

SELECCIÓN DE INÓCULOS PARA EL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA



Patricia Torres. PhD.

Profesora Asociada
Escuela de Ingeniería de Recursos naturales y del Ambiente. EIDENAR, Universidad del Valle,
Cali, Colombia.
patoloz@univalle.edu.co

Andrea Pérez. Ing.

Estudiante Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
Universidad del Valle, Cali, Colombia.
andreaperezvidal@hotmail.com

Álvaro A. Cajigas. Ing.

Estudiante Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Carolina Jurado. Ing.

Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Nathalie Ortiz. Ing.

Universidad del Valle, Cali, Colombia.

RESUMEN

La calidad y cantidad disponible de inóculos son dos de los principales factores limitantes en el arranque de reactores anaerobios. Los inóculos más usados en el departamento del Cauca para el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca son los estiércoles de vaca y de cerdo. En este estudio se evaluó una estrategia de mejoramiento combinándolos con lodo floculento del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas y lodo granular de la industria papelera. Los resultados mostraron que los estiércoles son adecuados para el tratamiento anaerobio de esta agua residual y que su combinación con lodo granular mejora la actividad metanogénica y la estabilidad y la eficiencia del proceso.

PALABRAS CLAVES

Actividad Metanogénica Específica; Estiércol; Extracción de almidón de yuca; Tratamiento Anaerobio.

* Recibido : Enero 15 2007 * Aceptado : Febrero 2 2007

ABSTRACT

The available quantity and quality of inoculums are two of the main factors restraining anaerobic reactors from starting. The most frequent used inoculums in the Valle del Cauca State for the anaerobic water treatment in the process of cassava starch extraction are caw and pig manure. In this study a strategy of improvement was evaluated by combining them with flocculent mud from the anaerobic treatment of domestic waste water and granular mud from the paper industry. The results showed that the manures are adequate for the anaerobic treatment of this waste water and that the combination with granular mud improves the activity methanogenic activity, the stability and the efficiency of the process.

KEYWORDS

Specific methanogenic activity, manure, cassava starch extraction, anaerobic treatment.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia produce el 1.2% del total mundial de yuca (2 millones de toneladas/año), ubicándolo en el puesto 16 (CIPASLA, 2006); el 10% de la producción nacional se destina a la elaboración de almidón nativo (fresco) o fermentado (agrio). El departamento del Cauca procesa el 80% del almidón agrio del país, siendo Santander de Quilichao el municipio que concentra la mayor cantidad de rallanderías de la región con el 69% de las 150 inventariadas ubicadas en 12 municipios del norte del departamento (CRC, 2005).

Estas rallanderías se catalogan en tres niveles tecnológicos (bajo, medio y alto) en función de las características de los equipos y proceso; son pequeñas agroindustrias si se compara su capacidad de procesamiento de hasta 12.5 ton/semana (CRC, 2005) con la de industrias como las brasileras, en las cuales se procesan hasta 300 ton/día (Cereda, 1994).

Aunque en el proceso productivo se generan aguas residuales básicamente en tres etapas: (lavado - pelado, colado y sedimentación), el 79.8% de las mismas

proviene de la última etapa (Torres *et al.*, 2006). Estas aguas se caracterizan por presentar bajos valores de pH, ausencia de alcalinidad bicarbonática, elevada acidez y alto nivel de ácidos grasos volátiles – AGV, además de un elevado nivel de materia orgánica con bajas características de sedimentación, lo que hace evidente la necesidad de un tratamiento para reducir la carga contaminante antes de su vertimiento a los cuerpos receptores de la región.

Estudios realizados desde la década del 90 a escala de laboratorio y planta piloto, han demostrado la potencialidad de la tecnología anaerobia para el tratamiento de estas aguas residuales (Rojas, 1999); sin embargo, se ha evidenciado inestabilidad del proceso debido fundamentalmente a factores ambientales (pH, alcalinidad bicarbonática, ácidos grasos volátiles y capacidad buffer) y tipo de inóculos disponibles (cantidad y calidad). Estos factores, junto con las características del agua residual (composición, concentración, nivel de degradación) y aspectos de diseño y de operación afectan significativamente el arranque y la estabilidad de los reactores biológicos (Weiland, 1990).

