores a 120 UTN y color verdadero de 25 UPt-Co, el agua es apta para ser tratada mediante el sistema de filtración FIMEM.

Estudio de Caso Villa Nicolás Zapata:

Pruebas de jarras

El coagulante que dio mejor resultado fue el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ al 1%, con una dosis de 30 mg L^{-1} , con un pH de 9.1 ajustado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 1N. El gradiente de velocidad y tiempo de agitación utilizados fueron: Mezcla rápida 300 rpm, 15'; Floculación 40 rpm, 20'; Sedimentación 15'.

El potencial eléctrico, (potencial Zeta) medido en la mezcla rápida fue de $1.5 \text{ mV} \pm 0.5$, lo cual demuestra una buena coagulación. Eckenfelder (1989), recomienda un potencial Z entre -0.5 a +1.5 mV. La eficiencia del tratamiento se determinó mediante los porcentajes de eliminación de turbiedad y color aparente que fue para ambos casos del 97.96%. Se obtuvo un efluente con un pH de 6.77 y concentraciones finales de Al y Fe de 0.14 y 0.05 m L^{-1} respectivamente.

Filtración en Múltiples Etapas Modificado (FIMEM)

El sistema de filtración se evaluó de la siguiente manera:

- Sin adición de coagulante.
- Adición de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ según las condiciones óptimas establecidas en la prueba de jarras.

Evaluación del proceso sin coagulante

Para evaluar el sistema se tomaron como base tres parámetros de control de fácil manejo que son color, turbiedad y pH. Los valores promedios de la calidad del agua en el efluente se presentan en la tabla 5. La duración de la carrera de filtración fue de 30 horas.

Como se observa en la tabla 5 los porcentajes de eliminación del color aparente y la turbiedad de tipo coloidal (tamaño de partículas 2–10 μm) están por debajo del 23%, razón por la cual se consideró necesaria aplicar coagulante para aumentar la eficiencia del tratamiento y mejorar la calidad del agua.

Tabla 5. Calidad del efluente y eficiencia de tratamiento.

Parámetro	Agua cruda	FGDC1-FGAC2	FLA	Porcentaje de eliminación (%)
Color aparente (UPt-Co)	1253	963	977	22.03
Turbiedad (UTN)	187	166	151	19.25
pH	6.36	7.45	7.02	-

Evaluación del proceso aplicando coagulante

Debido a la baja calidad del agua (tabla 4) se recomienda la aplicación de coagulante, para prevenir la colmatación de los lechos de arena o ambientes desfavorables para la actividad microbiológica (Galvis *et al.*, 1998).

Se realizaron cinco experimentos de los cuales se describe el que se llevo a cabo el día 02 de marzo del 2005, con una carrera de filtración de 127 horas. Como se aprecia en la gráfica de la figura 4 la turbiedad final en el efluente fue de 5.20 UTN, el color verdadero final de 0.16 UPt-Co y

un pH de 7.27, a las 127 h. Se obtuvo una eficiencia de eliminación para la turbiedad de 94.5% y para el color verdadero de 93.3% con los que se asegura una calidad de agua buena antes de ser desinfectada. Con respecto a la concentración de Fe y Al en el efluente fue de 0.05 mg L⁻¹ y 0.14 mg L⁻¹, el porcentaje de eliminación fue de 94.3% y 68.54% respectivamente.

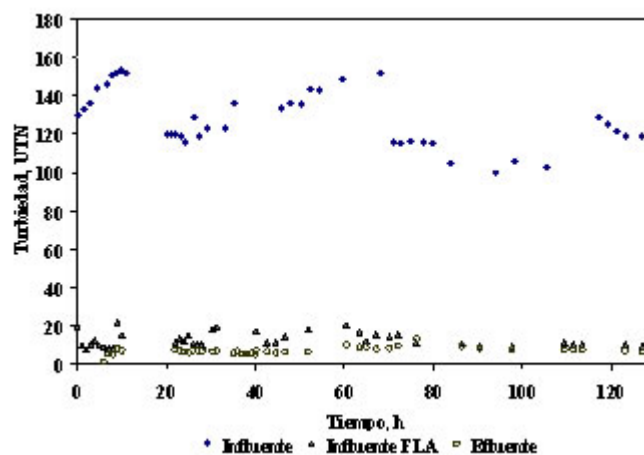


Figura 4. Gráfica del comportamiento de la turbiedad, en el proceso de filtración.

