

Humedal subsuperficial de flujo vertical como sistema de depuración terciaria en el proceso de beneficiado de café

Carlos E. OROZCO¹, Ana M. CRUZ¹, Miguel A. RODRÍGUEZ¹ y Alfred J. POHLAN²

¹ Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Chiapas. Carretera a Puerto Madero, Km 1.5; CP 30700. México. Telf./Fax (962) 6251555/6262461. Correo electrónico: corozco_71@yahoo.com

² Ecosur. Carretera Antiguo Aeropuerto, Km 2.5; CP 30700. Telf.: (962) 6289800. Tapachula, Chiapas, México.

RESUMEN

El presente trabajo evaluó el comportamiento de un humedal artificial, integrado por tres celdas unidas en paralelo, con área total de 300 m² y con pendiente hacia las salidas del 2%, como tratamiento terciario para aguas residuales provenientes de la combinación del agua de la población (350-450 habitantes), con el agua del lavado del beneficio húmedo de café ubicado en la Finca Argovia, en el municipio de Tapachula, Chiapas, México. La captación se realizó a través de sedimentadores tipo Emscher y como punto intermedio se recibían en un tanque amortiguador, que distribuye automáticamente hacia dos reactores secuenciales por lotes que alimentan al humedal por ciclos de 8 horas mediante flujo discontinuo. Las especies vegetativas que se utilizaron son: *Saccharum spp*, *Panicum maximum*, *Vetiveria zizanoides*, *Heliconia psittacorum* y *Clorophytum commutatum*. El medio poroso del humedal está constituido por capas de grava y arena de mar de 80 cm de espesor. El análisis estadístico demostró eficiencias de remoción de 92 % de la demanda química de oxígeno, 95-96 % para coliformes fecales; el pH y la temperatura presentaron variaciones del 417 % y la conductividad presentó mayor concentración debido a la disolución de las sales del medio poroso.

Palabras Claves: Tratamiento de aguas residuales, humedales artificiales, beneficiado húmedo de café.

INTRODUCCIÓN

Entre los mayores desafíos del desarrollo se encuentra la necesidad de asegurar servicios para el control, tratamiento y aprovechamiento de los residuos sólidos, líquidos y gaseosos de las comunidades rurales y urbanas. Las soluciones planteadas para esto requieren emprender ideas apropiadas e innovadoras para proteger la salud pública, recuperar los recursos nutrimentales y proteger de la contaminación las fuentes de agua, suelo y aire (Rose, 1999). La alta contaminación del agua por materia orgánica natural (MON), y

bacteriológica tiene principalmente su origen urbano y rural. Estas sustancias son mezcladas en los cauces naturales principalmente por las poblaciones, albergando numerosos microorganismos patógenos son la causa principal de enfermedades diarreicas; ocupando el Estado de Chiapas el primer lugar de defunciones (49) en menores de 5 años (INSP), siendo la media nacional de 23 defunciones (SSA, 2002).

En la región del Soconusco, Chiapas, el cultivo del café ocupa una superficie de 75,505 hectáreas (Ha) de un total de 240,800 Ha en todo el estado de Chiapas; con una producción de 665,199 quintales (1Qq = 57.7 Kg) de un total de 2,134,280 Qq

ocupando el primer lugar de producción en Chiapas (Sagarpa, 2003).

En el café, la pulpa y el mucílago constituyen los subproductos más abundantes del proceso del beneficiado de café y representa alrededor del 60 % del peso seco del fruto fresco, y si no se utilizan adecuadamente, influyen en la calidad de los ríos de la zona, generando la mayor fuente de contaminación ambiental por materia orgánica, nutrientes y por el cambio físico del agua que se genera durante la fermentación llegando a un pH de 3.4-4, esto trae como consecuencia la proliferación de enfermedades y el deterioro irreversible del medio ambiente (Calle, 1977; Zuluaga y Zambrano, 1993; Bello Mendoza, 2002).

