

CAPÍTULO

**Tratamiento Anaeróbico
de Aguas Residuales**

8





TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE AGUAS RESIDUALES ⁵⁰

Como se indicó en la Sección 1.2. Cenicafé en 1983 estableció dos líneas de investigación simultáneas para dar respuesta al problema de la contaminación por causa de las aguas residuales de beneficio húmedo del café, como se practica tradicionalmente en Colombia; la primera consistió en cuestionar y proponer alternativas para todas las etapas de beneficio que ocasionan la contaminación iniciando los trabajos de diseño y evaluación del desmucilagador, lavador, limpiador, DESMULACLA (14, 150), lo que resultó en la nueva tecnología BECOLSUB presentada en las secciones anteriores de este libro. La segunda consistió en tratar las aguas contaminadas por medio de bioreactores anaeróbicos en donde bacterias metanogénicas se encargan de minimizar la carga orgánica contaminante. Se presentan en ésta sección avances de esta tecnología.

8.1. SISTEMA MODULAR DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO DE AGUAS RESIDUALES DE BENEFICIO DEL CAFÉ - SMTA ⁵¹

Desde el mes de Noviembre de 1984 Cenicafé intensificó los estudios de descontaminación de aguas residuales del proceso de beneficio húmedo de café, a través del proyecto de biodigestión anaeróbica llevado a cabo entre la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y la firma T. Wiles and Associates del Reino Unido (40), la cual prestó su asesoría hasta el año de 1989.

Toda la información generada durante este último estudio, ha permitido llegar a proponer un **Sistema Modular de Tratamiento Anaeróbico** SMTA (Figuras 137 y 138), el cual es el prototipo propuesto y evaluado actualmente por Cenicafé como planta de tratamiento de aguas residuales de lavado del café, cuyo aporte contaminante corresponde a la cuarta parte de la contaminación que generan los subproductos del proceso de beneficio húmedo de café (195, 196).

⁵⁰ Preparado por Zambrano, F. D. y Rodríguez V, N. Química Industrial, Cenicafé.

⁵¹ Para obtener los más avanzados datos sobre este tema se recomienda revisar el documento recién publicado (Septiembre, 1999) sobre **Tratamiento de Aguas Residuales del Lavado del Café** (197).



Figura 137. Reactores hidrolítico y metanogénico del sistema de descontaminación de aguas residuales del lavado del café (194).

A partir de 1995 un SMTA consta de una unidad de 8.000L fabricada en plastilona que hace las veces de tanque de almacenamiento y reactor hidrolítico y de una unidad de 2.000L ó reactor anaeróbico (189), que permiten la depuración del agua contaminada a expensas de microorganismos anaeróbicos que consumen la contaminación presente en el agua residual. Un SMTA contempla la separación de fases hidrolítica acidogénica de la fase metanogénica, la cual combina las tecnologías de flujo ascendente, manto de lodos UASB y filtro anaeróbico UAF (194).

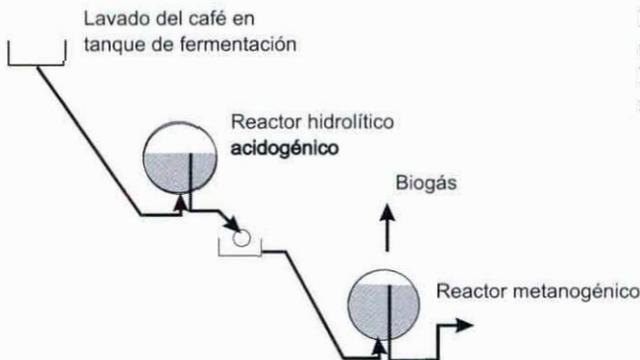


Figura 138. Esquema del sistema de tratamiento de aguas de lavado del café, por medio de reactores metanogénicos.

Tabla 55. Caracterización de la borra del café procedente de la Fábrica de Café Liofilizado, Chinchiná, utilizada para preparar el manto de lodos anaeróbicos.

