

Tratamiento de Aguas Residuales de Café en la Cuenca de Coatepec, Veracruz, México¹

M. Castillo*, H. Bailly**, P. Violle**,
P. Pommares**, B. Sallee***

ABSTRACT

In Mexico, coffee processing via the wet method produces 42 000 tons of COD (carbon oxygen demand) over six months. This water pollution is fundamentally organic, acid, and consists of dissolved substances. Facing this problem, the Mexican government set up a system of permissions to use the water and a tax charged to be allowed to pollute. First, a diagnostic study led to measure the water volumes used (from 2.2 to 6.2 l/kg coffee cherries) and the organic load (from 2.5 to 24 g COD/l). Accordingly, an upflow anaerobic reactor combining a sludge blanket and a filter of 10 m³ of usable capacity was built in 1991-1992. Inoculated with urban sludge at the beginning of the 1992-1993 harvest, after four months of working it processed 3 kg of COD/m³ of reactor/day, with an efficiency rate of 70% and a biogas production of 7.7 m³/day. The total investment was US\$960/m³ of reactor.

INTRODUCCIÓN

El café producido en México (\pm 5 millones de sacos) se procesa por vía húmeda y genera una contaminación evaluada en 13.2 millones de metros cúbicos de aguas negras que contienen 42 000 toneladas de DQO, o sea 280 t/d, equivalente

RESUMEN

La contaminación del agua generada por la agroindustria cafetalera representa un total de 42 000 toneladas de demanda química en oxígeno (DQO) en seis meses. Este tipo de contaminación es, sobre todo, orgánica y ácida, y está constituida por elementos disueltos. Frente a este problema, el gobierno mexicano fijó montos para pagar el uso del agua y el derecho para descargar las aguas residuales. En una primera etapa, un diagnóstico permitió determinar los volúmenes de agua utilizados (entre 2.2 l/kg y 6.2 l/kg de café cereza) y la carga orgánica (entre 2.5 g y 24 g de DQO/l). De acuerdo con estos valores, un reactor anaerobio piloto híbrido (lecho de lodos y filtro anaerobio) de 10 m³ útiles fue instalado en 1991-1992. Se inoculó con lodos urbanos al principio de la temporada 1992-1993, y se procesaron, cuatro meses después de funcionamiento, 3 kg de DQO/m³ de reactor por día, con un rendimiento aproximado del 70%, y produjo 7.7 m³ de biogás por día. La inversión total fue de US\$960/m³ de reactor.

Palabras clave: Descontaminación de aguas, café, digestión anaeróbica.

a los efluentes de una ciudad de 5.6 millones de habitantes. Las autoridades nacionales han impuesto normas drásticas para desalojar las aguas residuales de los beneficios húmedos (plantas procesadoras de café por vía húmeda). Sin embargo, el sector dedicado a esa actividad tiene dos problemas fundamentales: una crisis económica aguda y ausencia de propuestas tecnológicas adecuadas y probadas.

Esta problemática se retomó dentro del proyecto de Investigación-Desarrollo de SARH/CIRAD, cuyo tema fuerte es el apoyo a las organizaciones cafetaleras en cooperativas.

Se presenta en este estudio el análisis global del problema que condujo a la construcción de una planta-piloto para el tratamiento de aguas residuales y su evaluación económica y técnica.

El beneficio húmedo consume cantidades variables, pero siempre importantes de agua; dos opera-

¹ Recibido para publicación el 18 de octubre de 1993.
Texto original en español de la comunicación presentada en el XV Coloquio Científico Internacional sobre el Café, Montpellier, Francia.

* Asesor privado

** Voluntarios del Servicio Nacional en la Secretaría de Relaciones Exteriores de Francia.

*** Investigador CIRAD-CP en el Proyecto Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH)/Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD), Xalapa, Apartado Postal #391, 91000 Xalapa, Veracruz, Méx.

ciones fundamentales usan casi el total de agua: despulpado y lavados. Sin embargo, todos los beneficios no tienen el mismo impacto sobre los cuerpos de agua. Además de los beneficios artesanales, se pueden definir otros tres tipos según la capacidad instalada. Así, sólo el 27% de los beneficios concentran el 66% de la producción y generan cerca del 70% de la contaminación total (INMECAFE 1991).

