



PLANTA PILOTO PARA EL TRATAMIENTO ANAERÓBICO – AERÓBICO DE LÍQUIDOS CLOCALES EN SALTA, ARGENTINA

Lucas Seghezze¹, Anibal P. Trupiano, Viviana Liberal y Carlos M. Cuevas
Universidad Nacional de Salta, Consejo de Investigación - INENCO
Buenos Aires 177, 4400 Salta, Argentina.
Tel.: 0387-4255516; Fax: 0387-4255483; Email: lucas@unsa.edu.ar

RESUMEN: Este trabajo presenta el diseño de una planta piloto para el tratamiento de líquidos cloacales consistente en dos reactores UASB (reactores anaeróbicos de flujo ascendente y manto de lodos) ubicados en serie, seguidos de un sistema de cinco lagunas de estabilización (tipo maduración), también en serie. Los reactores UASB han sido diseñados para la remoción de la mayor parte de la carga orgánica del influente, mientras que las lagunas se encargarán principalmente de la eliminación de los microorganismos patógenos. El trabajo se desarrollará en la ciudad de Salta, donde las temperaturas medias anuales del aire y del líquido cloacal son 16,5 y 21.0°C, respectivamente. La planta piloto será instalada en la planta depuradora de líquidos cloacales de la ciudad de Salta. El líquido influente tendrá un pretratamiento consistente en retención de sólidos gruesos y arenas. Se presentan detalles de diseño y dimensionamiento de todas las etapas, se listan los parámetros físico-químicos que se determinarán de manera periódica para el seguimiento del sistema y se indican los resultados esperados. La planta ha sido construida por una empresa local y se encuentra actualmente en proceso de instalación.

Palabras clave: lagunas de estabilización, líquidos cloacales, post-tratamiento aeróbico, reactores UASB, tratamiento anaeróbico.

INTRODUCCION

El tratamiento de líquidos cloacales mediante la utilización de reactores UASB (reactores anaeróbicos de flujo ascendente y manto de lodos) es una práctica común en zonas de clima tropical (van Haandel y Lettinga, 1994; Seghezze et al., 1998). En regiones de clima templado o sub-tropical, en donde la temperatura de los líquidos cloacales puede bajar a menos de 20°C durante parte del año o parte del día, la eficiencia de estos reactores todavía se pone en duda. A esas temperaturas, el proceso de hidrólisis de los sólidos suspendidos del influente puede ser demasiado lento, permitiendo que sólidos sin degradar se acumulen en el reactor, reduciendo proporcionalmente la actividad bacteriana del lodo anaeróbico y desmejorando la eficiencia global del tratamiento (Elmitwalli, 2000). Para solucionar este problema, se ha propuesto la sedimentación primaria de los líquidos cloacales antes de su ingreso al reactor anaeróbico, o la utilización de sistemas anaeróbicos en dos etapas. En un sistema de dos etapas, la mayor parte de los sólidos son retenidos en el primer reactor, donde también se inician los procesos de hidrólisis de sólidos suspendidos. Existe evidencia de que la remoción de sólidos suspendidos es más eficiente en un reactor anaeróbico de flujo ascendente que en un sedimentador primario (Wang, 1994). El segundo reactor retiene los sólidos suspendidos restantes y degrada los compuestos solubles del influente más los que se generaron durante la hidrólisis parcial que tuvo lugar en el primer reactor. La utilización de sistemas de una o dos etapas debe decidirse en función de estudios concretos realizados en cada lugar, a los efectos de tener en cuenta las condiciones climáticas locales, la temperatura y concentración de los líquidos cloacales y, eventualmente, las variaciones horarias, diarias o estacionales del caudal. Para líquidos cloacales cuya temperatura varía en el rango de 15 a 25°C es posible que un solo reactor anaeróbico sea suficiente para cumplir con los objetivos del tratamiento, sin necesidad de recurrir a ningún tipo de pre-tratamiento (además de la retención de sólidos gruesos y arenas) (Zeeman y Lettinga, 1999). En reactores que tratan líquidos cloacales pre-sedimentados se observó "granulación" del lodo (van der Last y Lettinga, 1992; Seghezze et al., 2000), un fenómeno que ocurre preferentemente durante el tratamiento anaeróbico de efluentes orgánicos con preponderancia de sustancias biodegradables en solución, típicos de industrias alimenticias (Hulshoff Pol, 1989). Los sistemas en dos etapas fueron propuestos por van Haandel y Lettinga (1994) y Wang (1994).

