Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Ingeniería Ambiental y Sanitaria | Facultad de Ingeniería

1-1-2004

Efecto de la suplementación de hierro y níquel en la digestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca

Brenda Paola Cano Figueroa
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria

Citación recomendada

Cano Figueroa, B. P. (2004). Efecto de la suplementación de hierro y níquel en la digestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1740

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Ambiental y Sanitaria by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

EFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN DE HIERRO Y NIQUEL EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA.

BRENDA PAOLA CANO FIGUEROA

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA

BOGOTA

2004

EFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN DE HIERRO Y NIQUEL EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA.

BRENDA PAOLA CANO FIGUEROA

Tesis de Grado presentado como requisito parcial para optar al titulo de Ingeniero Sanitario

Director Externo
Ing. Msc. JENNY RODRÍGUEZ
UNIVERSIDAD DEL VALLE

Director Interno
Ing. OSCAR JAVIER PERÉZ MÚNEVAR

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA

BOGOTA

2004

Nota de aceptación:

_____
_____
_____
_____
_____
_____

_____
Firma del Director de tesis

_____
Firma del Jurado

_____
Firma del Jurado

Bogotá, _____ de Junio de 2004.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1
2 OBJETIVOS 3
2.1 Objetivo General 3
2.2 Objetivos Específicos 3
3 ANTECEDENTES 4
3.1 Sistemas de Tratamiento Anaerobio usados en aguas residuales provenientes del proceso de extracción de Almidón de Yuca 4
3.2 Requerimientos Nutricionales en Tratamientos Anaerobios 7
4 JUSTIFICACIÓN 12
5 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL 15
5.1 Generalidades de la agroindustria de almidón de yuca 15
5.1.1 La Raíz de Yuca 15
5.1.2 Almidón de Yuca 15
5.1.3 Proceso de extracción de almidón de yuca 17
5.2 Impacto ambiental generado por el proceso de extracción de almidón de yuca. 20
5.3 Digestión anaerobia 21
5.3.1 Procesos de Conversión en Sistemas Anaerobios 23
5.3.1.1 Sintrofía 26
5.3.2 Factores Ambientales Incidentes en la Digestión Anaerobia 27
5.3.3 Actividad Metanogénica Específica (AME) 32
5.4 Importancia nutricional en el proceso de digestión anaerobia 34
5.4.1 Macronutrientes 35
5.4.2 Micronutrientes 38
5.4.3 Factores de Crecimiento 40
5.4.4 Biodisponibilidad de nutrientes 41
6 MATERIALES Y MÉTODOS 42
6.1 Caracterización de las Aguas Residuales procedentes del proceso de extracción de almidón de yuca. 42
6.2 Determinación Teórica de Requerimientos Nutricionales (N, P, Ni, Fe) en la Digestión Anaerobia. 43
6.2.1 Macro elementos 43
6.2.2 Micro elementos o Metales Traza 43

6.3 Caracterización del Inóculo para la aplicación de ensayos de Actividad Metanogénica Específica (AME). 45
6.4 Determinación de la dosis óptima de Metales Traza (Ni y Fe), en el Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales del Proceso de extracción de Almidón de yuca utilizando Reactores de flujo discontinuo. 45
6.4.1 Principio 45
6.4.2 Selección de las dosis de micronutrientes 46
6.4.3 Equipos 46
6.4.4 Inóculo: 47
6.4.5 Sustrato: 48
6.4.6 Alcalinizante: 48
6.4.7 Temperatura: 48
6.4.8 Montajes de AME 48
6.4.9 Producción de metano 49
6.4.10 Actividad Metanogénica Específica 50
7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 51
7.1 Características de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. 51
7.2 Características del Inóculo utilizado en los ensayos de AME. 52
7.2.1 Primer ensayo 52
7.2.2 Segundo ensayo 53
7.3 Requerimientos nutricionales teóricos en la Digestión Anaerobia. 53
7.3.1 Nitrógeno y Fósforo 53
7.3.2 Hierro y Níquel 54
7.4 Ensayos de AME para la determinación de la dosis de Fe y Ni necesaria en el mejoramiento de la digestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. 55
7.4.1 Primer Ensayo 56
7.4.1.1 Primera Alimentación 56
7.4.1.2 Segunda Alimentación 59
7.4.1.3 Efecto de la adición de Hierro y Níquel en la AME del primer ensayo. 60
7.4.2 Segundo ensayo 69

7.4.2.1 Efecto de la adición de Hierro y Níquel en la AME del segundo ensayo. 72
7.5 Análisis Costo Beneficio en la Adición de las Dosis de Hierro y Níquel al Sistema de Tratamiento a escala real. 74
7.5.1 Marco Normativo de Referencia 75
7.5.2 Análisis de costos del sistema 76
7.5.2.1 Características del sistema de tratamiento..... 76
7.5.2.2 Escenario 1. Tratamiento sin la adición de nutrientes 77
7.5.2.3 Escenario 2. Aplicación de Hierro y Níquel al sistema de tratamiento. 78
7.5.3 Comentarios finales 79
8 CONCLUSIONES 81
9 RECOMENDACIONES 84
10 BIBLIOGRAFÍA .....
ANEXO 1. Opciones de tratamiento para aguas residuales provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca. .....
Reactores Anaerobios de Alta Tasa.....
Filtro Anaerobio.....
ANEXO 2. Base de Cálculo usada para el análisis Costo – Beneficio de la dosificación de micronutrientes al sistema de tratamiento a escala real. .....
ANEXO 3. Registro Fotográfico.....