La materia orgánica disuelta o sustancias húmicas asociadas con la eliminación de color es reportada normalmente como baja, para aguas de este tipo, del orden del 25 al 30% (Cleasby *et al.*, 1984; Collins *et al.*, 1991). Para este caso se tiene una concentración en el efluente de 1.90 mg L⁻¹, lo que no presenta un riesgo potencial de tipo crónico con los subproductos de la desinfección del cloro en presencia de este tipo de materia orgánica. Cabe destacar que es necesario tener niveles mínimos de materia orgánica y nutrientes (C, N, P y S) para tratar mejor otros indicadores de calidad del agua.

La pérdida de carga total a través de los lechos de los filtros fue de 0.74 m, donde la mayor carga se presentó para el FLA con 0.40 m, lo cual debe tenerse en cuenta para el diseño de los filtros. Se realizó el retrolavado para el filtro FGDC1, de forma ascendente con una tasa de retrolavado 39.6 m h⁻¹ y un tiempo de 5 minutos.

Proyecto ejecutivo

Con los resultados de las pruebas de tratabilidad, estudios topográficos y geotécnicos de la zona de estudio, se desarrolló el proyecto ejecutivo del sistema FIMEM para la construcción, en la localidad de Villa Nicolás Zapata, con una dotación de 50 L hab⁻¹ d⁻¹ y un caudal de 0.53 L s⁻¹. En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo de este sistema, donde se observa la captación, almacenamiento, tratamiento del agua de lluvia así como el almacenamiento y distribución del agua tratada para los usuarios. En la figura 6 se muestra la planta de potabilización terminada, la cuál se evaluará la eficiencia del tratamiento del agua de lluvia rodada, para esta temporada de Lluvias 2006.