El uso de humedales artificiales es reconocido y aceptado como una tecnología de bajo coste, que promueve la recuperación y reuso de fuentes de agua, en beneficio de pequeñas comunidades que no pueden disponer de sistemas de tratamiento convencionales (Billore *et al.*, 1999; White, 1995). Los humedales remueven los contaminantes del efluente a través de varios procesos físico-químicos y bacteriológicos. Las plantas tienen dos importantes funciones en estos procesos: suministra el oxígeno necesario para que estos procesos sean realizados por las propias plantas, ya sea formándolo por fotosíntesis o tomándolo del aire e inyectándolo hasta la zona radicular. La transferencia de oxígeno hacia la zona radicular por parte de estas plantas es un requisito imprescindible para que la eliminación microbiana de algunos contaminantes se realice con eficacia, estimulando además la degradación de materia orgánica; y estabiliza la conductividad hidráulica de la matriz porosa. El cual debe de ser de menos de 1 m de profundidad con soporte impermeable para evitar la infiltración de las aguas a tratar en la tierra para lo cual generalmente se construye una o más celdas colocadas en serie (Red *et al.*, 1995; González *et al.*, 2000; Kusch *et al.*, 1999; Hammer y Knight, 1994; Williams, 2002; Jespersen *et al.*, 1998; Kadlec y Knight, 1994; Industrial Research Asístanse Program, 1996).

Los humedales artificiales se clasifican según las características de la especie macrófita que predomina: 1) sistemas de macrófitas no arraigados o flotantes, 2) sistemas de macrófitas emergentes, 3) sistemas de macrófitas sumergidas. Cabe destacar que el sistema que se emplea habitualmente son las macrófitas emergentes (Cooper *et al.*, 1996). También se clasifican según el tipo de flujo: a) sistemas de flujo superficial o terrestres: la lámina de agua se halla en superficie en contacto con la atmósfera; b) sistemas de flujo subsuperficial: la lámina de agua se encuentra en profundidad. Los humedales subsuperficiales se agrupan en sistemas de flujo horizontal (el substrato se encuentra en condiciones de constante saturación hídrica), y flujo vertical (el medio no se encuentra permanentemente saturado, ya que el agua se aplica normalmente en intervalos regulares y percola a través del medio).

Los humedales artificiales que trabajan como sistema de tratamiento de aguas residuales, necesitan un tratamiento previo, el cual dependerá del tipo y calidad del agua a tratar. Hay que tener especial precaución si las aguas residuales proceden mayoritariamente de la industria, ya que se debe evitar el vertido de compuestos tóxicos del sistema (Kusch *et al.*, 1999; Hammer y Knight, 1994; U.S. Environmental Protection Agency, 1993, 1995 y 1998).

En México, el uso de humedales artificiales no está muy extendido, encontrándose solo 20 prototipos de humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal (HASSFH), en los estados de Oaxaca y Michoacán (Comisión Nacional del Agua, 2002). En Yucatán a nivel de microescala se está trabajando con HASSFH para el tratamiento de agua residual porcícola; en la Trinitaria y en los Altos de Chiapas, se está utilizando HASSFH para el tratamiento de aguas porcícolas y de alberges para comunidades indígenas (Tapia *et al.*, 2005; Figueroa Gallegos, 2005; Guillen Trujillo, 2005).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el humedal artificial subsuperficial de flujo vertical (el primero en esta zona) como tratamiento terciario, que trajo como consecuencia el conocimiento de sistemas de tratamientos convencionales y no convencionales.

MATERIAL Y METODOS

Ubicación del sitio de tratamiento

El sistema, está localizado entre los 15° 02' de latitud norte y 92° 18' de longitud oeste a 620 msnm en la finca Argovia ubicada en el municipio de Tapachula, Chiapas, México (Figura 1). La planta piloto recibe el agua miel del lavado del grano de café, después de recirculado con un gasto máximo en volumen de 10 m³/d, mezclada con agua doméstica de la finca con una población flotante entre 300-450 habitantes. El primer tratamiento a que se somete el agua residual es a través del sistema primario, compuesto por tres sedimentadores tipo Emscher, seguido por un tanque de amortiguamiento de donde se alimenta a los reactores secuenciales por lotes automáticamente.