| Parámetro | Unidad | Valor | Método |
|-------------------------------|----------------------------------|-------|----------------------------|
| Humedad | (% b.h.) | 77,7 | 105 C, 16 h. |
| Nitrógeno Total | (% b.s.) | 1,7 | Kjeldah |
| Cenizas | (% b.s.) | 0,2 | 575 C, 2 h. |
| Fósforo | (% b.s.) | 0,06 | Colorimétrico. |
| Potasio | (% b.s.) | 0,07 | EAA |
| Calcio | (% b.s.) | 0,03 | EAA |
| Magnesio | (% b.s.) | 0,01 | EAA |
| Hierro | (ppm) | 101 | EAA |
| Manganeso | (ppm) | 7 | EAA |
| Zinc | (ppm) | 8 | EAA |
| Cobre | (ppm) | 30 | EAA |
| Boro | (ppm) | 7 | Colorimétrico |
| Níquel | (ppm) | <0,7 | ICP |
| Sólidos Volátiles | (% b.s.) | 99,8 | 575 C, 2 h. |
| Sólidos Suspendidos | (% b.s.) | 97,0 | GF/C: 1.2um 105 C, 16 h |
| Sólidos Suspendidos Volátiles | (% b.s.) | 96,8 | 2g, 600 C, 3h |
| DQO | (g O ₂ /g borra seca) | 1,3 | Dicromato |
| pH | (Lodo al 6% en peso) | 3,6 | pH Metrohm |
| Titulación al pH 7.5 | (mg NaOH/g borra seca) | 2,3 | |
| Grasa | (% b.s.) | 26,0 | No reportado |
| Fibra | (% b.s.) | 48,0 | No reportado |

Para preparar el manto de lodos UASB se utiliza borra de café, subproducto de la Fábrica de Café Liofilizado ubicada en el municipio de Chinchiná; en la Tabla 55 se presentan las características de la borra de café, subproducto de la extracción del café soluble.

El filtro anaeróbico UAF está conformado por anillos de polietileno reciclado de baja densidad (0,925g/cc), de 4 cm de longitud, área específica de contacto de 171m²/m³ de reactor, conformando un medio empacado con una porosidad del 78%.

En la actualidad el SMTA instalado en Cenicafé funciona con los residuos de lavado de café procedentes del beneficio para el pequeño caficultor donde el consumo máximo de agua es de 5L/kg cps y donde además se han adoptado el despulpado y transporte de pulpa sin agua y el lavado del café en los tanques de fermentación tradicional adaptados a **Tanques tina**, utilizando para ello cuatro enjuagues de la masa lo que permite tener dicho consumo de agua y alcanzar concentraciones de los residuos superiores a 25,000ppm de DQO (187). En los SMTA se requiere neutralizar las aguas residuales y balancear químicamente el lodo que contiene los

microorganismos sólo durante el arranque. Después de estas etapas preliminares todo el proceso de descontaminación lo efectúan los microorganismos.

Los **primeros modelos de SMTA instalados por Cenicafe en fincas aledañas al municipio de Chinchiná, Caldas** (Figura 137), se probaron con éxito tratando en el día pico hasta 20kg de Demanda Química de Oxígeno (DQO), contenidos en un volumen máximo de 700L de agua residual de lavado, los cuales se originan durante el lavado del café procedente de 750kg de café en cereza. Dicha cantidad de café producida en el día pico equivale al 2% de la cosecha anual estimada para una finca cuya producción sea de 7,8 ton (625@) cps/año, lo cual se da en un poco más del 80% de los cafetales colombianos con áreas menores a 5 hectáreas, asumiendo cafetales tecnificados (189).

En 1994 las eficiencias alcanzadas por los SMTA de la zona de Chinchiná, alcanzaron en promedio una remoción del 92,3 % de la contaminación expresada como DQO (60), equivalente en términos de DBO5 y superior a la exigida por la Legislación Colombiana en el Decreto 1594 de 1984 (102) (Tabla 56) .

Durante este mismo año el primer modelo de SMTA instalado en Cenicafe mostró una remoción promedio de 88,5 %. Una evaluación realizada durante una prueba de esfuerzo, simulando 47 días pico continuos y lavando diariamente el café procedente de 600kg de café en cereza, mostró una remoción neta del 90,7% de la contaminación, lo que corresponde a aplicar una carga de 8,2kgDQO/m³.día (130). La Tabla 57 muestra la caracterización efectuada a las corrientes líquidas del SMTA durante esta prueba de esfuerzo.

El mayor inconveniente que se tuvo en los primeros modelos de los SMTA para evitar las sobrecargas que originaban las fallas, fue el sobredimensionamiento que presentan los tanques fermentadores tradicionales, lo cual permite retener una mayor cantidad de café en baba para fermentar y originar volúmenes de agua superiores a los previstos para tratar diariamente en estos sistemas. A lo anterior se sumó el descuido por parte de los usuarios que no mantienen limpias las tuberías y lavan las máquinas de aspersión dentro de los tanques de fermentación, contenido tóxico que va luego a los SMTA ocasionándoles temporalmente un funcionamiento deficiente.