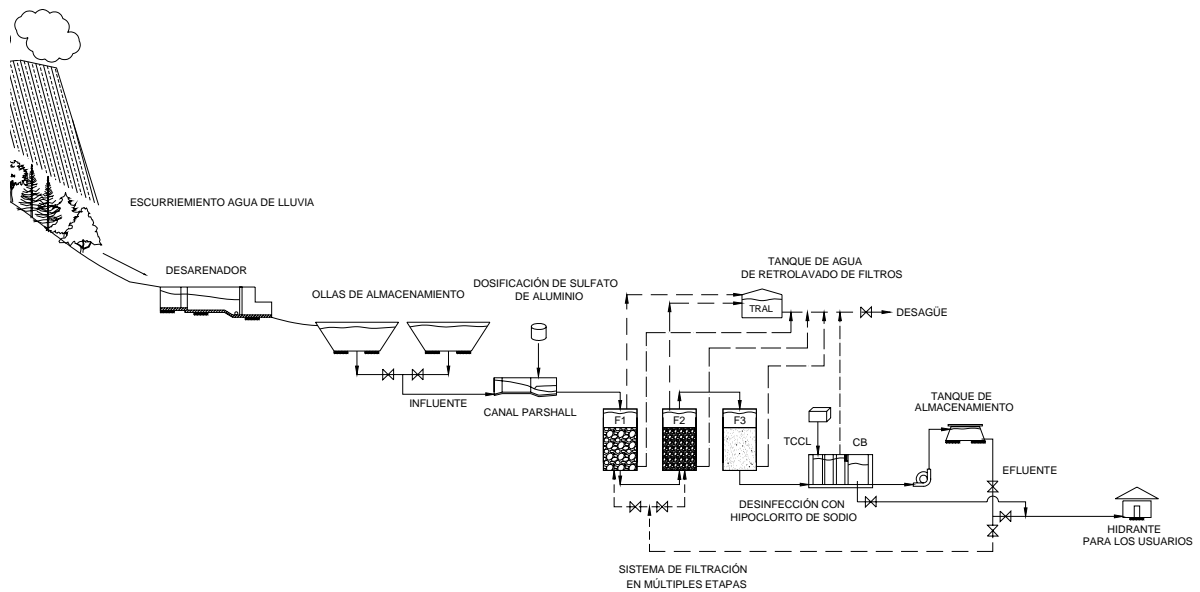


Figura 5. Diagrama de flujo del sistema FIMEM. CP: Canal Parshall; Sistema de Filtración en Múltiples Etapas: F1 (FGDC1); F2 (FGAC2); F3 (FLA); TRAL: Tanque de recuperación de agua de lavado; TCCL; Tanque de contacto de cloro; CB: Cárcamo de bombeo.



Figura 6. Planta potabilizadora de filtración en múltiples etapas modificada; a la derecha se muestra la llegada del influente a la planta y el canal Parshall, Villa Nicolás Zapata, Totolapan, Morelos.

Estudio de Caso Jumiltepec:

El sistema de captación, tratamiento y almacenamiento de agua de lluvia se construyó en la iglesia del Sacromonte. El sistema está conformado por: 1. Área de captación de 225 m²; 2. Conducción de agua de lluvia por una tubería de 4"; 3. Desinfección en línea con hipoclorito de sodio; 4. Filtración en lecho de grava, gravilla y arena, cuya granulometría va desde un diámetro mayor a 65 mm hasta 0.28 mm, y una altura de 0.6 m; 5. Almacenamiento, se instaló una geomembrana de PVC, 1.2 mm de grosor, calidad para uso y consumo humano, con su correspondiente tapa. La capacidad de almacenamiento es de 228 m³, figura 7.

La instalación de este sistema proveerá agua de alta calidad, con un consumo de energía y costos muy bajos, al párroco, a la familia conformada por siete personas, que habitan junto a la iglesia y para los servicios necesarios para la iglesia y feligreses, durante los meses de estiaje.

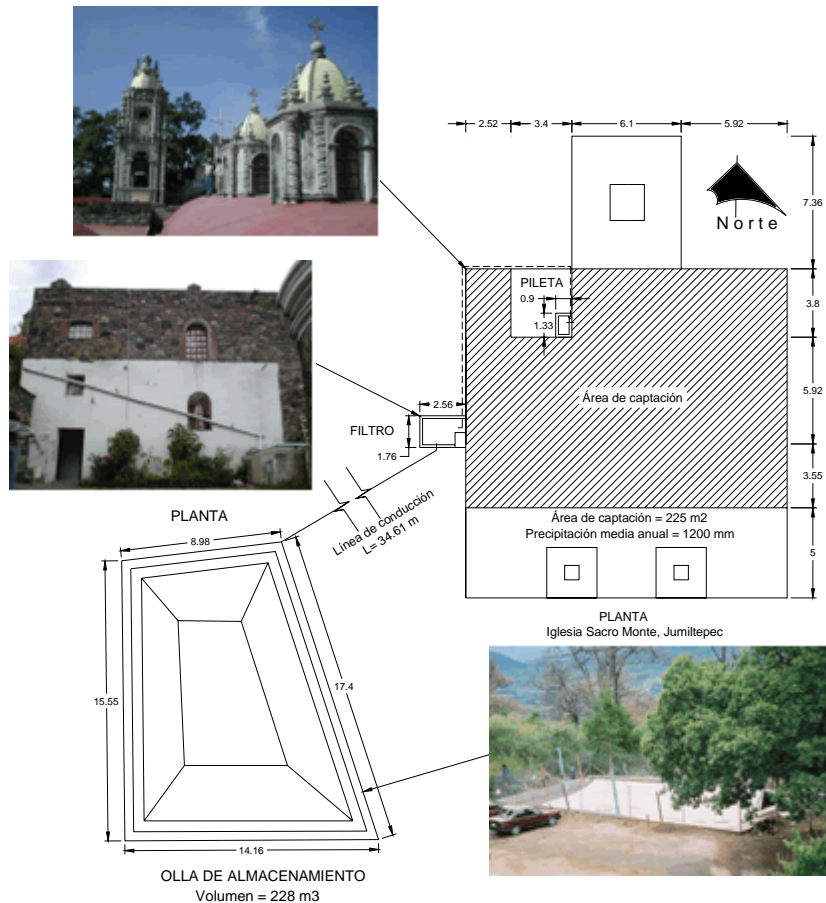


Figura 7. Sistema a nivel domiciliario de agua de lluvia, Jumiltepec.