Descripción de los reactores secuenciales por lotes (RSPL)

El sistema secundario está integrado por dos RSPL que trabajan discontinuamente por ciclos de 8 horas automáticamente. El RSPL1 funciona todo el año y tiene 16 inyectoras de aire distribuidos en 3 paneles flotantes, con dimensiones de 5 x 5.75 x 3 m. El RSPL2 trabaja solo en la post-cosecha de café y tiene 78 inyectoras de aire distribuidos en 16 paneles flotantes, con una dimensión de 9 x 10 x 3 m (Figura 1). Cada ciclo de los RSPL consta de las siguientes etapas: etapa de llenado del tanque RSPL (15 min),

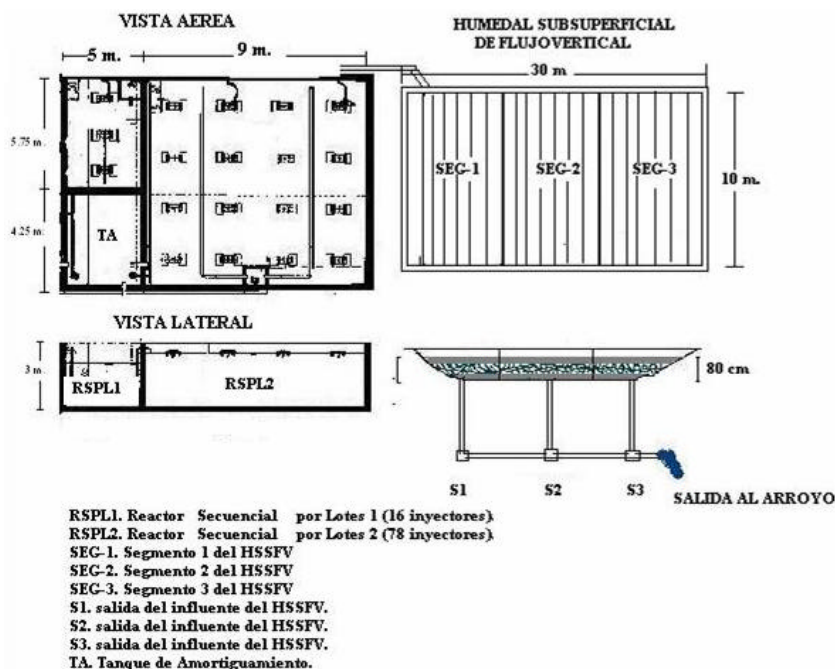


FIGURA 1. Plano del diseño de los reactores secuenciales por lotes (RSPL) y el humedal subsuperficial de flujo vertical (HSSFV), ubicados en la finca Argovia (Tapachula, Chiapas, México).

etapa de desnitrificación (30 min), etapa de aireación (5 h distribuidas, por 4 min de inyección de oxígeno por 6 min de reposo), etapa de sedimentación (1h con 30 min), y etapa de vaciado hacia el humedal artificial (45 min). Con este tipo de proceso se pueden compensar en forma segura fuertes variaciones de carga contaminante asegurando una buena y constante capacidad de depuración. Ambos reactores alimentan al humedal artificial (Baumann, 2003).

Diseño y descripción del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical (HASSV)