Las aguas residuales del beneficiado húmedo de café contienen una alta contaminación orgánica especialmente disuelta (Cuadro 1). Cada quintal de café procesado genera entre 6 kg y 8 kg de DQO (Wasser 1991). Esta materia orgánica está constituida princi-

palmente por azúcares y sustancias pécticas y tiene capacidad biodegradable (valor de DBO a cinco días cercano al valor de la DQO). También hay que notar la gran variabilidad de los datos por los diferentes volúmenes utilizados de agua.

La concentración de los beneficios en las regiones cafetaleras provoca importantes problemas de abastecimiento de agua potable durante la cosecha. Por ejemplo, en la zona cafetalera de Coatepec (más o menos 500 km² en el Estado de Veracruz), se concentran 118 beneficios húmedos que consumen 900 000 m³ de agua por cosecha y procesan 500 000

Cuadro 1. Estructura porcentual de la agroindustria de café en México (proceso húmedo).

	Rural	Semi/industrial	Industrial	Total
Tipo de beneficio*	< 90 Qq/j	90 a 240 Qq/j	> 240 Qq/j	
Número total de beneficios	73%	20%	7%	100%
Capacidad instalada	34%	34%	32%	100%

* 1 Qq = 45.4 kg de café oro = ± 250 kg de café cereza

Cuadro 2. Composición de las aguas residuales del beneficiado de café.

	Tipo de agua analizada	pH	D.B.O.5 (mg O ₂ /l)	D.Q.O (mg/l)	S.T. (mg/l)	S.D.F (mg/l)	Fuente bibliográfica
Col	despulpado	5		24 800	19 893	18 552	ZULUAGA 1989
Méx	despulpado	5.3	1 659	8 124	5 917	5 265	INMECAFE 1988
Méx	despulpado	6	5 000	10 000	8 500	7 500	BAILLY <i>et al.</i> 1992
Méx	despulpado	4.7	19 000	24 000	19 000	15 500	BAILLY <i>et al.</i> 1992
Col	lavado	4.4		15 465	10 685	9 377	ZULUGA 1989
Méx	lavado	4.7	1 635	8 348	6 294	4 998	INMECAFE 1988
Méx	1° lavado	3.9	8 900	17 000	16 500	12 500	BAILLY <i>et al.</i> 1992
Méx	2° lavado	4.5	3 500	5 400	3 800	3 500	BAILLY <i>et al.</i> 1992
Méx	3° lavado	4.8		2 500	2 600	1 600	BAILLY <i>et al.</i> 1992
Col	despulpado y lavado	4.7	6 083	15 450	741	410	ARIAS <i>et al.</i> 1987

Notas:

DBO 5: demanda biológica en oxígeno a cinco días
 ST: sólidos totales
 DQO: demanda química en oxígeno
 SDT: sólidos disueltos totales

Qq de café. Además, el carácter temporal de la cosecha (100 d a 150 d entre octubre y marzo) aumenta el efecto de esta contaminación. Durante este período se desarrolla una fuerte competencia entre las necesidades del beneficiado y del uso doméstico.

Por otra parte, la contaminación repercute sobre la calidad del café. Los beneficios están situados a lo largo de los ríos, y los ubicados río abajo trabajan con agua contaminada.

En el Cuadro 3 se puede distinguir que la mayoría de los países reportan consumos elevados de agua, porque no había sido hasta entonces un recurso limitado. Además, el gasto de agua es muy variable de un beneficio a otro (según el tipo de maquinaria utilizada y la organización del trabajo), pero también lo es dentro de un mismo beneficio, según el operador y la cantidad de café del día.

En los últimos años, se ha dado una serie de medidas para regular este asunto. En el nivel legal, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) (ya desaparecida, sus funciones en relación con la ecología pasaron a la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y a la Comisión Nacional del Agua (CNA)) definió la norma de descarga para beneficios húmedos de café (Bailey *et al.* 1992). Desde el punto de vista económico se establecieron montos de pago por el uso de agua (aun de manantial o bombeo en los ríos, que antes no se pagaban), y por el derecho de descargar las aguas residuales. Actualmente, la Comisión Nacional del Agua (CNA) y la Procuraduría Federal para el Ambiente (PROFEPA) se encar-

gan de la aplicación de la nueva Ley de Aguas Nacionales, publicada en diciembre 1992.