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del sector Rallandero en el Departamento del Cauca. 12
Figura 2. Estructura Química de Amilosa. 16
Figura 3. Estructura Química de Amilopectina. 16
Figura 4. Diagrama descriptivo del proceso de extracción de almidón de yuca. 20
Figura 5. Flujo de la DQO a través de una comunidad microbiológica anaeróbica. 23
Figura 6. Secuencia de los procesos de las macromoléculas complejas durante la digestión anaerobia. 26
Figura 7. Efecto de la temperatura sobre la actividad anaerobia 28
Figura 8. Actividad de las bacterias metanogénicas en relación al pH..... 29
Figura 9. Sistema de desplazamiento usado en evaluaciones de AME. 33
Figura 10. Montaje de Actividad Metanogénica (Equipos de AME)..... 47

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Requerimiento de nutrientes específicos para lograr AUR altas. 9
Cuadro 2. Experiencias de los requerimientos de micronutrientes en el tratamiento de aguas residuales industriales 10
Cuadro 3. Características fisicoquímicas de los efluentes del proceso de extracción de almidón de yuca..... 21
Cuadro 4. Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaerobia. 22
Cuadro 5. Composición química de las bacterias metanogénicas. 35
Cuadro 6. Función de los Macronutrientes en el desarrollo microbiano..... 36
Cuadro 7. Función de los Micronutrientes en el desarrollo microbiano..... 39
Cuadro 8. Rangos de concentración de algunos nutrientes, necesarios para el correcto crecimiento de las bacterias anaerobias. 40
Cuadro 9. Enzimas del Níquel..... 41
Cuadro 10. Análisis Fisicoquímicos de las aguas residuales de rallandería. ... 43
Cuadro 11. Composición elemental de las bacterias del metano..... 44
Cuadro 12. Composición del primer ensayo de AME. 48
Cuadro 13. Composición del segundo ensayo de AME. 49
Cuadro 14. Características fisicoquímicas del agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca..... 51
Cuadro 15. Características principales de los inóculos usados..... 53
Cuadro 16. Requerimiento teórico de Hierro y Níquel..... 55
Cuadro 17. Condiciones de los montajes de AME del primer ensayo..... 56
Cuadro 18. Resultados obtenidos en la primera alimentación. 57
Cuadro 19. Resultados obtenidos en la segunda alimentación..... 59
Cuadro 20. AME de los reactores según su posición al final del primer ensayo. 68
Cuadro 21. Condiciones de los montajes de AME del segundo ensayo. 70
Cuadro 22. Resultados obtenidos en el segundo Ensayo. 70
Cuadro 23. AME de los reactores según su posición al final del primer ensayo. 73
Cuadro 24. Parámetros de control del sistema de tratamiento de una de las rallanderías del departamento del Cauca..... 77

Cuadro 25. Costos por tasas retributivas para el actual sistema de tratamiento 77
Cuadro 26. Costos asociados al sistema luego de la adición de los metales traza. 78
Cuadro 27. Cobro por tasas retributivas para el actual sistema de tratamiento con adición de nutrientes. 78
Cuadro 28. Proyección de costos por Tasa Retributiva - Sector Rallandero ($col). 79

INDICE DE FOTOS

Foto 1. Proceso de lavado y pelado de la yuca..... 17
Foto 2. Proceso de rallado de la yuca..... 18
Foto 3. Proceso de Colado o tamizado de la yuca..... 18
Foto 4. Canales empleados en la sedimentación del almidón de yuca..... 19
Foto 5. Montaje usado para evaluación de AME.....
Foto 6. Planta física Rallandería Piedras Negras.....
Foto 7. Lavado y troceado de yuca. .....
Foto 8. Lavado y troceado de yuca. .....
Foto 9. Ralladores de yuca.....
Foto 10. Tanques para sedimentación de almidón.....
Foto 11. Lechos de secado de almidón.....
Foto 12. Tanque de homogenización de agua residual.....
Foto 13. Tanque para la dosificación de Cal. .....

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Producción de metano durante la primera Alimentación del primer Ensayo - Junio 14 de 2003..... 58
Gráfico 2. Producción de metano durante la primera Alimentación del primer Ensayo - Junio 23 de 2003..... 58
Gráfico 3. Producción de metano durante la segunda Alimentación del primer ensayo..... 60
Gráfico 4. Efecto de la adición de 1,45 mg Fe/l en la DA del primer ensayo.... 62
Gráfico 5. Efecto de la adición de 3,0 mg Fe/l en la DA del primer ensayo..... 63
Gráfico 6. Efecto de la adición de 0,145 mg Ni/l en la DA del primer ensayo. . 65
Gráfico 7. Efecto de la adición de 0,5 mg Ni/l en la DA del primer ensayo. 66
Gráfico 8. Efecto de la adición de 1,45 mg Fe/l + 0,145 mg Ni/l en la DA del primer ensayo. 67
Gráfico 9. Actividad metanogenica específica – Primer ensayo..... 69
Gráfico 10. Producción de metano en el segundo ensayo. 71
Gráfico 11. Efecto de la adición de nutrientes en el segundo ensayo. 72
Gráfico 12. Actividad metanogenica específica – Segundo ensayo..... 74
Gráfico 13. Cobro Tasa Retributiva – Adición de micronutrientes..... 80