Tabla 56. SMTA prototipos instalados en finca y promedios de remoción de DQO estimadas. 1994.

| FINCA | NETA | ESTIMADA* |
|------------------------|--------|-----------|
| Buenos Aires | 89,9 % | 99,2% |
| Fundación Manuel Mejía | 91,6 % | 98,1% |
| La Magnolia | 95,3 % | 97,9 % |
| Promedio | 92,3 % | 98,4 % |

* Calculada a partir de la DQO de las aguas residuales de lavado en tanque-tina: 27.400 ppm

Tabla 57. Características de las corrientes líquidas del SMTA Cenicafé durante pruebas de esfuerzo

| Parámetro | AFLUENTE | EFLUENTE |
|-------------------------|------------|-----------|
| Temperatura | 23°C | 28°C |
| PH | 3,9 | 7,3 |
| DQO | 31.320 ppm | 2.910 ppm |
| Sólidos Totales | 23.110 ppm | 3.540 ppm |
| Sólidos Suspendidos | 12.300 ppm | 1.070 ppm |
| NTk | 661 ppm | 328 ppm |
| Fósforo | 59 ppm | 14 ppm |
| Acidos Grasos Volátiles | | 6,3 meq/L |
| Alcalinidad | | 1.920 ppm |

Es común la práctica de utilizar el efluente de reactores anaeróbicos en riego de cultivos con el fin de incorporar al suelo su materia orgánica estable y el nitrógeno y fósforo que se encuentran en forma disponible para las plantas, lo que permite ayudar a la fertilización del suelo (60). Esta aplicación se está dando en algunos de los sitios donde se encuentran los SMTA instalados. Se ha cuestionado el efecto incrementándose la erosión con esta práctica, dada la topografía pendiente de la zona cafetera. Para dar una idea de cuál sería tal efecto, se hacen los cálculos de riego para el día pico sobre 5ha de cafetal, utilizando los 700L efluentes del SMTA; basta mencionar que tal cantidad de líquido equivaldría a una precipitación lluviosa de 0,013mm, equivalente entre 150 y 385 veces menos que la tasa de evapotranspiración dentro del cafetal, la cual se estima para las condiciones de Chinchiná, entre 5 y 2mm en días soleados y sombreados, respectivamente.

La **prueba de esfuerzo** realizada en el SMTA de Cenicafé, llevó a plantear una estrategia que permite ampliar la cobertura de tratamiento manteniendo los mismos costos, en fincas con producciones de 18 ton (1.438@) de cps año, al brindarse la posibilidad de almacenar mas volumen de agua residual en la primera unidad, utilizando materiales de construcción más económicos y dosificación posterior. En septiembre de 1995 en los SMTA se utilizó una estrategia de operación y manejo por distribución de cosecha que condujo al dimensionamiento óptimo de los reactores hidrolítico-acidogénico y metanogénico del sistema, tendientes a reducir los costos asociados a la instalación y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales. Esta estrategia contemplaba el dimensionamiento de las unidades que conforman el sistema, teniendo en cuenta la factibilidad de almacenar (a bajo costo) el agua residual para luego diferir su tratamiento. De acuerdo con lo anterior este mismo año la inversión para construir un SMTA se redujo a 40 US\$/ton (0,50 \$US/@) cps.

En Septiembre de 1993 la inversión para construir un SMTA era de 128 US\$/ton (1,6 \$US/@) cps, que incluía entre otros, reformas a los beneficiaderos para despulpar sin agua y redondear los tanques para lavar, Impuesto al Valor Agregado IVA, mano de obra, transporte de los tanques esféricos hasta la finca, 5 % de imprevistos y

60m de manguera de polietileno para conducción del ARL. A la luz de las observaciones llevadas a cabo durante la operación de los SMTA, se estima que se puede reducir su costo reemplazando y optimizando el funcionamiento de algunas partes que lo constituyen, como es el caso del primer tanque esférico ó reactor hidrolítico, recubrimientos y líneas de conducción en general.

Los principios que rigen el funcionamiento de un SMTA, entre ellos el incremento de temperatura en la segunda unidad utilizando la energía solar, se cumplen si el consumo específico de agua para beneficio de café es menor ó igual a 5L por kilogramo de cps. Un beneficiadero tradicional donde se consumen entre 40 y 50L/kg cps, para despulpar/transportar pulpa y lavar/clasificar el café, necesitaría 30 volúmenes más para poner en funcionamiento su planta de tratamiento. Otro beneficiadero donde se consuman, sólo para el lavado del café entre 20 y 25L/kg cps, necesitaría 15 volúmenes más para efectuar su tratamiento.