Una de las consecuencias inmediatas por la aplicación de la nueva legislación es que el abastecimiento y la contaminación del agua aparecen ahora en los costos de transformación del café.

Según lo indicado en la ley, el país está dividido en cuatro zonas de acuerdo con la disponibilidad creciente de agua. Todas las regiones cafetaleras se ubican en la zona 4, con altos recursos hidráulicos y derechos baratos. Si se toma en cuenta un consumo promedio de 8 l/kg de café cereza, se calcula que cada 250 kg de café cereza generan de 6 kg a 8 kg de DQO y 10 kg de sólidos totales (Wasser 1987). El costo para procesar 250 kg de café cereza (± 1 Qq) será de US\$0.29, con la inclusión del uso de agua y los derechos de descarga, lo que representa de 3.6% a 6.1% del costo total del proceso. Si se reduce el consumo de agua a 2 l/kg de café cereza, el costo baja a US\$0.13 centavos.

De 1991 a 1993, el costo de la Ley Nacional del Agua fue multiplicado por tres. La firma del Tratado de Libre Comercio de Norteamérica (NAFTA) acentuará esta tendencia con las exigencias ecológicas estadounidenses.

Además, los beneficios pueden también ser sancionados con multas entre US\$250 y US\$50 000, según la gravedad de la falta, las condiciones económicas del infractor y la reincidencia. Sin embargo, esta presión económica no es todavía suficiente para pro-

Cuadro 3. Consumo de aguas en el beneficiado de café cereza (l/kg).

	Despulpado	Lavados	Total	Fuente
Col	1.8	1.2	3.0	ZULUAGA 1989
Col	7.8	4.8	12.0	ZULUAGA 1989
Méx	2.0	1.0	3.0	INMECAFE 1988
Méx	2.3 a 4.3	1.7	4.6 a 6.0	BAILLY <i>et al.</i> 1992
Méx	5.0	11.8	16.8	Medidas propias 1993
Kenia			20.0	FINNEY 1989
Nicaragua	6.0	3.6	9.6	Medidas propias 1988

mover inversiones en el ahorro de agua y menos en el tratamiento de la descontaminación.

En la zona, existen varias instalaciones de tratamiento:

Empresa	Tipo de proceso
Chocaman	Físico-químico y filtración (Morales 1989).
Xalatlá	Filtración.
Bola de Oro	Anaerobio, primera generación (Rivero 1989).
Puerto Rico	Físico-químico

Es importante señalar que la mayoría de estas instalaciones tienen dificultades de funcionamiento: Bola de Oro sólo trata aguas de lavado; Puerto Rico y Chocaman han sido abandonadas o modificadas debido al alto costo de operación. De estos datos se desprende que los esfuerzos por generar un paquete tecnológico, acorde a las condiciones locales, han sido aislados y actualmente no existe un paquete comercial definido. Ante las nuevas presiones de la ley ambiental, un sector élite parece inclinarse por importar tecnologías de países desarrollados como la solución más real y menos riesgosa, pero se ha visto limitado por el costo de las asesorías y la crisis de los bajos precios que vive el sector cafetalero.

De manera general, los diagnósticos concuerdan en que el gasto de agua es elevado (en volumen) en el beneficiado del café. Además, para lograr un tratamiento eficiente y rentable de las aguas residuales, es indispensable concentrar la contaminación. Se pueden considerar dos maneras de ahorrar agua: reorganizar el proceso para disminuir el consumo final (despulpado en seco, por ejemplo) o promover la recirculación.

El propósito de este trabajo fue buscar un sistema de tratamiento de aguas usadas por medio de un análisis de factibilidad técnica y económica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El beneficio Tlapexcatl fue construido en 1986 por un grupo de caficultores minifundistas agrupados en la Sociedad de Producción Rural Beneficio Tlapexcatl, miembro de la Red de Organizaciones Cafe-

taleras Autogestivas (ROCA). Se ubica en el municipio de Cosautlán de Carvajal (Veracruz); el beneficio está a una altura de 1100 msnm a 20 min por el camino de terracería del pueblo más cercano y a hora y media de la capital del estado, Xalapa.