Desde al año 1995 se realizan en la ciudad de Salta experiencias a escala piloto sobre el tratamiento anaeróbico de líquidos cloacales pre-sedimentados en un reactor UASB, con resultados muy promisorios (Seghezze et al., 1995; Seghezze et al., 2000; Castañeda et al., 2000; González et al., 2000; Guerra et al., 2000). Este trabajo presenta el diseño de una planta piloto anaeróbica de dos etapas (UASB-UASB) que será utilizada para el tratamiento de líquidos cloacales crudos y servirá para determinar la configuración óptima (una o dos etapas) bajo las condiciones locales. Las fases anaeróbicas son seguidas por un sistema de lagunas de estabilización para la eliminación de microorganismos patógenos y la remoción de materia orgánica remanente.

¹ Autor a quien debe enviarse la correspondencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

El trabajo se desarrollará en la ciudad de Salta, ubicada a 24° de latitud Sur, con un clima templado definido como subtropical con estación seca. La temperatura ambiente media anual es de 16,5°C (Arias y Bianchi, 1996). La planta piloto será instalada en la planta depuradora de líquidos cloacales (PDLC) ubicada en la zona Sur de la ciudad de Salta, dependiente de la empresa *Aguas de Salta S.A.*, prestataria del servicio de agua potable y saneamiento en la Provincia de Salta. El líquido influente al sistema será sometido a un tratamiento primario consistente en cámara de rejas para la retención de sólidos gruesos y desarenador para la remoción de arenas. La *Figura 1* muestra un diagrama esquemático de la planta piloto.