1 INTRODUCCIÓN

La yuca es un tubérculo importante en la alimentación y en la supervivencia de la población de las zonas tropicales en el mundo, se cultiva y se consume en nuestro país en todas las regiones. En el departamento del Cauca, gran parte de la producción de yuca se destina a la industria de almidones, en la cual se requieren transformaciones importantes que generan valor agregado. Esta industria hace de la región, la principal productora de almidón agrio de yuca en Colombia[1].

En los últimos años se han introducido técnicas para mejorar la producción del almidón, sin embargo el proceso continúa generando grandes volúmenes de agua residual los cuales contienen una elevada carga orgánica y compuestos cianurados de alta toxicidad, que al ser vertidos contribuyen con el impacto negativo de los recursos hídricos y del medio ambiente.

La Universidad del Valle ha adelantado estudios encaminados a determinar una tecnología de tratamiento anaerobio para las aguas provenientes del proceso, que sea de bajo costo, de fácil operación y mantenimiento y de aceptación por parte de los rallanderos, garantizando con ello la sostenibilidad del sistema, el control de los vertimientos, la protección del medio ambiente y la disminución en el cobro de tasas retributivas establecidas en el Decreto 1594 de 1984 y en el Decreto 3100 de 2003[2].

El resultado de estos estudios ha sido la selección del filtro anaerobio de flujo horizontal para el tratamiento de las aguas residuales de este proceso productivo. Sin embargo, la implementación a escala real ha demostrado que se presentan problemas en el arranque de los reactores y en el control de las variables del proceso, produciéndose remociones inferiores al 70%.

Aunque el tratamiento anaerobio garantiza capacidad de degradación de la materia orgánica del agua residual, uno de los aspectos más importantes a considerar para lograr mejores eficiencias de remoción, es que la biomasa formada durante todas las fases del tratamiento necesita para su desarrollo el suministro de una serie de nutrientes minerales, de una fuente de carbono, de energía y en determinados procesos necesita compuestos orgánicos especiales como vitaminas[3].

Por lo anterior, y debido a la ausencia de investigaciones enfocadas a determinar los requerimientos de micronutrientes en el tratamiento anaerobio de aguas residuales, el presente estudio plantea evaluar el efecto de la suplementación de Hierro y Níquel en la digestión anaerobia de los efluentes

---

[1] Corporación Colombiana Internacional, Boletín, 1999.
[2] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 1998.
[3] Campos P, Flotats, I X, Bonmatí i A. Biogas y aprovechamiento de la biomasa, 2000.

provenientes de la extracción de almidón de yuca, ya que dentro de los requerimientos mas importantes de los grupos bacteriales involucrados en este tratamiento, estos dos metales cobran mayor importancia que otros debido a sus funciones particulares como parte de las enzimas facilitadoras del proceso de conversión de la materia orgánica a metano y por ende pueden mejorar de manera directa las eficiencias de remoción en el tratamiento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la suplementación de Hierro y Níquel en la digestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar las características fisicoquímicas y nutricionales de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.
- Establecer de acuerdo con la teoría las concentraciones de Nitrógeno, Fósforo, Níquel y Hierro necesarias para la digestión anaerobia.
- Identificar la deficiencia nutricional de las aguas residuales de este proceso productivo.
- Determinar por medio de la actividad metanogénica la dosis de nutrientes requerida para mejorar la digestión anaerobia de las aguas residuales provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca.
- Determinar la relación beneficio-costo de la adición de micronutrientes al sistema de tratamiento propuesto para mejorar la digestión anaerobia de las aguas residuales provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca.

3 ANTECEDENTES

Los estudios e investigaciones realizadas para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en la región, se han centrado primero en la evaluación de las tecnologías anaerobias más adecuadas para su tratamiento y posteriormente en las variables que inciden en el arranque y operación del filtro anaerobio de flujo horizontal que se ha implementado a escala real. Sin embargo en estos estudios no se han tenido en cuenta las necesidades nutricionales de la biomasa como factor importante en la optimización del tratamiento biológico, aún cuando la experiencia permite corroborar su importancia por las aplicaciones que se han hecho a diversos sistemas de tratamiento existentes en el país. La descripción general de dichos estudios se muestra en la Sección 3.1.

Por otro lado, a nivel internacional también se han desarrollado estudios relacionados con sistemas de tratamiento biológico, en donde es considerada especialmente la importancia de los nutrientes y micronutrientes en la digestión anaerobia de las aguas residuales de distintos procesos industriales. Una descripción de esta evolución se muestra en la sección 3.2.