Tiene una capacidad de 33 Qq/d; procesa en promedio 400 t de café cereza (± 1600 Qq) por cosecha; con ingresos totales entre US\$50 000 y US\$100 000. En un año promedio, funciona durante 120 días con 25 días sin acopio, y proporciona entradas de 5 t a 10 t de cerezas por día durante dos semanas de enero.

El agua proviene por bombeo de un arroyo, adonde regresa después de usarse. La recepción de las cerezas se hace dentro de un sifón ($V_{\text{sifón}} = 7 \text{ m}^3$). Para procesar un kilogramo de cereza se necesitan entre 5 l y 17 l de agua, según el operador y la cantidad de café del día.

Existen tres tipos de sistemas de tratamiento (Fernández 1977):

—El primer tipo es físico-químico y utiliza filtros y productos coagulantes (como la cal, por ejemplo). Con estos productos, se sube el pH hasta 12, para obtener una reacción química que forme compuestos de tipo coloidal e insolubles, aptos para flocular. Los compuestos se separan por sedimentación y filtración.

—Los otros dos tipos son tratamientos llamados biológicos, porque utilizan la contaminación del agua, o sea, la materia orgánica como sustrato para el crecimiento de microorganismos.

El proceso aerobio necesita, como el tratamiento físico-químico, grandes tanques de almacenamiento y agitación para ser eficientes; eso requiere usar mucha energía. Además, estos dos sistemas de descontaminación generan una cantidad importante de lodos, los cuales hay que procesar.

El proceso anaerobio consiste en transformar la materia orgánica en metano y CO_2 con microorganismos anaerobios.

Esta última técnica se presenta como la más apta para resolver esos problemas, porque consume muy poca energía, produce poco lodo y genera biogás combustible, directamente utilizable en el sitio de producción.

Si se considera un consumo de agua de 2 l/kg de cereza, un objetivo realista para una política de ahorro de agua, con un acopio promedio de 20 Qq/d con una contaminación generada de 6 kg a 8 kg de DQO/Qq, sería necesario tratar 10 m³ por día con una carga promedio en DQO de 12 000 mg de O₂ por litro. Sin embargo, actualmente, el beneficio Tlapexcatl utiliza un promedio de 8 l de agua por kilogramo de café cereza, con una carga promedio de 3000 mg de O₂ por litro.

Se escogió construir un digestor anaerobio-piloto de 10 m³ útiles, para tratar la totalidad de las aguas residuales de un beneficio rediseñado para el ahorro de agua (la cuarta parte del consumo actual promedio diario), y con un tiempo de trabajo con retención de un día, suficiente para procesar una carga de 3 kg de DQO/m³ de digestor, con una eficiencia del 80 por ciento. Se construyó un tanque de almacenamiento de 36 m³, para abastecer las importantes cantidades de agua durante el máximo de producción. Un tratamiento aerobio de último toque se previó para llegar a una eficiencia total del 95% (Fig. 1).

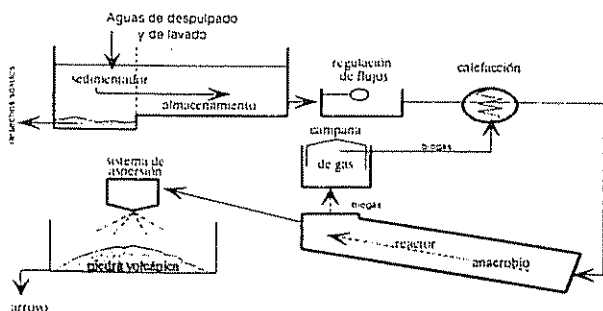


Fig. 1. Esquema del sistema de tratamiento de las aguas residuales del beneficio Tlapexcatl.

—Tanque de almacenamiento ($V = 36 \text{ m}^3$). Se compone de dos partes: la primera, más honda de 50 cm, como sedimentador para los elementos sólidos mayores. También de reserva para almacenar los altos flujos instantáneos y, además, de importancia biológica.

—Tanque de regulación ($V = 0.25 \text{ m}^3$). Presentó un sistema de flotadores para mantener un nivel constante. Todo el proceso de tratamiento se manejó por gravedad. Fue necesario un desnivel entre la entrada y la salida del digestor con el fin de man-

tener un flujo constante, utilizando únicamente válvulas.

—Sistema de calefacción ($V = 40 \text{ l}$). Es un calentador doméstico con termostato, que se alimentó con butano durante la fase de arranque y después con biogás. Calentó las aguas residuales de 15°C y 20°C hasta 23°C y 25°C, para mantener una buena actividad bacteriana.