El control de estos factores garantiza una mayor actividad de la biomasa y, por consiguiente, mejores eficiencias de remoción de la materia orgánica. Desde el punto de vista del inóculo, el tiempo de arranque de los reactores anaerobios será menor si el inóculo utilizado tiene una alta actividad metanogénica específica (AME) y está adaptado a los sustratos presentes en el agua residual (Field, 1987).

Aunque para el arranque de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales –PTAR por tecnologías biológicas es recomendable disponer de inóculos de PTAR existentes, en países como Colombia ésta no es una situación común ya que no existen suficientes reactores que suministren inóculos en la cantidad y calidad requerida (Díaz *et al.*, 2002). Una de las estrategias usadas para mejorar la calidad de los inóculos disponibles es la combinación con lodos de mejores características. La AME es uno de los mejores indicadores de la calidad, eficiencia y estabilidad del proceso anaerobio y determina la capacidad de asimilación o adaptación que tienen las bacterias metanogénicas para convertir el sustrato (DQO) en metano y gas carbónico, expresada en $\text{gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{g.SSV.día}$ (Field, 1987).

La AME permite determinar y evaluar: la biodegradabilidad de sustratos y el efecto de compues-

tos potencialmente inhibidores; la carga orgánica máxima que puede ser aplicada para un determinado tipo de lodo y cambios en la actividad del lodo debidos a una posible acumulación de materiales inertes a causa de los largos periodos de operación de los reactores; y, los parámetros cinéticos (Chernicharo, 1997).

En este estudio se evaluó, mediante ensayos AME, una estrategia de mejoramiento de los estiércoles de vaca y de cerdo, combinándolos con lodos de una PTAR doméstica (lodo floculento – LF) y de una industria papeleras (lodo granular - LG).

2. METODOLOGÍA

2.1 EL SUSTRATO

Se empleó agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca en una concentración de 5000 mg DQO/l; la alcalinidad fue ajustada a 3000 mg/l con bicarbonato de sodio de acuerdo con Torres *et al* (2005). La Tabla 1 muestra las variables y las técnicas de medición aplicadas para la caracterización del sustrato.

Tabla 1. Caracterización del sustrato

VARIABLE	UNIDADES	TÉCNICA DE MEDICIÓN*
pH	Unidades	Potenciometría
Alcalinidad Total y Bicarbonática,** Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Titulometría
Ácidos Grasos Volátiles –AGV	meq/L	Titulometría
Demanda Química de Oxígeno Total y Filtrada	mg O ₂ /L	Digestión y espectrofotometría
Demanda Bioquímica de Oxígeno Total y Filtrada	mg/L	Digestión y espectrofotometría
Sólidos Totales, Volátiles Totales, Disueltos	mg/L	Gravimetría
Sólidos Sedimentables – SS	ml/L - hora	Volumetría
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg NTK/L	Digestión y Titulometría
Nitrógeno Amoniacal	mg N-NH ₃ /L	Titulometría
Fósforo Total	mg P /L	Digestión y Titulometría
Cianuros, Fenoles	mg CN ⁻ /L	Espectrofotometría

* APHA *et al.*, 1998 **Ripley *et al.*, 1996

2.2 LOS INÓCULOS

Los Estiércoles de Vaca (EV) y de Cerdo (EC) se combinaron con lodos procedentes del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas (LF) y de aguas residuales de la industria papeleras (LG); todos fueron recolectados en un período inferior a 48 horas antes del montaje de los ensayos AME.

Para definir la cantidad de inóculo que garantizara una concentración de 2.5 g SVT/l (Chernicharo, 1997), éstos fueron caracterizados en términos de sólidos totales y volátiles (APHA *et al.*, 1998).