El diseño del humedal artificial se basó en la Norma Técnica Alemana A262 (ATV, 1998), en donde el sistema de HASSV requiere de un área de 2.5 m² por habitante, y cada persona genera 60 g de demanda química de oxígeno (DQO), con respecto al clima de Alemania. La Tabla 1 presenta las principales características teóricas del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical constituido por tres segmentos (SEG-1, SEG-2 y SEG-3), separados por un sistema de hombros entre cada uno de ellos. Teniendo en cuenta los criterios de diseño, el medio poroso está constituido por cuatro capas de sustrato dispuestas del fondo hacia arriba como se indica a continuación: una capa de grava de 40 cm, una capa de arena de mar de 10 cm, una capa de

grava de 10 cm, y una capa de arena de mar de 20 cm. La base y los taludes están revestidos por una geomembrana de 8 mm de espesor y el fondo del humedal tiene una pendiente del 2 % hacia las salidas. En la base del humedal existen interconexiones de mangueras de los RSPL que conectan a una tubería de PVC (5" de diámetro), que se distribuye horizontalmente en el humedal (a nivel de la arena), conectando verticalmente con tuberías de PVC (2" de diámetro), perforadas a lo largo de la parte baja asegurando la distribución del agua en toda el área del humedal en forma discontinua cuyo promedio de caudal tratado es de 10 m³/d.

Diseño experimental

El trabajo experimental se llevo a cabo en el HSSFV que integra parte de la planta piloto en donde se definieron tres segmentos de 10 x 10 m, unidos en paralelo, y las especies vegetativas se sembraron con una densidad de 4 brotes/m² a una distancia entre cada brote de un metro con cuatro bordos para cada especie. Las especies utilizadas fueron: para el primer segmento, *Saccharum* spp. (caña de azúcar), y *Panicum maximum* (tanzania); para el segundo segmento, *Heliconia psittacorum*; y para el tercer segmento, *Vetiveria zizanioides* (pasto vetiver) y *Clorophytum commutatum* (pasto liriope).

Monitoreo

El monitoreo durante el curso de la investigación fue realizado manualmente de Octubre de 2003 a Febrero de 2004 entre las 10:00 - 12:00 horas en donde se recolectaron 11 muestras. El manejo de las muestras y el muestreo se llevó a cabo de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas.

El muestreo consistía en:

- (a) Toma de muestras en el punto del efluente en cada una de las celdas del humedal artificial (SEG-1, 2 y 3), usando frascos de vidrio estériles para coliformes fecales (CF), con capacidad de 100 ml y botes de plástico limpios con capacidad de 10 L para la demanda química de oxígeno total (DQO_T), y conservadas en hielo.

Porosidad del cuerpo filtrante (Fracción)	Grosor del cuerpo filtrante (cm)	Conductividad hidráulica (Kf)	Textura del material (mm)	Percolación máxima (m ³ /día)	Tiempo de residencia hidráulica (días)	Area (m ²)
25	80	5x10 ⁻⁵ m/s	0.2-0.63	950	5.6	300

TABLA 1. Características del humedal subsuperficial de flujo vertical ubicado en la finca Argovia.

- (b) Toma de muestras en el punto del afluente de los dos RSPL que alimenta al HSSFV usando frascos de vidrio estériles para CF, con capacidad de 100 ml, y botes de plástico limpios con capacidad de 10 L para la DQO_T y conservadas en hielo.
- (c) Para todos los puntos se determinó *in situ* pH, temperatura y conductividad.

Los análisis para DQO_T y CF se realizaron en el laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chiapas tres horas después del muestreo.

Métodos analíticos

La DQO_T se midió por el método de digestión a refluo cerrado (5220-D), coliformes fecales (CF) se determinaron por el método de fermentación en tubos múltiples (9221-E), de acuerdo a los métodos estandarizados (APHA, 1998). El pH, temperatura y conductividad fueron medidos con potenciómetro (Conductronic mod. PC18).

TABLA 2. Comparación de medias por Tukey de las características químicas y microbiológicas de las muestras de agua.

DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (mg/L)		COLIFORMES FECALES (NMP/100 ml)	
S1	43.409	S1	63.636
S2	45.000	S2	91.818
S3	42.954	S3	59.090
RSPL1	375.54	RSPL1	2145.45
RSPL2	832.09	RSPL2	1541.82

CONDUCTIVIDAD (µS/cm)		POTENCIAL DE HIDROGENO (pH)	
S1	1009.53	S1	7.018
S2	988.073	S2	6.972
S3	930.836	S3	7.018
RSPL1	1076.84	RSPL1	7.345
RSPL2	952.964	RSPL2	7.700

TEMPERATURA (°C)	
S1	24.418
S2	24.763
S3	25.536
RSPL1	29.509
RSPL2	29.690

Análisis estadístico

Se aplicó análisis de varianza de una vía y pruebas de rango múltiple de Tukey con *alfa* al 0.05 para comparar las medias de los diferentes tratamientos, con el paquete estadístico Statgraphic Plus 4.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 presenta las medidas de los datos obtenidos del afluente de ambos RSPL que alimenta al humedal y los tres efluentes del humedal, presentan diferencias altamente significativas entre los tratamientos para la demanda química de oxígeno total (p=0.0000), coliformes fecales (p=0.0000), temperatura (p=0.0000) y pH (p=0.0000); en contraste, para la conductividad no se observaron diferencias significativas a lo largo del periodo del estudio (p=0.6927), principalmente por las características del humedal, donde la matriz del substrato lo integra grava y arena de mar, por lo que conlleva a la disolución de las sales, presentando valores altos de conductividad en todo el estudio de los efluentes en los tres segmentos del humedal.

Para determinar qué tratamientos son diferentes significativamente se aplicó la prueba de rango múltiple de Tukey para DQO_T, CF, temperatura y pH; los grupos iguales son

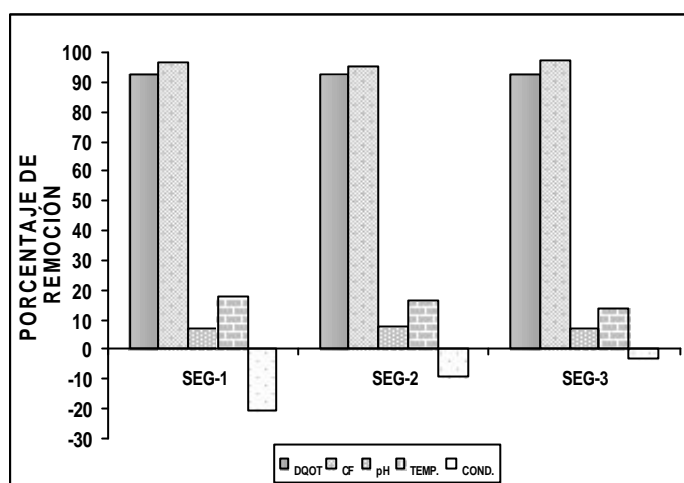


FIGURA 2. Eficacia de remoción (%), para DQO_T, CF, pH, temperatura y conductividad.

los tres efluentes del humedal artificial por lo que se determina que, las especies vegetativas y la matriz porosa presentaron la misma influencia en el nivel de remoción.

La diferencia de concentración de la media para ambos reactores (RSPL) en los contaminantes descritos se atribuye al tiempo de aclimatación de los lodos activados; el RSPL1 trabaja los 365 días del año, en contraste el RSPL2 que trabaja en la época de la cosecha de café, por lo que la aclimatación de los lodos activados en el tiempo no es el adecuado para un desarrollo óptimo y eficiente del sistema. Esto demuestra que a pesar de las grandes diferencias de volumen de carga y del número de inyectoros de 78 para RSPL2 y 16 de RSPL1, tiene mayor impacto la aclimatación de los lodos activados.

Porcentaje de remoción

Los porcentajes de remoción de los contaminantes en el humedal artificial se presentan en la Figura 2. La eficiencia para DQO_T fue del 92% respectivamente. Estos datos son soportados por los encontrados por Juwarker *et al.* (1995), quien encontró una eficiencia del 90 % en un HSSFV como tratamiento terciario de una población. El-Khateeb y El-Gohary (2003) encontraron una eficiencia del 78% para un HSSFV como tratamiento secundario. Para CF fue del 95-96 % de eficiencia, el pH tuvo una marcada influencia, esto debido a procesos biogeoquímicos que llevan a la neutralidad las aguas con un nivel de variación entre 6 y 7 %; la temperatura tuvo una variación entre 13 y 17 %. La conductividad no presentó remoción por efecto del sustrato humedal.