—Digestor anaerobio ($V_{\text{Total}} = 13 \text{ m}^3$, $V_{\text{útil}} = 10 \text{ m}^3$). Es un digestor híbrido, compuesto de dos partes separadas por una parrilla porosa, un lecho de lodo tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) en la parte baja y un sistema tipo filtro anaerobio en la parte alta (1/3 del volumen total o sea 4 m³), constituido por un empaque de piedras volcánicas. Este filtro permitió retener los sólidos en suspensión al aumentar su tiempo de digestión.

Se construyó localmente en fibra de vidrio. Se aisló con una capa de 2 cm de poliestireno y se enterró. El proceso de tratamiento a lo largo del reactor se hizo por medio de 13 tubos de muestreo. Se siguió la pendiente del terreno con una inclinación de 20°, para bajar los costos y supuestamente mejorar la mezcla en la cama de lodos y aumentar el contacto bacteria-materia orgánica.

—Campana de gas ($V = 7 \text{ m}^3$, en baja presión). Es un cilindro de lámina tapado del lado superior y se desplaza en un tanque de agua al llenarse de biogás. Está conectada al calentador.

—Sistema de aspersión ($S = 25 \text{ m}^2$). Contiene 6 m³ de piedras volcánicas como filtro aerobio. Al salir del digestor, el agua se almacena en un tanque de PVC ($V = 750 \text{ l}$); cuando está lleno, el tanque se vacía automáticamente gracias a un sistema de sifón. El agua cae en forma de lluvia (para cargarse de O₂) sobre una pila de piedras, en las cuales una capa de microorganismos aerobios digiere la DQO restante. Por último, el agua regresa al arroyo. Con esto, se piensa llegar al 95% de descontaminación.

RESULTADOS

No rebasar el costo de construcción fue el principal problema (< US\$1000/m³ del reactor). Por ejemplo, la circulación del agua se hace mediante grave-

dad, aprovechando la pendiente natural del terreno. Todos los tanques se construyeron con materiales tradicionales de construcción (piedra, tabique y cemento). El digestor se hizo con fibra de vidrio y resina de poliéster por su bajo costo y porque, al pasar a una escala mayor de fabricación (> 10 unidades), se usarían moldes para disminuir los tiempos y costos de construcción.

Como todo proceso biológico, el tratamiento anaerobio de aguas residuales requiere un periodo de arranque, antes de llegar a su capacidad máxima, es decir, mientras las bacterias del inóculo se adaptan al medio y se multiplican. De ese modo, la dificultad reside en encontrar un buen inóculo, el cual, en general, debe tener la más alta actividad metanogénica posible y la capacidad de sedimentación suficiente para evitar su arrastre. Lo ideal sería utilizar bacterias de una planta similar. Wasser *et al.* (1991) probaron cuatro fuentes de lodos: estiércol digerido, lodo de tanque séptico, fangos de río y sedimentos de lagunas, en orden de accesibilidad y disponibilidad decreciente. El mayor problema es la baja actividad metanogénica de estos inóculos y, para el estiércol digerido, y utilizado comúnmente, es el fuerte arrastre. Para este trabajo, el lodo de tipo tanque séptico es más apto por su buena capacidad de sedimentación (importante para todo digestor que tiene un lecho de lodo). Así, el digestor Tlapexcatl fue inoculado con 8 m³ de lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas negras urbanas, tipo tanque séptico de Xalapa, Ver.

El sistema total costó US\$960/m³ del volumen total del digestor, de los cuales 33.7% corresponden al costo del puro reactor, es decir, US\$323 por metro cúbico. El resto incluye las obras civiles y la inoculación.

La inoculación del digestor se hizo en dos etapas. Una primera inoculación de 8 m³ se realizó en febrero de 1992, seguida de una corta fase de arranque (tres semanas) con trastornos por problemas de acidificación, principalmente, y un arrastre de lodos importante. En diciembre de 1992, al empezar la nueva cosecha, fue reinoculado con 750 l de lodos.