3.1 Sistemas de Tratamiento Anaerobio usados en aguas residuales provenientes del proceso de extracción de Almidón de Yuca

En el mundo se han realizado algunos estudios para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en los cuales se han evaluado sistemas de tratamiento aerobio y anaerobio. En algunas de estas investigaciones, los sistemas aerobios han tenido mejores resultados pero a costos elevados, como se observa en los estudios realizados en el Asian Institute of Technology en Tailandia[4]. La implementación de tecnologías anaerobias para estos residuos fue implementada en Brasil por Tosin y Branco (1983), logrando remociones de DQO entre el 94 y 98%[5]. Así mismo Mulyanto y Titiresmi[6] en Indonesia (1998), usando un digestor anaerobio de lecho fijo alcanzaron eficiencias de remoción de la materia orgánica superiores al 76 % y 95% de DQO y DBO_5 respectivamente.

---

[4] Jesuitas, E.P. an Investigation of tapioca mastes. Asian Institute of Technology. Bangkok – Thailand 1996. citado por OBANDO G, y REYES, A. en: Características hidrodinámicas de medios de soporte y estudios de filtración con paja de monte en reactores transfiltro. Cali 1996.

[5] Tosin, G. M y Branco, P, M. Tratamento anaerobio de bohiíto de mandioca por filtro fixo: controle da poluicao, mejo ambiente e ecología, 1983; citado por Pérez y Cajigas. Corrección de pH en reactores anaerobios tratando aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. 2002

[6] Titiresmi y Mulyanto. Implementation of anaerobic process on wastewater from tapioca starch industries.

En Colombia en el año de 1987, se desarrolló el convenio de Cooperación Técnica establecido entre la Universidad Agrícola de Wageningen (Holanda), la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y la Universidad del Valle, el cual tenia como objetivo principal la promoción y difusión del reactor de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB), para el tratamiento de aguas residuales. Esto reforzó la posibilidad de usar este sistema como alternativa de tratamiento para los efluentes del proceso de extracción de almidón de yuca.

A comienzo de los años 90, gracias a los estudios de tratabilidad desarrollados por la División de Aguas de la CVC y a los realizados por la Universidad del Valle sobre biodegradabilidad anaerobia del material soluble y material en suspensión en estos efluentes, se consideró la factibilidad del sistema de tratamiento anaerobio para las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, promoviendo de esta manera la investigación en este campo.

En los años siguientes se destaca la investigación sobre la valorización de productos, subproductos y residuos tanto sólidos como líquidos del proceso de extracción de almidón de yuca, donde se evaluaron sistemas de tratamiento para las aguas residuales a escala de laboratorio, entre ellos el reactor UASB, el filtro anaerobio y el reactor de fases separadas[7]. La investigación se desarrolló con el apoyo de la Comunidad Económica Europea (CEE) y hacen parte de esta los siguientes estudios:

- La evaluación de la factibilidad de depuración de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en un reactor UASB a escala laboratorio realizado por Castrillón y Castrillón en 1994[8]. En el estudio se obtuvieron resultados de remoción alrededor de 70% de DQO para el efluente.

- La digestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en un reactor de fases separadas, realizado por Arroyave[9] en 1996. En esta investigación se encontró que la acumulación de ácido propiónico en el reactor, incide en la desestabilización de parámetros de operación como el Índice Buffer y los ácidos grasos volátiles (AGV), y que las variaciones en el pH se regulan con el mantenimiento de los tiempos de retención hidráulica (TRH) mínimos.

- La evaluación de la capacidad de inhibición de las bacterias metanogénicas debida a las concentraciones de cianuro presentes en el agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca utilizando reactores de flujo

---

[7] Rodríguez J V. Msc.; Torres L P. PhD. Experiencias en el tratamiento anaerobio de residuos agroindustriales – caso producción almidón agrio de yuca, 2002.

[8] Castrillón y Castrillón. Factibilidad de depuración de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca utilizando un reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos. Universidad del Valle, 1994

[9] Arroyave, Pulido. Factibilidad de depuración de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, utilizando un sistema de digestión anaerobia de fases separadas, 1996.

discontinuo, realizada por Aponte[10] en 1996. En este estudio se encontró que la toxicidad del cianuro sobre la fermentación metanogénica es reversible, recuperándose la producción de metano luego de retirar el tóxico.

- La evaluación de la eficiencia y el comportamiento hidráulico de un reactor anaerobio de flujo horizontal en el tratamiento de aguas residuales de una planta de extracción de almidón de yuca utilizando como medio de soporte bambú. Este estudio fue realizado por Gonzáles y Santander[11] en 1996 y en él encontraron la acumulación de AGV en el reactor y descensos en el pH que atribuyeron a la dificultad de acoplamiento entre los microorganismos acidogénicos y los metanogénicos, y a la utilización de un inoculo no aclimatado a este sustrato.

- La evaluación de la depuración de aguas residuales de la industria de la extracción de almidón de yuca, mediante la utilización de un biofiltro anaerobio de flujo ascendente con lecho de paja como soporte, realizado en 1996 por Córdoba y Salas[12]. En esta investigación se concluyó la importancia del control del pH y la carga orgánica para la etapa de arranque del reactor.