CONCLUSIONES

Los reactores secuenciales por lotes cumplen la función importante de oxigenar el agua; reducir y/o eliminar los compuestos orgánicos y biológicos a niveles donde los humedales artificiales son eficientes para el proceso de tratamiento terciario de aguas residuales, obteniéndose rendimientos de depuración de 92 % para DQO_T y de 95-96 % para CF bajo las condiciones tropicales, estando dentro de los límites permisibles por la norma mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997).

Se constató que los humedales artificiales influyen sobre parámetros ambientales (pH y temperatura), amortiguando la calidad del efluente final. Por las características de la matriz porosa del sustrato del humedal, la disolución de las sales aumento la concentración de las conductividades en los efluentes.

La aplicación de humedales artificiales puede ayudar a resolver el problema de manejo de desechos líquidos y sólidos domésticos en zonas rurales aisladas de nuestro país, así como áreas urbanas, el sistema es atractivo para estas áreas debido a que no se requiere de conocimiento técnico especializado para su mantenimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados son derivados del proyecto "Programa de Monitoreo de Erosión Hídrica, Manejo del Agua y Preservación del Suelo en Sitios Representativos de la Cuenca del Río Huehuetán, Chiapas, México." bajo el convenio de colaboración CNA-UNACH No. SGIH-FS-CHS-04-TT-021-RF-CC.

BIBLIOGRAFÍA

1. APHA (1998). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. 20th Ed. American Public Health Association. Washington, USA
2. ATV (1998). Principles For The Dimensioning, Construction And Operation Of Plant Beds For Communal Wastewater With Capacities Up To 1000 Total Number Of Inhabitants And Population Equivalents. ATV-A 262E. July 1998, 12 p.
3. Baumann J. (2003). Logros del Programa de Expertos Integrados; Centro para Migración y Desarrollo Internacional (Alemania)-Comisión Nacional del Agua (México) 1997-2003. plan de conservación de suelos y agua para la costa de Chiapas. 16p