La evaluación empezó en enero de 1993. El principal parámetro elegido fue la eficiencia, que es la disminución relativa de la carga orgánica (DQO= mg O₂/l) entre afluente y efluente, los dos no filtrados. Un problema de flujo impidió calcular diariamente

los tiempos de retención hidráulica (TRH). Por eso, se calculó un TRH promedio durante la cosecha de tres días. Para determinar la eficiencia de un día X, se tomó la carga orgánica promedio del afluente de ese día y de los dos anteriores (DQO entrada), a la cual se le retiró la carga orgánica promedio del efluente del día X y de los dos siguientes (DQO salida). Esa cantidad se dividió entre los DQO de la entrada y se obtuvo la curva de eficiencia de la Fig. 2.

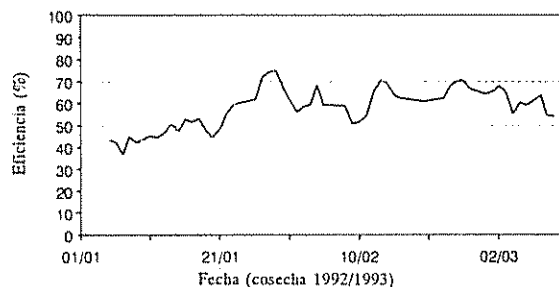


Fig. 2. Eficiencia del reactor anaerobio Tlapexcatl, calculada sobre una base de Tiempo de Retención Hidráulica de tres días.

Aproximadamente en un mes se alcanzó una eficiencia máxima de poco más del 70%, pero con cargas bastante débiles (0.5 kg a 1 kg de DQO/m³ de reactor por día). Después, se observó una disminución de la eficiencia por una sobrecarga (evaluada en 4 kg DQO/m³/d). El sistema se cerró durante tres días para su recuperación. Luego se trabajó con cargas, que fluctuaban entre 1.5 kg DQO/m³/d y 3 kg DQO/m³/d; la eficiencia se mantuvo entre 60% y 70%, y disminuía hasta 50% cuando la carga era demasiado importante. La producción de gas varió con la eficiencia y la carga que entraba. De acuerdo con las observaciones realizadas, se llegó a una producción máxima de 7.7 m³/d, o sea 0.77 m³ de biogás por metro cúbico de reactor por día, que corresponde al tratamiento de 3.0 kg DQO/m³/d con una eficiencia del 70 por ciento. El biogás presentó una composición en metano, que fluctuó entre 76% y 82 por ciento.

El tanque de almacenamiento se fabricó con varios propósitos. El primero fue disminuir la carga orgánica promedio de las aguas residuales (de 5500 a 6000 mg de DQO/l en la entrada del tanque de almacenamiento, mezcla de aguas de despulpado del primer lavado con las del segundo) con el efecto conjugado de dos fenómenos que son la sedimentación de

las partículas más pesadas y la flotación de las más ligeras para formar una nata. La DQO del agua se reduce así en algunas horas alrededor del 30 por ciento. Estos fenómenos pueden aumentarse considerablemente (hasta una reducción de 50%) con la adición de cal o cualquier otro alcalinizante.

Además, el tanque de almacenamiento desempeña otro papel; empieza la primera fase del proceso microbiológico que consiste en la hidrólisis de moléculas complejas del afluente en moléculas más simples, directamente utilizables por las primeras bacterias de la digestión anaerobia. Si el tiempo de retención del tanque es suficiente, se inicia el proceso de acidificación con la transformación de las moléculas simples en ácidos grasos volátiles (AGV) por sustratos de las bacterias metanogénicas. Así, se considera que con un pH ligeramente ácido (5 a 6) y un poco de alcalinidad, condiciones a las que se llega al agregar alcalinizantes como sosa (NaOH), el tanque de almacenamiento tiene una eficiencia más o menos del 6% por día, por esa actividad microbiológica.

Dos problemas mayores destacan después de una cosecha:

- El manejo de flujo de la alimentación del digestor, ligado al caudal de carga orgánica.
- El control del pH de las aguas de entrada (afluente).

Estos problemas tienen una incidencia muy importante sobre el funcionamiento óptimo del reactor.