- La evaluación del comportamiento de tres sistemas de tratamiento anaerobio para la depuración de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, realizada por Rojas en 1999[13]. En este estudio el sistema que presentó mayores eficiencias fue el reactor de Fases Separadas sobre el de Lecho Fijo y el reactor UASB.

Para el periodo de tiempo comprendido entre 1997 y el año 2002, la Universidad del Valle y el Ministerio de Agricultura por medio del Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria (PRONATTA), desarrollaron el proyecto de investigación titulado “Diseño manejo, operación y control de un filtro anaerobio a escala piloto para la depuración de las aguas residuales de proceso de extracción de almidón de yuca de la región del Cauca. Definición de parámetros de diseño para escalamiento[14]. Forman parte de este proyecto los siguientes estudios:

- La evaluación de un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca usando cáscara de coco

---

[10] Aponte, L. Efectos del cianuro sobre la fermentación metanogénica. Estudios realizados a reactores anaerobios con flujo discontinuo, 1996.
[11] Gonzales, Jairo y Santander, Claudia. Factibilidad de depuración de los efluentes generados en el proceso de extracción de almidón de yuca por medio de un reactor anaerobio de flujo horizontal con medio de soporte de bambú, 1996.
[12] Cordoba, A Y Salas, D. Tratamiento de las aguas residuales de la pequeña industria de extracción de almidón de yuca utilizando un biofiltro anaerobio con lecho de paja, 1996.
[13] Rojas, O. Evaluación del comportamiento de tres sistemas de tratamiento anaerobio para la depuración de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, 1999.
[14] Rodríguez y Torres, Op. cit.

como medio de soporte, realizado por Bolaños y Arias[15] en el año 2001. En este estudio, el sistema no generó capacidad Buffer aún con la adición de alcalinizante, lo cual impidió concluir la etapa de arranque, esta situación se atribuyó a la utilización de inóculo no aclimatado y a la rapidez de fermentación del sustrato al interior del reactor.

- La corrección de pH en reactores anaerobios tratando aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca realizado por Pérez y Cajigas en el año 2002[16]. En el estudio encontraron que el bicarbonato de sodio era el alcalinizante que ofrecía mayores aportes de capacidad buffer y valores superiores en alcalinidad bicarbonática, obteniéndose mejores resultados en el desarrollo de la digestión anaerobia.

En la actualidad tesistas de la Universidad del Valle adelantan investigaciones enfocadas a la evaluación de las variables de operación de filtros anaerobios de flujo horizontal a escala real. Aunque se encuentran en el proceso de culminación de resultados, se han identificado dificultades en el proceso de arranque y operación de los reactores, generándose remociones de DQO la mayor parte del tiempo por debajo del 50%.

3.2 Requerimientos Nutricionales en Tratamientos Anaerobios

Desde comienzos de los años cincuenta se han venido realizando estudios acerca de los requerimientos nutricionales en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales de diferentes procesos industriales. Speece en 1996[17], resalta algunas de las investigaciones realizadas en este campo, entre ellas las descritas a continuación:

Los estudios planteados por Mc Carty[18] a finales de los años 50 dieron los primeros indicios de la necesidad de suplementación nutricional a los sistemas anaerobios. En su investigación encontró que el inoculo proveniente de un reactor para el tratamiento de aguas residuales domésticas, presentaba tasas de producción de gas metano mayores que un inoculo proveniente del cultivo puro de bacterias metanogénicas. Su conclusión fue que el primer inoculo contenía nutrientes esenciales para los microorganismos y que estos elementos se encontraban en las aguas residuales domésticas.

En el año 1962 Mc Carty y Vath[19], estudiaron algunos de los factores que inciden en el crecimiento de los microorganismos, encontrando que la utilización de lodo anaeróbico doméstico como inóculo en un reactor, incrementaba las tasas de utilización de acetato. De esta manera, concluyeron

---

[15] Bolaños, Carolina y Arias, Carlos A. Evaluación de un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca usando cáscara de coco como medio de soporte, 2001.
[16] Pérez y Cajigas. Corrección de pH en reactores anaerobios tratando aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, 2002.
[17] Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.
[18] Mc Carty, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996
[19] Mc Carty y Vath, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.

que la inhibición de los organismos metanogénicos, se debía probablemente a condiciones ambientales impropias, entre ellas las deficiencias de nutrientes en el sistema y que la dificultad para lograr monocultivos de metanogénicas estaba relacionada con la falta de metales trazas en el medio.

Posteriormente Speece en 1964[20], estudió la síntesis de biomasa a partir de varias clases de sustratos orgánicos durante el tratamiento anaeróbio. Simples sustratos como acetato, leucida, glucosa, almidón y celulosa, fueron alimentados con un medio inorgánico definido. Por curiosidad se adicionaron sales de cloruro de hierro al sistema, ocasionando que se duplicara la producción de metano y descubriendo de esta manera la necesidad de incluir el hierro en el medio inorgánico que alimenta el sistema.

Hoban y Van den Berg en 1979[21], reportaron que la adición de hierro a un cultivo metanogénico en el que se utilizaba ácido acético incrementaba notablemente la conversión de acetato a metano. Así mismo Callendar y Barford[22] en el año 1983, observaron que en el tratamiento anaerobio de aguas residuales de caña viche, la adición de hierro al sustrato del reactor incrementaba la conversión de acetato a metano, lo cual hacia posible una alta actividad metanogénica.