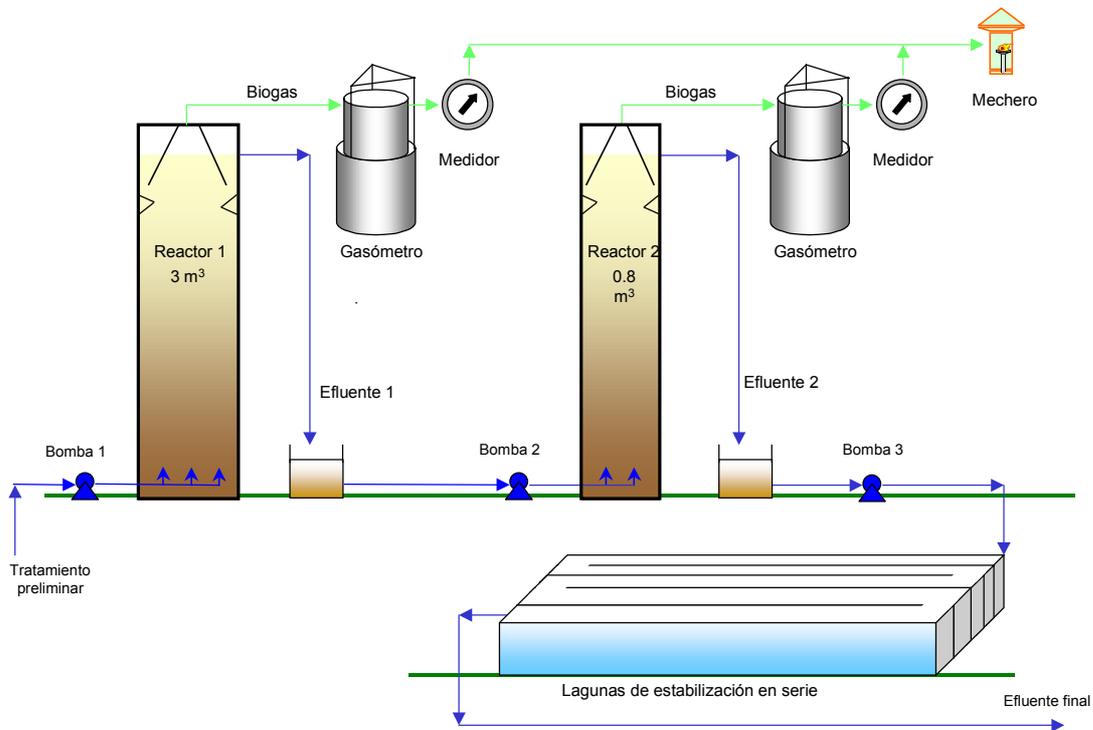


Figura 1: Diagrama de flujo de la planta piloto diseñada. No a escala.

Reactores UASB

En la *Tabla 1* se detallan las dimensiones de los reactores UASB. El material que se utilizó para su construcción fue Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV). La construcción fue realizada por la empresa *Juan José Scarcella Instalaciones Plásticas y Mecánicas*, de la ciudad de Salta.

Dimensiones	Reactor 1	Reactor 2
Diámetro (m) =	1.00	0.50
Altura (m) =	3.90	3.90
Volumen (m³) =	3.063	0.766
Área basal (m²) =	0.785	0.196

Tabla 1: Dimensiones de los reactores UASB.

El diseño de los reactores posibilita la aplicación de un amplio rango de Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) en ambos reactores, lo cual permitirá estudiar el efecto de esta variable sobre la eficiencia de remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos. La velocidad ascensional (V_{up}) se mantendrá en general por debajo de 1 m/h, recomendada para evitar la pérdida de lodo por arrastre, previéndose picos ocasionales de hasta 2 m/h en casos especiales. Los colectores de gas, o sistemas de separación de fases sólida-líquida-gaseosa poseen un área para la liberación de gases diseñada para una carga superficial de 1m³ de gas/m².h. En el área de pasaje de líquido ubicada entre los colectores de gas y la pared del reactor se acepta una V_{up} máxima de 3 m/h. La producción de biogás de los reactores anaeróbicos se acumulará en 2 gasómetros de tanque flotante de 300 L cada uno. El gas se medirá en medidores domésticos de gas natural (Schlumberger Gallus 2000 y ABB ELSTER Sistema Krom Schroder). La medición del gas acumulado se realizará automáticamente a través de la acción de electroválvulas comandadas por micro-switches que se accionan cuando el gasómetro se llena o se vacía. Los reactores se inoculan con lodo digerido de los digestores de barros de la planta depuradora (Reactor 1) y con lodo anaeróbico procedente de un reactor UASB alimentado con líquido cloacal pre-sedimentado (Reactor 2). La cantidad de inóculo a agregar será de aproximadamente 5% del volumen útil de cada reactor. Se realizará una caracterización previa de los inóculos en cuanto al contenido de sólidos y la actividad metanogénica específica.

Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización, en este caso del tipo de *maduración*, serán utilizadas para la remoción de microorganismos patógenos y materia orgánica remanente. El diseño se realizó considerando que el efluente debe cumplir con el límite máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud para riego irrestricto (WHO, 1989), valor que se considera aceptable para volcamiento de líquidos cloacales tratados en cursos de agua de la Provincia de Salta (SeMADeS, 2001). Al igual que los reactores UASB, las lagunas fueron construidas de PRFV. Para el dimensionamiento de las lagunas se consideró que la tasa de muerte bacteriana de *Escherichia coli*, tomada como indicador de contaminación bacteriológica en líquidos cloacales sigue una cinética de primer orden, de acuerdo a lo originalmente propuesto por Marais (1974):

$$\frac{dN}{dt} = -K_b N$$

donde N = concentración de *E.coli* expresada como Número Más Probable (NMP) en 100 mL de muestra y K_b = constante de muerte celular (d^{-1}). El valor de K_b está influenciado por la temperatura según la siguiente ecuación de Arrhenius modificada:

$$K_b = K_{b,20} \cdot \theta^{(T-20)}$$

en la cual $K_{b,20}$ = constante de muerte celular a 20°C, θ = constante cinética o “coeficiente de temperatura”, y T = temperatura media esperada de operación. La fórmula para calcular el TRH requerido en el sistema para cumplir con la eficiencia deseada de remoción de patógenos, se derivó de un balance de masa sobre la concentración de microorganismos, considerando que se trata de un sistema de varias lagunas en serie con régimen hidráulico de mezcla completa:

$$TRH_{total} = n * \frac{\left(\frac{N_0}{N_n}\right)^{\frac{1}{n}} - 1}{K_b}$$

donde TRH_{total} = Tiempo de Retención Hidráulica en todo el sistema, n = número de lagunas en serie y los subíndices 0 y n indican las situaciones en el influente y a la salida de la n -ésima laguna, respectivamente. A partir del TRH calculado, el caudal que aporta la bomba peristáltica y una profundidad adoptada de 1.00 m, se calculó el área total requerida de lagunas. Los valores considerados para el dimensionamiento, tomados de von Sperling (1996) y Liberal et al. (1999), se presentan en la *Tabla 2*. Las dimensiones calculadas para las lagunas se indican en la *Tabla 3*.

Constante/Parámetro	Valores utilizados
$K_{b,20}$ (d^{-1}) =	1.5
T ($^{\circ}C$) =	21.0
θ (-) =	1.17
N_0 (NMP/100 mL) =	$1 \cdot 10^7$
N_n (NMP/100 mL) =	$1 \cdot 10^3$
n (-) =	5
K_b (d^{-1}) =	1.75

Tabla 2: Valores de las constantes cinéticas y otros parámetros utilizados para el dimensionamiento de las lagunas.

Parámetro	Valores
Largo (m) =	3,2
Ancho por laguna (m) =	0,5
Profundidad (m) =	1
Número de lagunas (-) =	5
Area por laguna (m^2) =	1,6
Volumen por laguna (m^3) =	1,6
Area total (m^2) =	8
Volumen total (m^3) =	8
TRH planeado total (d) =	15

Tabla 3: Características de las lagunas de estabilización.

Bombas peristálticas

La alimentación de los reactores y de las lagunas se realizará con bombas peristálticas Watson Marlow modelos 313S, 621-I/R y 701-I/R. Se decidió la utilización de bombas *peristálticas* por su alta confiabilidad operativa y su precisión en la fijación de caudales, lo cual permite establecer las condiciones hidráulicas requeridas de manera segura.

Seguimiento

Se medirá la temperatura ambiente y del líquido en distintas partes del sistema. Se realizarán mediciones continuas con un termógrafo Novasen 3752-5-S-C y puntuales con un termómetro digital marca Keithley. Se tomarán muestras compuestas (1L cada 3 h durante 24 h) dos veces por semana de los líquidos de entrada y salida de cada unidad para su análisis físico-químico, biológico y bacteriológico. El muestreo estará a cargo de personal de *Aguas de Salta S.A.*. La rutina de análisis que se empleará para el seguimiento de la planta piloto se detalla en la *Tabla 4*. Los análisis se realizarán de acuerdo al *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 1995) y con micro-métodos HACH®. Periódicamente se realizarán determinaciones adicionales, en función de las necesidades de la investigación.

Parámetros	Frecuencia
pH	2 veces por semana
Demanda Química de Oxígeno (DQO) total (mg/L)	2 veces por semana
DQO filtrada en papel de filtro (mg/L)	1 vez por semana
DQO filtrada en membrana (mg/L)	1 vez por semana
Sólidos sedimentables (10 min, 1 h y 2 h) (mL/L)	1 vez por semana
Sólidos totales y volátiles sin filtrar (g/L)	1 vez por semana
Sólidos totales y volátiles filtrados en papel de filtro (g/L)	1 vez por semana
Sólidos totales y volátiles filtrados en membrana (g/L)	1 vez por semana
Sólidos suspendidos (g/L)	1 vez por semana
Sólidos suspendidos totales y volátiles (g/L)	1 vez por semana
Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L a pH 4)	1 vez por semana
Ácidos grasos volátiles (mg/L)	1 vez por semana
Conductividad (µS/cm)	1 vez por semana
Total de sólidos disueltos (g/L)	1 vez por semana
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅) total (mg/L)	1 vez por semana
Oxígeno disuelto en las lagunas (mg/L)	1 vez por semana
Análisis bacteriológicos	1 vez por semana
Análisis de parásitos (huevos y larvas de helmintos)	1 vez por semana
Nitrógeno total (Kjeldahl) y amoniacal, nitritos y nitratos	Cada 15 días
Fósforo total	Cada 15 días
Clorofila (en las lagunas)	Cada 15 días