Los problemas de flujo se deben a la necesidad de disminuir al máximo los costos de instalación, aprovechando la gravedad. No obstante, el funcionamiento del digestor está sometido a varios fenómenos de presión entre aguas y gas, regidos por la posición de cada elemento del sistema frente al reactor. La actividad microbiológica del mismo reactor, es decir la producción de gas, y la distribución de los lados dentro del digestor trastornan la alimentación continua. En estas condiciones es imposible obtener un flujo constante. Las tuberías se tapan con gas o con lodos pesados que se sedimentan cuando se cierra el digestor. La única solución consiste en instalar una pequeña bomba eléctrica ajustable a nivel del flujo, para estabilizar el flujo y conocer perfectamente las cantidades de DQO que entran diariamente al reactor.

El problema de control de pH es otro punto crucial del manejo del sistema. Al salir del beneficio, las aguas tienen un pH promedio de 6, pero rápidamente baja hasta 5 con los procesos de hidrólisis y acidificación al consumir toda la alcalinidad presente en el agua. Normalmente, un digestor anaerobio funciona con un afluente a pH entre 6.5 - 7.0. Para las aguas de café, es necesario añadir mucho alcalinizante, lo que conduce a un costo elevado de operación. Sin embargo, la neutralización, aunque parcial, es indispensable en el funcionamiento del digestor. Por eso, se decidió manejar el sistema a un pH alrededor de 5.0 - 5.5. Para llegar a esto, se bajó progresivamente el pH del afluente de 6.5 a 5.0, y poco a poco se seleccionaron las bacterias más adaptadas a este medio. Se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) para neutralizar, en lugar de cal, para evitar el relleno del reactor con materia inorgánica (CaCO₃). Además, al añadir sosa se aumentó la alcalinidad del afluente, que permitió proseguir el proceso de acidificación del tanque de almacenamiento.

Se controla la actividad metanogénica del reactor midiendo la cantidad de AGV presente en el efluente. Cuando la carga entrante es más alta de lo que puede procesar el ecosistema microbiano, los AGV y el hidrógeno se acumulan, el pH disminuye y el proceso se desestabiliza. Si el digestor está correctamente dimensionado y alimentado, este tipo de accidente no ocurre. Hay que aumentar la vigilancia cuando se trabaja con cargas altas (Moletta 1993).

Con el diseño del reactor (inclinado a 20°) también podrían existir problemas de repartición de los lodos dentro del digestor. Para evitar este problema, periódicamente se abrieron todas las entradas para obtener una expansión máxima de los lados. Además, al final de la cosecha, se notó un arrastre de lodos en el efluente por las burbujas de gas que afectaban la sedimentación normal del lecho de lodos. Aunque en cantidad menor, este arrastre podría recuperarse al instalar un sedimentador en la salida del digestor para recircular una cierta parte (por determinar) del efluente. Eso permitiría trabajar con flujos más altos, aprovechando la fuerte alcalinidad del efluente para neutralizar parcialmente las aguas de entrada.

La finalidad de este proyecto es lograr que los empleados del beneficio manejen el sistema. Durante esta cosecha, se capacitó al encargado del beneficio en el control del digestor, pero como se trata de un

sistema biológico bastante sensible, aunque el encargado del beneficio entendiera cómo se manejaba el reactor, el funcionamiento óptimo del sistema no fue posible sin un seguimiento diario de la entrada para controlar el pH, la carga y ajustar el flujo de acuerdo con la capacidad del digestor. Lo más factible sería que un laboratorio especializado atendiera varios sistemas de este tipo en una misma zona.

CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

La instalación de una planta-piloto de tratamiento de agua permitió experimentar una nueva alternativa de solución al problema de contaminación, generado por la agroindustria cafetalera. Sin un costo importante de instalación y compatible con las exigencias económicas de los beneficios húmedos (el costo es de US\$960/m³ de reactor instalado), la eficiencia alcanzó 70% en el digestor y 85% al tomar en cuenta el sistema entero con el tanque de almacenamiento, con un TRH total de seis días. Sin embargo, el digestor se diseñó para tratar las aguas residuales del beneficio, procesando café con un consumo de 2 l/kg de cereza. En la actualidad, el beneficio Tlapexcatl tiene un consumo promedio de 8 l; consecuentemente, el sistema instalado trata solamente una cuarta parte de las aguas totales.