Agradecimientos: Este proyecto se está realizando con el apoyo del Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Morelos con clave Mor-2003-C01-9615.

CONCLUSIONES

- El agua de lluvia es una excelente solución alternativa en el abastecimiento de agua para uso y consumo humano, en zonas donde no existen o son muy deficientes los sistemas de abastecimiento formales.
- La captación de agua de lluvia es una práctica común en los municipios de la zona norte del estado de Morelos, sin embargo su uso es muy desordenado, no existiendo las etapas de planeación, diseño, construcción y mantenimiento.
- La tecnología de filtración en múltiples etapas modificada (FIMEM), es apta para tratar agua de lluvia rodada, obteniéndose un efluente con una calidad de agua que cumple con la NOM-127-SSA1-1994.
- Con base en los resultados de las pruebas de tratabilidad se lograron eficiencias de eliminación de 94.5% para turbiedad y 93.3% para color verdadero.
- Las tasas de filtración (0.75 y 0.31 m/h) son las adecuadas para el diseño del sistema de filtración (FIMEM).
- El sistema domiciliario de captación, conducción, almacenamiento y tratamiento propuesto para Jumiltepec, resolverá el problema de abastecimiento de agua para la familia y el servicio de agua para el buen funcionamiento de la iglesia.
- Desde el punto de vista financiero los proyectos de captación y tratamiento, FIMEM, de agua de lluvia, son mayores los beneficios que los costos debido al bajo mantenimiento y operación.
- Se requieren programas a mediano y largo plazos, que permitan implementar la captación de agua de lluvia con apoyos técnicos y económicos (costos compartidos).

REFERENCIAS

1. ANAYA, G.M. (2004). Manual de Sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico en América Latina y el Caribe; IICA. Ed. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México.
2. CEAMA, Comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente de Morelos. (2001). Diagnóstico e inventario de la infraestructura y los servicios hidráulicos en las localidades rurales de 16 municipios del Edo. de Morelos. Servicios de Ingeniería e Informática. Documento Interno.
3. CLEASBY, J. L., HILMOE, D.J. AND DIMITRACOPOULUS, C.J. (1984). Slow sand and direct in-line filtration in surface water. *Journal AWWA*. 76(12):44-55.
4. CLEASBY, J. L. (1991). Source water quality and pretreatment options for slow sand filters. Chapter 3 in: Task committee on slow sand filtration. Ed. American Society of Civil Engineering, ASCE; New York. USA.
5. COLLINS, M. R., Eighmy, T. T., Fenstermacher, J. M. and Spanos, S. K., (1991). Removal of natural organic matter by conventional slow sand filtration. *Journal of AWWA*, 84 (5), 80-90.
6. ECKENFELDER, W. W., Jr. (1989). *Industrial pollution control 2ª. Ed.*, McGraw-Hill New York. USA.
7. GALVIS, G., LATORRE, J., VISSCHER, J. T. (1998). Multi-Stage Filtration: An Innovative Water Treatment Technology. IRC, The Hague, The Netherlands and CINARA, Ed. Artes Gráficas de Univalle. Cali, Colombia.
8. INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2000). Anuario estadístico del Estado de Morelos.
9. SECRETARIA DE SALUD. (1996). Norma Oficial Mexicana NOM. 127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización.", Secretaría de Salud, Diario Oficial de la Federación, Mex., 41 – 46 pp.
10. SPENCER, C., COLLINS, M. (1991). Water quality limitations to the slow sand filters. Slow sand filtration Workshop, 27-30 October, 1991, Durham, USA.