Tabla 4: Rutina de análisis físico-químicos, biológicos y bacteriológicos a realizar para el seguimiento de la planta piloto.

Durante la puesta en marcha y la operación normal se medirán de manera regular los siguientes parámetros del lodo anaeróbico: a) Actividad Metanogénica Específica (gDQO-CH₄/gSSV.d) (gramos de metano producidos, expresados en términos de DQO, por gramo de sólidos suspendidos volátiles y por día); b) Actividad Hidrolítica (%) y c) Estabilidad (gDQO-CH₄/gSSV). Se seguirán técnicas del Departamento de Tecnología Ambiental de la Universidad de Wageningen, Holanda (DET, 1994) y tomadas de Sanders (2001).

RESULTADOS ESPERADOS

De acuerdo a experiencias anteriores realizadas con un reactor UASB a escala piloto alimentado con líquido cloacal presedimentado, se espera una eficiencia de remoción de materia orgánica (expresada como DQO) de aproximadamente 70% en los reactores anaeróbicos. Parte de la DQO remanente será removida en las lagunas de estabilización. Experiencias en Pedregal, Brasil, y en Cali, Colombia, en las que se utilizaron lagunas de estabilización como post-tratamiento de efluentes tratados en reactores UASB, arrojaron remociones de DBO del orden del 25 al 70% (van Haandel y Lettinga, 1994). Si las constantes cinéticas utilizadas para el diseño de las lagunas de estabilización son confirmadas en estos estudios, se espera una remoción de microorganismos patógenos superior al 99.99%, suficiente para alcanzar los niveles exigidos por la legislación provincial. Se realizará un balance de masa a través del sistema para determinar con la mayor precisión posible el destino de la DQO entrante y evaluar la eficiencia global del sistema, incluyendo la producción de biogas y lodo anaeróbico. Los ensayos a escala piloto son imprescindibles para la obtención de parámetros de diseño optimizados bajo las condiciones locales y permitirán la puesta a punto de este tipo de tecnologías combinadas, no aplicadas hasta el momento en la región.

REFERENCIAS

- Arias, M. and Bianchi, A.R. (1996). *Estadísticas climatológicas de la Provincia de Salta*. Dirección de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Provincia de Salta. INTA Cerrillos, Salta, Argentina. 189 p.
- Castañeda, M.L., Seghezzo, L. y Cuevas, C.M. (2000). Factibilidad del tratamiento anaeróbico de líquidos cloacales en Salta, Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, ASADES 2000, 4 (2):06.19-06.21.
- DET (Department of Environmental Technology) (1994). Manual laboratory methods and procedures for anaerobic wastewater treatment. Wageningen Agricultural University. 20 pp.
- Elmitwalli, T.A. (2000). *Anaerobic treatment of domestic sewage at low temperature*. Ph.D. Thesis. Universidad Agrícola de Wageningen. Wageningen, Holanda. 113 p.
- Guerra, R.G., González, S.M., Trupiano, A.P., Figueroa, M.E., Seghezzo, L. y Cuevas, C.M. (2000). Perfiles de actividad metanogénica específica en un reactor UASB (reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos) utilizado para el tratamiento de líquidos cloacales presedimentados. *Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, ASADES 2000, 4 (2):06.25-06.30.