Las proporciones Estiércol: LF y Estiércol: LG evaluadas fueron 30:70%, 50:50% y 70:30%, respectivamente adicionalmente se evaluó la combinación de los dos estiércoles en las mismas proporciones.

Con el objetivo de verificar el efecto favorable de las combinaciones definidas, se evaluaron también los cuatro inóculos sin mezclar (Testigos: 100%).

2.3 UNIDAD EXPERIMENTAL

Los ensayos AME se realizaron por la técnica de desplazamiento de líquido en reactores de 500 ml, empleándose NaOH al 3% como sustancia desplazante por su propiedad de reaccionar con el CO₂, permitiendo una medición más aproximada del volumen de metano producido (Field, 1987).

Los ensayos fueron realizados por duplicado.

El volumen de sustrato adicionado al Reactor 1 (R₁) fue de 350 ml y la mezcla Inóculo + Sustrato + Alcalinizante no sobrepasó el 90% del volumen total del reactor. La ubicación (R1) en un nivel superior al Reactor 2 (R2) evita que, en el caso de ocurrir succión del NaOH, el R1 no se vea afectado (Torres *et al*, 2005), siendo innecesaria la “trampa de NaOH” usada en el montaje tradicional del ensayo AME por desplazamiento de líquido. Los ensayos fueron realizados a 30°C y 0.893 atm. La Figura 1 muestra un esquema del montaje.

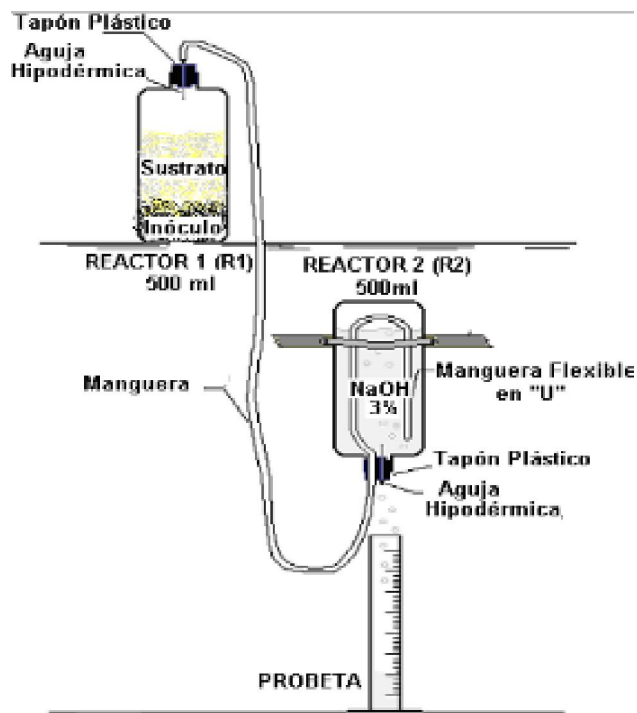


Figura 1. Unidad experimental para ensayos de Actividad Metanogénica Específica

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 EL SUSTRATO

El agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca contiene carbohidratos fácilmente hidrolizables, lo que favorece la fermentación natural y, por consiguiente, la formación de ácidos volátiles, incidiendo en los bajos valores de pH y ausencia de alcalinidad (Arroyave *et al.*, 1996). El tiempo de permanencia del agua en las unidades de sedimentación es la principal causa de esta característica (Pérez *et al.*, 2006).

El análisis de ácidos grasos mediante cromatografía de gases muestra que los ácidos predominantes en el agua residual son el láctico y el acético (aproximadamente 60% y 37%, respectivamente) (Arroyave *et al.*, 1996). La predominancia de ácido láctico no favorece la actividad biológica de las bacterias metanogénicas, para las cuales es más eficiente disponer de ácidos de cadena más corta, principalmente el acético.