8.2. PRODUCCIÓN DE LODO METANOGÉNICO PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ POR BIODIGESTIÓN ANAERÓBICA

En el tratamiento de las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café mediante biodigestión anaeróbica utilizando reactores híbridos UAF/UASB, se hace necesario ejecutar 3 etapas: la maduración del lodo, el arranque y la operación.

8.2.1. Maduración del lodo

Éste debe ser la fuente y el soporte de las bacterias metanogénicas que cumplen un importante papel en la digestión anaeróbica, pues son las encargadas de la etapa final del proceso, en donde la mayor parte de la materia orgánica presente en el sustrato se convierte en CO_2 y CH_4 .

8.2.2. Arranque

Una vez maduro, el lodo metanogénico se carga en el reactor que es alimentado con las aguas residuales del proceso de beneficio húmedo del café a una concentración de 300ppm de DQO, neutralizadas con NaOH hasta pH 7,5 y a una temperatura de 36°C y con recirculación del efluente durante aproximadamente un mes. Bajo estas mismas condiciones, pero ya sin recirculación, se continua operando el reactor durante dos meses, aproximadamente, con el fin de llevarlo a régimen estacionario. Cuando el reactor se opera a temperatura ambiente el período de arranque es mayor aproximadamente en 6 meses.

En la práctica se considera que se ha alcanzado dicho régimen cuando una simple regresión lineal demuestra que los parámetros del proceso no muestran dependen-

cia con el tiempo, o más sencillamente, si el cultivo se ha mantenido en condiciones constantes de temperatura y alimentación en un período comprendido entre 2 y 7 veces el tiempo de retención hidráulica (88).

8.2.3. Operación

Una vez terminada la etapa de arranque y estabilización del reactor se realiza el tratamiento propiamente dicho, utilizando las aguas residuales del beneficio del café sin neutralizar.

El arranque de una planta de tratamiento de aguas residuales mediante digestión anaeróbica puede requerir de varios meses; el arranque está directamente relacionado con la madurez del lodo utilizado como inóculo, es decir, la cantidad de biomasa activa inoculada y del tipo de sustrato.

El UASB es un modelo de reactor caracterizado por que las aguas residuales ingresan por el fondo del reactor y ascienden. La velocidad de salida del líquido crea una selección constante para los microorganismos que pueden adherirse y formar los gránulos; éstos pueden tener varios milímetros de diámetro y acumularse en el reactor en gran cantidad (81).

Los gránulos usualmente presentan una apariencia bien definida; la configuración granular tiene varias ventajas de ingeniería: los microorganismos están empacados densamente, no hay pérdida de espacio en el soporte inerte, el gránulo esférico provee el máximo radio de espacio para los microorganismos y muestran excelentes propiedades de sedimentación por su gran tamaño (81).

El crecimiento de los gránulos en un sistema de tratamiento de aguas residuales biodegradables con un alto contenido de carbohidratos incluye una amplia variedad de morfotipos bacterianos que aseguran la conversión sucesiva del sustrato primario a productos terminados como CH_4 y CO_2 . Recientemente se han hecho observaciones que convergen a defender la organización estructural de la población microbiana en el gránulo (81).

Debido a la importancia de tener gránulos de buen tamaño dentro del reactor híbrido diseñado por Cenicafé, en la zona UASB, se quiere tener un reactor, de acuerdo con la denominación de la biotecnología, del tipo de células inmovilizadas debido a su efectividad en el tratamiento de las aguas residuales. En este caso la borra de café hace de soporte poroso y el estiércol de cerdo o vacuno de inóculo bacteriano.

Para la ejecución de la primera etapa, se generó y estandarizó una metodología para la producción del lodo anaeróbico a partir de la borra de café, para madurar rápida y económicamente el lodo, pilar fundamental para el éxito de un tratamiento anaeróbico de aguas residuales.

Para la producción del lodo metanogénico se utilizó borra de café fresca que ha demostrado ser un excelente soporte para la biomasa, con una granulometría superior a los 2mm por presentar una excelente sedimentabilidad, de acuerdo con los

ensayos de laboratorio realizados por Isaza (86) y a una concentración de 100g de sólidos totales/litro de reactor de acuerdo con las recomendaciones dadas por Zambrano (189).

La borra se inoculó con fuentes de bacterias metanogénicas que fueran fáciles de encontrar en la zona cafetera y para ello se utilizaron estiércol de cerdo y de vacuno (diluidos con agua a una concentración 1:1), con una concentración de 1,5% de SSV, en b.s. Se agregó agua residual del lavado del café hasta una DQO final de 4500 ppm y se neutralizó con hidróxido de sodio.