La estrategia de descontaminación no puede disociarse de una redefinición del proceso tecnológico del beneficiado en función del ahorro de agua, pues más vale tratar una contaminación concentrada que una diluida, especialmente con el propósito de aumentar los TRH. Por ejemplo, se puede tener una carga de 20 kg de DQO con 5 m³ de agua que comprende 2000 mg DQO/l o con 5 m³ de agua, con 4000 mg DQO/l. En el primer caso, se tiene un TRH de un día mientras que en el segundo, de dos días con una eficiencia mayor. De acuerdo con las nuevas leyes que rigen el uso y la descarga de agua, invertir en sistemas integrados de beneficiado de café con bajo consumo de agua y su descontaminación antes de descargarla, puede ser rentable.

Además, los resultados de esta planta-piloto, después de una sola cosecha, pueden perfeccionarse, por un lado, con la especialización de las bacterias y, por otro, con el mejoramiento de cada elemento del sistema. En la última fase aerobia del proceso de descontaminación se debería llegar al 95% de eficiencia global, de acuerdo con el objetivo inicial.

LITERATURA CITADA

- ARIAS, U. R.; NIGIANI, R. 1987 Tratamiento anaeróbico y reutilización de las aguas residuales de lavado de café en reactores UASB a temperatura entre 20-25°C. In Simposio Internacional sobre Utilización Integral de los Subproductos del Café (3., 1987, Gua.) PNUMA/ANACAFE/ICAITI (Gua.) p. 111-121.
- BAILLY, H.; SALLEE, B.; GARCIA, G.S. 1992 Proyecto de tratamiento de aguas residuales de beneficios húmedos. *Café Cacao Thé* (Paris) 36(2): 129-136.
- COMISION NACIONAL DE AGUA. 1991 Ley de aguas nacionales. *Diario Oficial de la Federación* (Méx.) 77 p.
- FERNANDEZ, U.M. 1977 Evaluación de los sistemas para tratar las aguas residuales del beneficiado de café. San José, C.R., Oficina del Café, Departamento de Estudios Técnicos y Diversificación. 24 p.
- FINNEY, A. 1989 Technologie de traitement du café Arabica "fully washed": Notes sur les pratiques d'usage appliquées en plantations privées en Afrique Orientale. I. Technologie de dépulpage, fermentation et lavage. *Café Cacao Thé* (Paris) 33(2):117-124.
- INMECAFE (INSTITUTO MEXICANO DEL CAFÉ) 1988. Gerencia de operaciones.
- INMECAFE (INSTITUTO MEXICANO DEL CAFÉ) 1991 Evaluación sobre el problema de aguas residuales en los beneficios húmedos de café. In *Foro del Café*, Xalapa, Méx. 57 p.
- MOLETTA, R. 1993. La digestión anaerobia: Du plus petit au plus grand. *Biofutur* (Paris) 119:16-25.
- MORALES, J.J. 1990 Tratamiento de aguas residuales, reutilización y prensado de la pulpa en el beneficio de café. Seminario Internacional sobre Biotecnología en la Agroindustria Cafetalera (1., 1989, Xalapa, Méx.). Instituto Mexicano del Café, Universidad Autónoma Metropolitana, ORSTOM (Méx.) p. 77-93.
- RIVERO, F.L.; FERNANDEZ, V.A. 1989 Diseño, construcción, operación y evaluación de un filtro anaerobio piloto para el tratamiento de las aguas residuales provenientes de beneficios de café. Tesis. Xalapa, Méx., Universidad Veracruzana. 209 p.
- SALLEE, B.; PASQUIS, R.G.; BERHOCOIRIGOIN, F. 1989 Méthodologie de recherche-développement dans le bassin caféier Xalapa, Coatepec, Mexique. In *Colloque Scientifique International sur le Café* (13., Paipa, Col.). ASIC (Paris) p. 627-637.
- WASSER, R.; OROZCO, S.C.; CANTARERO, P.V.R.; MESIAS, R.O. 1991 Experiencias sobre el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del café en Matagalpa, Nicaragua. In *Seminario-Taller sobre Tratamiento de Aguas Residuales Agroindustriales* (Cali, Col.) 13 p.
- ZULUAGA, V.J.; COOKMAN, G.P. 1987 Un sistema de filtro anaeróbico de flujo ascendente (UAF) para la biodigestión de aguas residuales del beneficio de café. In *Simposio Internacional sobre Utilización Integral de los Subproductos del Café* (3., Gua.) PNUMA, ANACAFE, ICAITI p. 122-128.