En 1983 Speece[23] realizó estudios para definir un medio que mantuviera altas tasas de utilización de sustrato, observando una demanda obligada de Níquel por las bacterias metanogénicas y descubriendo de esta manera una de las dificultades para obtener cultivos puros de metanogénicas en años anteriores. En el mismo estudio se encontró que cuando el Hierro, el Cobalto y el Níquel se mezclaban con otros componentes del medio inorgánico, se alcanzaron bajas tasas de utilización de acetato. Sin embargo cuando se adicionaron sales de cloruro de Hierro, Cobalto y Níquel directamente en los reactores, las tasas de utilización de acetato aumentaron.

En 1995[24] un informe de la Chemical Marketing Reporter publica los requerimientos de nutrientes específicos para 9 elementos componentes del medio nutritivo inorgánico necesario para lograr altas tasas de utilización de acetato (AUR). En el Cuadro 1 se muestra dicho reporte.

---

[20] Speece 1964, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.
[21] Hoban y Van den Berg 1979, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.
[22] Callendar y Barford 1983, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.
[23] Speece 1983, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.
[24] Chemical marketing reporter; Boletín, 1995 citado por Speece en 1996.

Cuadro 1. Requerimiento de nutrientes específicos para lograr AUR altas.

Elemento	Requerimiento (mg/g Ac)
NH_4- N	3.3
PO_4- P	0.10
S	0.33
Ca	0.13
Mg	0.018
Fe	0.023
Ni	0.0040
Co	0.0030
Zn	0.02

Fuente: Adaptado de Speece (1996).

En 1995 Speece[25] reporta la composición elemental de las bacterias metanogénicas, en donde se relacionan las funciones y requerimientos minerales de estas. Los efectos positivos de algunos de estos minerales ya habían sido reportados en 1989 por Hsu[26] y en 1983 por Scherer[27].

Wheatley et al[28]., en 1988, comprueban mediante estudios de laboratorio realizados a diferentes afluentes provenientes de industrias, que la mayor parte de estos desechos industriales incluyendo algunos provenientes de comidas, bebidas y fermentación industrial, no son balanceados nutricionalmente para un óptimo tratamiento anaerobio. En el Cuadro 2, se muestran algunas experiencias sobre los requerimientos de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales industriales.

[25] Speece 1995, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.
[26] Hsu 1989, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.
[27] Scherer 1983, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.
[28] Wheatley et al 1988, citado por Speece, R.E. Anaerobic Biotechnology For Industrial Wastewaters, 1996.

Cuadro 2. Experiencias de los requerimientos de micronutrientes en el tratamiento de aguas residuales industriales

Año	Efluente industrial	Autor	Aporte
1983	Comida procesada	Speece	Al evaluar el sistema de tratamiento de aguas residuales de este proceso encontró deficiencias de Cobalto. Estas fueron suplidas disminuyendo así la concentración de ácidos grasos volátiles de 3000 a menos de 500 mg/l.
1984	Suero de Leche	Kelly y Switzenbaum	Comprobaron que el tratamiento anaerobio para estos efluentes, se beneficio con la adición de nutrientes pues la concentración de AGV sin la adición alcanzó un valor de 3300 mg/l, mientras que con la adición de nutrientes tuvo un valor de 700 mg/l.
1988	papas a la francesa y guisantes congelados	Oleszkie	Al evaluar tres reactores UASB, el primero de ellos de control, el segundo con adición de Calcio y fósforo y el tercero con adición de Cobalto, Hierro y Níquel, encontró que se presentaba mayor granulación del lodo en el tercer reactor, además este mantenía los sólidos suspendidos volátiles (SSV) por encima de 100 kg/m^3 y la remoción de DQO por encima del 95%, mostrando funcionamiento más estable y menor vulnerabilidad a un sobresalto del tratamiento.
1991	Aguas residuales de Cervecería	Kida et al.	Reportó que cuando Níquel y Cobalto no se adicionaron por largo tiempo, los AGV se incrementaron en casi un 50% en un rango de 2 días.
1992	Aguas residuales de Helado	Hawkes et al.	Comparó tres reactores UASB, uno de ellos de control mientras los otros dos alimentados con metales traza, luego de un sobresalto en el tratamiento debido a la alta carga únicamente los reactores alimentados con metales traza fueron capaces de soportarla.
1993	Azúcar, proteínas y propionato	Mesa	En la operación de reactores UASB durante 70 días, observó que las concentraciones de DQO en los reactores operados con azúcar y alimentados con metales traza fueron mas bajas que en los que no hubo alimentación de metales. Los reactores operados con propionato y alimentados con metales traza, fueron capaces de soportar una sobrecarga orgánica
1994	Lodo Municipal	Owens	Encontró que en la operación de un reactor de lodo municipal, la concentración de AGV se incrementó gradualmente en la etapa de arranque; luego de alimentar el reactor con un cóctel de sales de Hiero, Cobalto y Níquel, la concentración de AGV's decreció nuevamente. Cuando se suspendió la alimentación de la concentración de AGV's aumento nuevamente.