- González, S.M., Guerra, R.G., Trupiano, A.P., Castañeda, M.L., Figueroa, M.E., Seghezze, L. y Cuevas, C.M. (2000). Tratamiento anaeróbico de líquidos cloacales presedimentados en un reactor UASB (reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos) en regiones de clima subtropical. *Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, ASADES 2000, 4 (2):06.31-06.36.
- van Haandel, A.C. y Lettinga, G. (1994). *Anaerobic sewage treatment. A practical guide for regions with a hot climate*. Chichester, England. John Wiley & Sons Ltd. 226 p.
- Hulshoff Pol, L.W. (1989). *The phenomenon of granulation of anaerobic sludge*. PhD Thesis. Universidad Agrícola de Wageningen. Wageningen, Holanda. 122 p.
- van der Last, A.R.M. and Lettinga, G. (1992). Anaerobic treatment of domestic sewage under moderate climatic (Dutch) conditions using upflow reactors at increased superficial velocities. *Wat.Sci.Tech.* **25**(7),167-178.
- Liberal, V., Cuevas, C.M., Trupiano, A.P. y Bohuid, E. (1998). Determinación de constantes cinéticas en lagunas de estabilización de Salta. 6^a Congreso Argentino de Saneamiento, Rosario, Argentina y XXIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Lima, Perú.
- Marais, G.v.R. (1974). Faecal bacteria kinetics in stabilisation ponds. *Journal of Environmental Engineering Division*, 100, EE1, 119.
- Sanders, W. (2001). *Anaerobic hydrolysis during digestion of complex substrates*. Ph.D. Thesis. Universidad Agrícola de Wageningen. Wageningen, Holanda. 101 p.
- Seghezze, L., Trupiano, A.P., Castro, L. y Cuevas, C. (1995). Diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor anaeróbico de flujo ascendente UASB de planta piloto. *Actas de la XVIII Reunión Nacional de Energía Solar y Fuentes Alternativas*. ASADES.
- Seghezze, L., Zeeman, G., van Lier, J.B., Hamelers, H.V.M. and Lettinga, G. (1998). A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Bioresource Technology* **65**, 175-190.
- Seghezze, L., Castañeda, M.L., Trupiano, A.P., González, S.M., Guerra, R.G., Torrea, A., Cuevas, C.M., Zeeman, G. y Lettinga, G. (2000). Anaerobic treatment of pre-settled sewage in UASB reactors in subtropical regions (Salta, Argentina). *Actas VI Taller y Seminario Latinoamericano de Digestión Anaerobia*. Recife, Brasil, 5 al 9 de noviembre de 2000. Volumen 1, p 7-13.
- SeMADeS (Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Provincia de Salta) (2001). Resolución N° 011.
- von Sperling, M. (1996). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 3, Lagoas de estabilização*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. 134 p.
- Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1995). 19th Edition. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF). Eaton, A.D., Clesceri, L.S. y Greenberg, A.E., Editores. APHA, AWWA, WEF. Washington DC, USA.
- Wang, K. (1994). *Integrated anaerobic and aerobic treatment of sewage*. Ph.D. Thesis. Universidad Agrícola de Wageningen. Wageningen, Holanda. 145 p.
- WHO (World Health Organization) (1989). *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture*. Technical Report Series 778. Ginebra, Suiza.
- Zeeman, G. y Lettinga, G. (1999). The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level. *Water Science and Technology*, **39**(5), 187-194.

ABSTRACT

In this work, the design of a pilot plant for anaerobic-aerobic sewage treatment is presented. The plant is made of two UASB (upflow anaerobic sludge blanket) reactors in series followed by a system of five waste stabilization ponds (maturation ponds), also in series. The reactors have been designed to remove most of the organic load while the ponds will be mainly used for the removal of pathogenic organisms. The research will be conducted in the city of Salta, where mean ambient and sewage temperature are 16.5 and 21.0°C, respectively. The pilot plant will be installed in Salta's wastewater treatment plant. A pre-treatment consisting of screen and sand trap will be applied to remove dirt and sand from raw sewage. Details of design and dimensioning are presented for all treatment steps. A list of physical and chemical parameters to be monitored is presented. Expected results are summarized. The pilot plant has already been built by a local company and is presently being installed in its final location.

Keywords: Anaerobic treatment, post-treatment, sewage, UASB reactors, waste stabilization ponds.