La relación DBO_5/DQO_T que tradicionalmente ha sido empleada para evaluar el contenido de material biodegradable presente en el agua residual, presentó un

La Tabla 2 muestra la caracterización del sustrato empleado en los ensayos AME.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica A. Residual Proceso de extracción de almidón de yuca

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
pH	Unidades	4.10*
Alcalinidad Total	mg/L $CaCO_3$	10
Alcalinidad Bicarbonática	mg/L $CaCO_3$	0
Acidez	(mg/L)	1200
Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	meq/L	20
Demanda Química de Oxígeno Total (DQO_T)	mg O_2 /L	5150
Demanda Química de Oxígeno Filtrada (DQO_F)	mg O_2 /L	4800
Demanda Bioquímica de Oxígeno Total (DBO_{5T})	mg O_2 /L	2550
Demanda Bioquímica de Oxígeno Filtrada (DBO_{5F})	mg O_2 /L	2450
Sólidos Totales (ST)	mg/L	2650
Sólidos Volátiles Totales (STV)	mg/L	2415
Sólidos Disueltos (SD)	mg/L	2130
Sólidos Sedimentables (SS)	mg/L-45 min.	15
Nitrógeno Total	mg NTK/L	166
Nitrógeno Amoniacal	mg $N-NH_3$ /L	39.1
Fósforo Total	mg P/L	35
Cianuros	mg CN^- /L	0.2
Fenoles	mg Fenol/L	0.05

Valor ajustado con $NaHCO_3$ alrededor de 7.2 unidades:

valor de 0.50, lo cual muestra la potencialidad de implementar un tratamiento biológico (Metcalf y Eddy, 2003). La elevada relación DQO_F/DQO_T (0.95) y el alto nivel de sólidos disueltos muestran la predominancia de la materia orgánica en forma disuelta, la cual es difícil de remover por métodos físicos convencionales.

Los niveles de nitrógeno y fósforo garantizan la relación $DQO:N:P$ (1000:5:1) (Chernicharo, 1997) y el exceso sobre los requerimientos mínimos recomendados de 50 mgN/l y 10 mgP/l para el buen desempeño del tratamiento biológico anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables (Rittman y McCarty, 2001). Las concentraciones de metales pesados, cianuro y fenoles se en-

cuentran en límites inferiores a los niveles considerados inhibitorios en procesos biológicos anaerobios (Field, 1987; Rojas et al, 1998; Rittman y McCarty, 2001).

3.2 LOS INÓCULOS

La Tabla 3 muestra las características de los inóculos, las concentraciones de sólidos y la AME.

Un aspecto que debe resaltarse y que en muchos casos determina la selección del inóculo es la disponibilidad; en este caso el que presentó menores restricciones de disponibilidad fue el EV mientras que el LG fue el de más difícil acceso por costos tanto de adquisición y de transporte.

Tabla 3. Características de los inóculos evaluados

INÓCULO	CARACTERÍSTICAS	ST g/Kg	STV g/Kg	STV/ ST
Estiércol de Vaca (EV)	-Aspecto sólido (alto contenido de fibra) -Alto contenido de humedad -Fácil manipulación -Alta disponibilidad en la zona de estudio	93.23	68.18	0.73
Estiércol de Cerdo (EC)	-Aspecto sólido -Bajo contenido de humedad -Difícil manipulación (olor fuerte) -Baja disponibilidad	97.75	75.86	0.78
Lodo Floculento (LF)	-Características floculentas -Alto contenido de humedad -Baja disponibilidad en la zona de estudio	63.80	28.53	0.45
Lodo Granular de Papelera (LG)	-Características granulares -Fácil acondicionamiento (lavado) -No disponible en la zona de estudio	52.17	35.47	0.68

Considerando que la relación STV/ST es una medida indirecta de la presencia de biomasa activa en los procesos biológicos (Von Sperling, 1997), el inóculo que presentó las características más desfavorables fue el LF mientras que los estiércoles y el LG presentaron un comportamiento similar.