Fuente: Adaptado de Speece (1996)

En nuestro país industrias como NABISCO – ROYAL y Cartones América en los años 1996, y 2000 respectivamente, implementaron sistemas de tratamiento biológicos para depurar las aguas residuales generadas en sus procesos productivos. NABISCO – ROYAL dosificó Nitrógeno y Fósforo en forma de Urea y Fosfato diamónico amoniacal respectivamente, con el fin de cubrir las necesidades nutricionales de los microorganismos, ya que el agua residual de la producción de levadura (melazas) presenta deficiencias en esos macronutrientes.

En Cartones América se decidió dosificar Ni y Fe en forma de cloruro de hierro y cloruro de níquel para mejorar la granulación del lodo y aumentar la sedimentabilidad del mismo en el reactor UASB. Una característica del lodo del sistema de tratamiento era su baja sedimentabilidad, una vez se inició la dosificación de los microelementos mencionados anteriormente la sedimentabilidad y apariencia del lodo mejoró drásticamente. Aún no se han realizado evaluaciones a los sistemas para determinar la incidencia de la dosificación de nutrientes en la eficiencia de remoción y en los demás parámetros de control. La operación de estos sistemas de tratamiento estuvo a cargo de BIOTEC Colombia[29].

Actualmente instituciones interesadas en el mejoramiento de la calidad de los efluentes del proceso productivo de almidón de yuca, mediante una solución que cumpla con requisitos de bajo costo en sus fases de implementación operación y mantenimiento, vienen trabajando en un programa de investigación y apoyo continuado para ayudar a los rallanderos del sector norte del Cauca a encontrar la solución más apropiada para el control del problema de contaminación.

Este estudio pretende colaborar en el proceso de búsqueda y lograr con sus resultados un aporte significativo a la posible solución de la problemática ambiental y socioeconómica que se presenta en el sector Rallandero. De ser posible la implementación de la dosificación de micronutrientes requeridos por las bacterias en el proceso de digestión anaerobia, con el objeto de aumentar las eficiencias de remoción de DQO en el sistema de filtro de flujo horizontal, se estaría aumentando la posibilidad de obtener mejores resultados para el sistema de tratamiento y su consolidación como alternativa de solución.

[29] Aponte, L. Com. Pers. 2004.

"El desarrollo sostenible es un proceso de mejoría económica y social, que satisface las necesidades y valores de todos los grupos interesados, manteniendo las opciones futuras y conservando los recursos naturales y la diversidad"

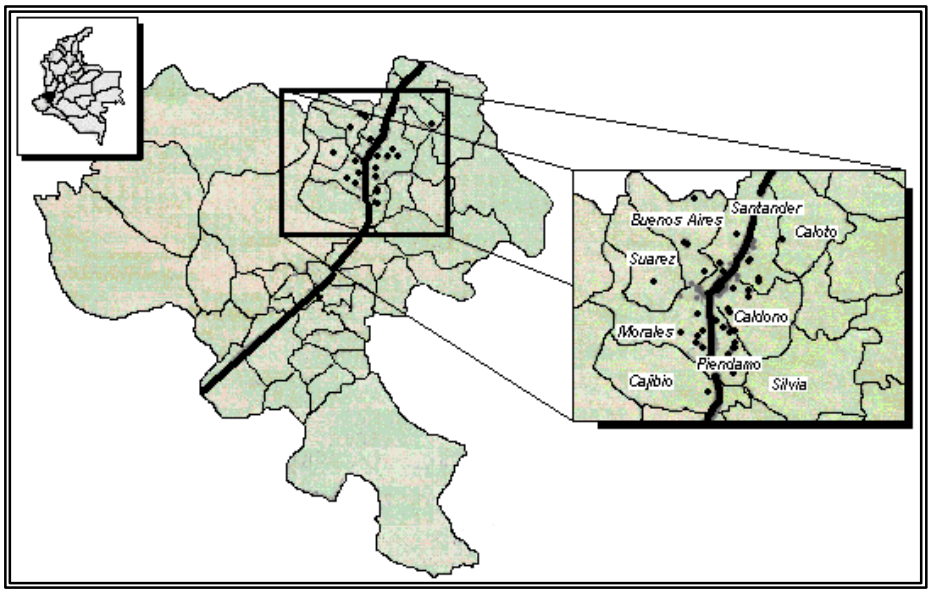
(Carrizosa J., 1998)[30].

4 JUSTIFICACIÓN

El departamento del Cauca es el principal productor de almidón de yuca en Colombia, hasta el año 2002 existían alrededor de 210 pequeñas a medianas unidades de procesamiento de almidón distribuidas en 85 veredas y 12 municipios del departamento. La capacidad de procesamiento instalada en la región se estima en 87.000 Ton de raíces de yuca por año que equivalen a una producción de 10.700 ton /año de almidón de yuca y representan entre el 70% y 80% de la producción total del país[31].

Esta actividad es la responsable de la generación de gran cantidad de empleos directos e indirectos en forma constante para etapas específicas del proceso productivo. La Figura 1 muestra la ubicación geográfica del sector Rallandero del Cauca.

Figura 1. Ubicación geográfica del sector Rallandero en el Departamento del Cauca.