De igual manera se realizaron estudios con y sin adición de nutrimentos, para evaluar el efecto de la adición de fuentes de nitrógeno, fósforo y azufre sobre el tiempo de maduración del lodo.

Como fuente de nitrógeno se escogió la úrea, como fuente de fósforo el fosfato diamónico (DAP) y como fuente de azufre el sulfato de amonio, por ser abonos de fácil consecución en las fincas cafeteras, además de tener unos costos similares. La úrea se agregó a razón de 163mg/kg de borra seca, el DAP se agregó a razón de 963mg/kg de borra seca y el sulfato de amonio se agregó a razón de 934mg/kg de borra seca.

El estudio para evaluar el efecto de la temperatura sobre el tiempo de maduración del lodo se realizó a temperatura ambiente y a 36°C. Al analizar la información sobre producción de biogás acumulado y metano acumulado, se pudo inferir que:

Los tratamientos a 36°C mostraron siempre mayor producción de biogás y de metano que sus análogos a temperatura ambiente.

En cuanto a la borra inoculada con estiércol de vacuno, es evidente la importancia de adicionarle nutrimentos, tanto a temperatura ambiente como a 36°C, la cual se refleja en la producción de biogás acumulado. Un comportamiento similar se presenta en la producción de metano.

En el caso de la borra inoculada con estiércol de cerdo no se observan diferencias, después del día 30 para los tratamientos a 36°C, en cuanto a la producción de biogás, en los tratamientos con y sin nutrimentos.

La mayor **producción de biogás** acumulado al día 75 se presentó para el tratamiento borra + estiércol de vacuno + nutrimentos, a 36°C con 3.149ml. Al realizar la comparación con los otros tratamientos se puede apreciar que los tratamientos que tenían como inóculo estiércol de cerdo a 36°C, le siguen en producción con aproximadamente 2.000ml, es decir, el 64%.

De igual forma, la mayor producción de metano húmedo medio, acumulado al día 75 se presentó para el tratamiento borra + estiércol de vacuno + nutrimentos, a 36°C con 2.523ml, y una eficiencia de producción de metano del 93,1%. Al realizar la comparación de eficiencias como metano seco producido bajo condiciones nor-

males con los otros tratamientos, se puede apreciar que los tratamientos que tenían como inóculo estiércol de cerdo a 36°C le siguen en producción con aproximadamente el 61,8% para el que tenía nutrientes y 51,81% para el que no tenía nutrientes.

A los 25 días, los tratamientos inoculados con estiércol de cerdo, de vacuno y con nutrientes a 36°C presentaron prueba de combustión positiva. A los 30 días, los tratamientos inoculados con estiércol de cerdo y de vacuno y con nutrientes a temperatura ambiente, presentaron prueba de combustión positiva.

Del presente estudio se concluye:

- Se comprueba que la borra de café fresca, por sus propiedades físicas, es un excelente soporte para microorganismos anaeróbicos.
- La temperatura tiene una gran influencia sobre la actividad metanogénica.
- La utilización de inóculos metanogénicos favorece el tiempo de maduración de la borra de café.
- En términos generales, la adición de fuentes de nitrógeno, fósforo y azufre, disponibles en los fertilizantes utilizados en el cultivo del café tiene un efecto positivo en el incremento de la actividad metanogénica del lodo.
- El estiércol de cerdo se muestra como el mejor inóculo metanogénico y no precisa la adición de nutrientes, pues el comportamiento de los tratamientos que tenían este inóculo fue muy similar en cuanto a la producción de biogás y de metano, con y sin nutrientes. Por el contrario, se podría presentar alguna inhibición en la actividad metanogénica al utilizar los nutrientes, como pudo ser el caso del tratamiento que tenía nutrientes e inóculo de cerdo a temperatura ambiente.
- El estiércol de vacuno exhibe un buen comportamiento cuando recibe suplementación con nutrientes, tanto a temperatura ambiente como a 36°C.
- En términos de eficiencia de producción de metano, el mejor tratamiento es aquel en el que se utiliza estiércol de vacuno, suplementado con nutrientes y a 36°C.
- Hay una tendencia bien definida hacia la presencia de correlación entre la producción de metano y el contenido de Na^+ . Tanto para los tratamientos a 36°C como a temperatura ambiente, la mayor producción de metano húmedo se presentó para aquellos tratamientos cuya concentración de Na^+ fue menor.