3.3 ENSAYOS AME

Un aspecto a resaltar en estos ensayos es el relaciona-

do con la diferencia en los valores AME usando agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca comparada con los de los ensayos en el que el sustrato está compuesto de AGV, lo que muestra diferencias en la composición de los dos sustratos y los grupos tróficos presentes en los diferentes inóculos. La Tabla 4 muestra las actividades en ambos casos.

Tabla 4. Valores AME usando como sustrato mezcla de AGV y agua residual de yuca

INÓCULO	AME Mezcla de AGV*	AME A.R. Yuca**
Estiércol de Vaca (EV)	0.1 – 0.002 ^(a)	0.15
Estiércol de Cerdo (EC)	0.001 – 0.020 ^(a)	0.17
Lodo Floculento (LF)	0.13 ^(a)	0.16
Lodo Granular de Papelera (LG)	0.42	0.25

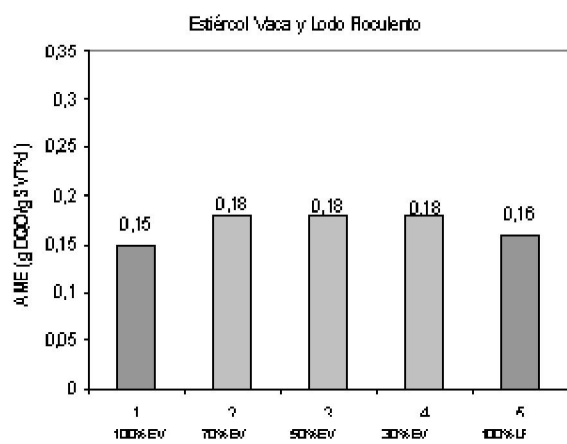
* Los ensayos AME fueron desarrollados a 30°C y 0.893 atm usando como sustrato la mezcla de AGV (acético, propiónico y butírico)

** Los ensayos AME fueron desarrollados a 30°C y 0.893 atm usando como sustrato agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca

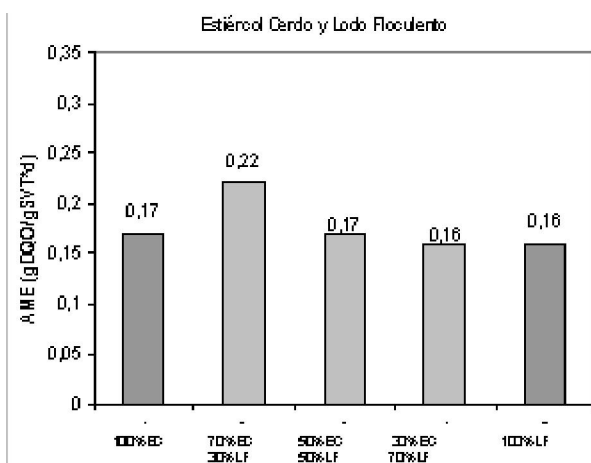
(a) Field, 1987

(b) Rojas, 1998

Los lodos granulares se caracterizan por presentar una concentración de bacterias metanogénicas acetoclásticas mucho mayor que la de los lodos floculentos (10^9 y 10^4 respectivamente) en los cuales predominan bacterias metanogénicas hidrogenotróficas (Ramírez, 1998). Esta composición microbiana, aunada a la predominancia de ácido láctico (60%) en el agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca, desfavoreció la actividad metanogénica del LG y probablemente estimuló la actividad de las bacterias hidrogenotróficas predominantes en el LF. Dada la similitud entre las AME de los estiércoles con el LF, es probable que la composición microbiana sea similar. Los resultados de los ensayos en que se evaluó el impacto de la mezcla de los estiércoles de vaca y de cerdo con lodo floculento se muestran en la Figura 2. En la figura se observa que los estiércoles y el LF solos presentaron valores similares de AME y solamente la combinación 70% EC: 30% LF fue significativamente superior al resto de proporciones evaluadas.