4. Bello Mendoza R. (2002). Impacto ambiental del beneficiado húmedo del café. En: Pohlan J. (Ed.). 2002. México y la caficultura chiapaneca. Reflexiones y alternativas para los caficultores. Aachen, Shaker Verlag. Alemania. 386 p: 311-320.
5. Billore, S. K., Singh, N., Sharma, J. K., Dass, P. and Nelson, R. M. (1999). Horizontal Subsurface Flow Gravel Bed Constructed Wetland with *Phragmites Karka* in Central India. *Wat. Sci. Tech.*, 40, 163-171.
6. Calle V.H. (1977). Subproductos del café. Chinchiná, Cenicafe, (Boletín Técnico N° 6) 84 p.
7. Cooper, P., JOB, G., Green, M., Shutes, R. (1996). Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. *Severn Trent Water*. WRC Swindon. UK.
8. Comisión Nacional del Agua (2002). Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. - Source: www.cna.gob.mx/portal/pubica/estaticas/inv/pt_general/PDF
9. El-Khateeb, M. A., El-Gohary, F. A. (2003). Combining UASB technology and constructed wetlands for domestic wastewater reclamation and reuse. *Wat. Sc.Tech.:Water Supply*. Vol.3 No 4: 201-208
10. Figueroa Gallegos, J. A. (2005). Evaluación de alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) como planta emergente en un pantano tipo flujo horizontal de subsuperficie para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. II Congreso Internacional Sobre Agua en la Frontera México-Guatemala-Belice. Campeche, Campeche. Pp. 9
11. González, O., Hernández, J., Rodríguez, M., Prats, D. (2000). Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno en humedales con flujo subsuperficial horizontal. *Tecnología del agua*, 203, 42-49.
12. Guillen Trujillo H. (2005). Sistema integral en serie de tratamiento de aguas residuales y su uso agrícola para pequeñas comunidades indígenas usando fosas sépticas y humedales. II Congreso Internacional Sobre Agua en la Frontera México-Guatemala-Belice. Campeche, Campeche. Pp. 35
13. Hammer, D.A., Knight, R.L. (1994). *Designing Constructed wetlands for Nitrogen Removal*. *Water Sci. Technol.* **29**, 15-27.
14. Industrial Research Assistance Program. (1996). *Development of Bioreactor Engineered wetland (BREW) for wastewater Treatment*. Project 27886U, Final Report to the National Research Council, Ottawa, Canada.
15. Instituto Nacional de Salud Pública y SSA (2000). *Encuesta Nacional de Salud 2000*. Secretaría de Salud. México. 432 pp.
16. Jespersen, D.N., Sorrell, B.K., Brix, H. (1998). Growth and root oxygen release by *Typha latifolia* and its effects on sediment methanogenesis. *Aquat. Botany* 61(3), 165-180
17. Juwarker, A.S., Oke, B., Juwarker, A. and Patnaik, S. M. (1995). Domestic wastewater treatment through constructed wetlands un India. *Wat. Sc. Tech.* vol.12. No. 3:292-294
18. Kadlec, R. and Knight, R. (1997) *treatment Wetlands* (ed.), Lewis Publishers, Inc., Boca Raton, FL, USA.
19. Kuschik, P., Wieber, A., Stottmeister, U. (1999). Biological Processes in Wetlands System for Wastewater Treatment. In: Rehm, H.J., Reed. J. (Eds), *Biotechnology*. VCH-Wiley, Weinheim, Germany, pp. 242-252.
20. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de septiembre de 1998. México. pp12
21. Norma Mexicana NMX-AA-003 Aguas residuales-Muestreo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980.
22. Reed, S., Crites, R. and Middlebrooks, J. (1995). *Natural System for Waste Management and Treatment*. (ed.), McGraw-Hill, NY.
23. Rose, G.D. (1999). "Community-based technologies for domestic wastewater treatment and reuse: options for urban agriculture" in cities feeding people, CFP report series, report 27. Website <http://www.idrc.ca/ctp/rep27e.html>
24. Sagarpa (2003). <http://www.sagarpa.gob.mx/dlg/chiapas/agricultura/perennes/cafe.html>
25. SSA (2002). *Salud México 2002*. Secretaría de Salud. México. 220 pp. Alemania.
26. Tapia, F., Giacomán, G., Herrera, J. (2005). Simulación de ecosistemas naturales (humedales artificiales con flujo subsuperficial) para el tratamiento de agua residual porcícola bajo condiciones tropicales. II Congreso Internacional Sobre Agua en la Frontera México-Guatemala-Belice. Campeche, Campeche. Pp. 8
27. U. S. Environmental Protection Agency (1993). *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater treatment: A Technology Assessment*. EPA/832/R/93/001. Office of Wastewater Enforcement and Compliance. Washington, D.C. USA.
28. U. S. Environmental Protection Agency (1995). *Handbook of Constructed wetlands a guide to creating wetlands for: agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, and stormwater in the mid-atlantic region* Vol. 1 No 903B9500UA. Washington, D.C. USA
29. U. S. Environmental Protection Agency (1988). *Design Manual-Constructed Wetlands and Aquatic Plants System for Municipal Wastewater treatment*. 625/111/88/022, Office of Research

- and Development. Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio, USA.
30. White, K. D. (1995) Enhancement of nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands employing a 2-stage configuration, an unsaturated zone, and recirculation. *Wat. Sci. Tech.*, 32, 59-67.
 31. Williams, J. B. (2002). Phytoremediation in wetlands ecosystem: progress, problems and potential *Crit. Rev. Plant Sci.* 21 (6), 607-635
 32. Zuluaga, J. y Zambrano, D. (1993). Manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café para el control de la contaminación. Chinchiná, Avances técnicos Cenicafé No 187: 1-4.