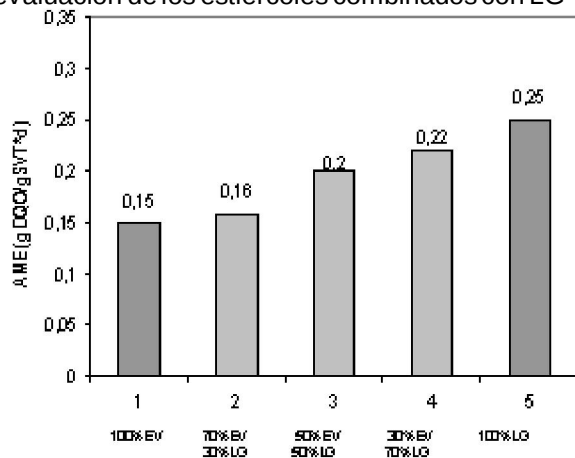
a) estiércol de vaca y lodo floculento



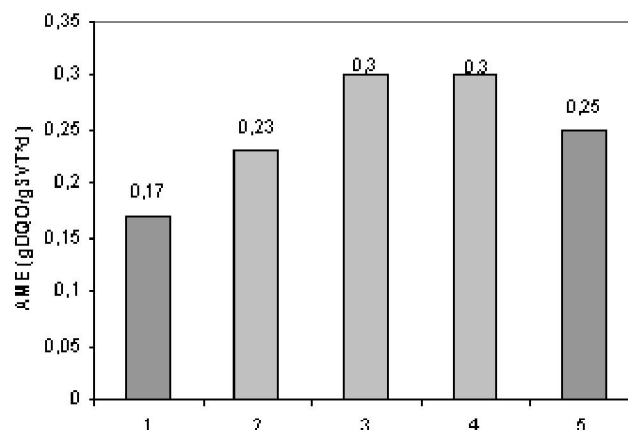
b) estiércol de cerdo y lodo floculento

Figura 2. Actividad Metanogénica Específica (AME). Estiércoles combinados con lodo floculento.

La Figura 3 muestra los valores de AME obtenidos en la evaluación de los estiércoles combinados con LG



a) estiércol de vaca y lodo granular



b) estiércol de cerdo y lodo granular

Figura 3. Actividad Metanogénica Específica (AME). Estiércoles combinados con lodo granular

El desempeño del LG fue superior al de los estiércoles solos; la combinación de los estiércoles con LG en todas las proporciones evaluadas favoreció la digestión anaerobia del agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca y el EC mostró mejores resultados que el EV. Aunque los mayores valores de AME se presentaron en los tratamientos con EC y LG, la mayor disponibilidad del EV en la zona y los buenos resultados hacen de este inóculo una alternativa apropiada para la inoculación de reactores anaerobios al tratar este tipo de aguas residuales con una mezcla de lodo granular en alta proporción.

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos en la evaluación de la mezcla de los estiércoles solos y combinados.

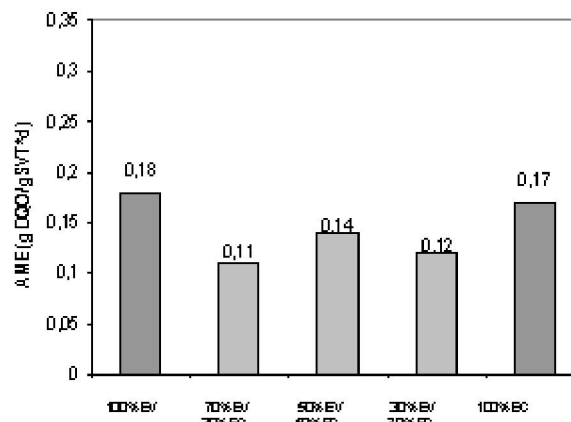


Figura 4. Valores de AME obtenidos con la combinación de estiércol de vaca y cerdo

La mezcla que mostró el mejor comportamiento fue la de 50% EV : 50% EC; sin embargo, los estiércoles solos fueron más eficientes.

El arranque de dos reactores inoculados con 100% EV y 50% EV:50% LG, respectivamente (Pérez *et al* (2006), mostró que en ambos casos se obtiene la misma eficiencia; sin embargo, el estiércol sólo es un inóculo vulnerable a un mayor número de factores (cambios en el sustrato, factores ambientales y de operación), siendo indispensable realizar un mayor control, principalmente de la capacidad buffer.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La combinación de los estiércoles con lodo floculento no mejoró significativamente la actividad metanogénica, a diferencia del lodo granular, el cual incrementó la producción de metano en todas las proporciones evaluadas.
- Los ensayos con los estiércoles de vaca y de cerdo mostraron que es más eficiente su uso cuando se emplean solos que combinados entre ellos.
- Se recomienda el uso de los ensayos AME para la selección de inóculos adecuados para el arranque de reactores anaerobios.
- En los casos en que la disponibilidad limita el uso de inóculos de buena calidad es aconsejable considerar las fuentes disponibles existentes en la zona donde será implementado el sistema de tratamiento y seleccionar la más adecuada para cada tipo de agua residual.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apha, Awwa y Wpcf. (1998). Standard Methods for the examination of water and wastewater.
- Arroyave, G. Rojas, O., y Torres, P. (1996). Depuración anaerobia de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en sistema de fases separadas. En: XI Sinaferm Simposio Nacional de Fermentaciones. Universidad Federal de Sao Carlos.
- Cereda, M. (1994). Culturas de tuberosas amiláceas latino americanas. Volumen 4. Manejo, uso e tratamiento de subproductos da industrializacao da mandioca. Brasil.
- Chernicharo, C.A. (1997). Principios do tratamento biológico de águas residuárias. Universidad Federal de Minas Gerais. Vol V. Brasil. 1997.
- Cipasla. (2006). La yuca. Asociación del consorcio interinstitucional por una agricultura sostenible en ladera. En: www.cipasla.org/material_divulgativo/agroindustria/yuca.pdf.
- Corporación Regional Del Cauca -CRC. (2005). Rallandero Limpio. Corporación Autónoma Regional del Cauca – CRC. Popayán.
- Díaz, M.C., Espitia, S.E., y Molina, F. 2002. Digestión anaerobia. Una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia.
- Field, J. (1987). Parámetros operativos del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente. En: Manual de Arranque y operación de sistemas de flujo ascendente con manto de lodos – UASB. Universidad del Valle, CVC, Universidad Agrícola de Wageningen.
- Metecalf y Eddy (2003). Wastewater Engineering Treatment and Reuse. Fourth Edition. McGraw-Hill. USA, 2003.
- Pérez, A.; Torres, P; Pizarro, C; Cajigás, A. (2006). Arranque de un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Influencia del inóculo. Revista Ingeniería y Competitividad. Universidad del Valle. (Sometido).
- Ramírez, L.F. (1998). Adecuación de una metodología para la evaluación de potenciales semillas para la inoculación de reactores anaerobios. Tesis de Maestría. Universidad del Valle.
- Ripley, L.E., Boyle, W.C., y Converse, J.C. (1986). Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-Strength wastes, en: Journal water pollution control federation, V.58.
- Rittmann, B y McCarthy P. (2001). Biotecnología del medio ambiente: Principios y aplicaciones. Editorial Mc Graw Hill.
- Rojas, O. (1999). Evaluación del comportamiento de tres sistemas de tratamiento anaerobio para la depuración de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Tesis de Maestría, Universidad del Valle.
- Rojas, O, Aponte, L, Hidrobo, L, y Alazard, D. (1998). Influence of flow regime on the concentration of cyanide producing anaerobic process inhibition. En. IV Taller y Seminario Latinoamericano Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Chile, Octubre 1998.
- Torres, P; Cajigas, A; Pérez, A; González, M; Otero, A. (2005). Evaluación de diferentes alcalinizantes en el tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. IV Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia. Uruguay.