Fuente: Pérez y Cajigas 2002.

El proceso productivo de extracción de almidón de yuca, genera el vertimiento de grandes volúmenes de agua residual, que oscilan entre los 9.5 y los 12 m^3

[30] Carrizosa U J. La política ambiental en Colombia, Desarrollo Sostenible y Democratización. 1998

[31] Corporación regional del Cauca (CRC). Evaluación de calidad del recurso disponible en el departamento de Cauca, 2003.

por tonelada de yuca procesada[32] y presentan valores de DQO entre 2.500 - 5.500 mg/l; los cuales representan en promedio una carga contaminante de 13.5 y 3.5 toneladas por día de DQO y DBO respectivamente. Estos desechos al ser vertidos indiscriminadamente y sin tratamiento previo a los cuerpos de agua superficiales, representan un riesgo significativo tanto a la salud humana como a la flora y fauna existente en las cuencas hidrográficas de la región[33].

En la actualidad importantes recursos hídricos del departamento reciben el vertimiento de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, entre estos se encuentran el río Quilichao el cual es usado como fuente de abastecimiento doméstico del acueducto de Santander de Quilichao y los ríos Mandivá y Quinamayó los cuales a su vez son usados en la extracción de material de arrastre y la recreación. Las quebradas Agua Sucia y Agua Caliente son usadas para el riego, los procesos agroindustriales, la industria y la recepción de aguas residuales del alcantarillado de Santander de Qulichao[34].

El tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca es indispensable para garantizar la salubridad de los sectores intervenidos por esta actividad industrial, además de contribuir con su continuidad promueve la reactivación del agro con la siembra de productos agrícolas como este tubérculo y el uso de las fuentes hídricas que abastecen el proceso y que a su vez sirven como receptoras de sus vertimientos.

Sin embargo muchos de los pequeños y medianos industriales cuentan con recursos económicos escasos para asumir los costos de un programa de control y tratamiento para los vertimientos generados en el proceso productivo. Dado que la implementación de una tecnología responde a un interés institucional en pro de la preservación de las cuencas hidrográficas de la región, los rallanderos contarán para ello con el apoyo de las instituciones interesadas, así podrán establecer metas sectoriales de reducción de la carga contaminante, cumplir con las tarifas mínimas establecidas en la Resolución 372 de 1998[35], las cuales continúan vigentes hasta que el Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial haga su modificación o sustitución y en el futuro enfrentar el pago de las tasas retributivas por contaminación a los recursos hídricos, las cuales deberían estar aplicándose según lo consignado en el Decreto 1594/84[36] y el Decreto 3100/2003[37].

Por esta razón, la corporación regional del Cauca (CRC) con el apoyo de instituciones de investigación de la región como la Universidad del Valle y el Centro internacional de agricultura tropical (CIAT), han realizado investigaciones encaminadas a evaluar y comparar diferentes sistemas de tratamiento biológico anaerobio para dichas aguas residuales, producto de las cuales se eligió el sistema de filtro anaerobio como la mejor alternativa,

---

[32] Rodríguez y Torres, Op. cit.
[33] Rojas, O. "Procesos agroindustriales, origen de los desechos y opciones del tratamiento", 1992.
[34] Corporación regional del Cauca, Op. cit.
[35] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Op. cit.
[36] Ibid.
[37] Ibid.

obteniendo gran aceptación y buenos resultados por su bajo costo en las etapas tanto constructiva como operativa, así como por la disponibilidad de materiales en la región[38]. Sin embargo su implementación a escala real, ha generado dificultades en el proceso de arranque del sistema anaerobio, presentándose generalmente remociones de materia orgánica alrededor del 50%[39].

Una de las posibles causas es que es poco lo que se conoce sobre los requerimientos nutricionales de los microorganismos involucrados en los procesos biológicos del sistema de tratamiento[40], siendo de vital importancia ya que algunos de estos microorganismos son incapaces de sintetizar todos los componentes de sus coenzimas y deben ser suplementados con ciertas partes de estas en forma de vitaminas y nutrientes, para garantizar un mejor rendimiento en la degradación del contaminante a tratar[41], desafortunadamente estos no se encuentran disponibles en las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en las concentraciones adecuadas, lo cual dificulta el arranque y operación del filtro anaerobio.

Debido a la poca, investigación sobre los requerimientos nutricionales en el proceso anaerobio para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la extracción de almidón de yuca, surge el presente estudio que tiene por objeto la evaluación de algunos nutrientes existentes en este tipo de agua residual y el efecto de la adición de hierro y níquel en su digestión anaerobia. Se espera que este sea un documento de soporte técnico que permita mejorar a escala real el tratamiento biológico, ya que con este documento se beneficiaran la generación de las condiciones necesarias para el desarrollo y crecimiento de la biomasa, el logro de mejores eficiencias de remoción y el éxito de este sistema anaerobio.

---

[38] Pérez A, Cajigas A, Torres P, Rodríguez J. El pH en residuos de almidón de yuca, en Revista Acodal Nº 196, pag 42-50.
[39] Valencia M, Vargas H. Desempeño de un filtro anaerobio de flujo horizontal con guadua como medio de soporte en la depuración de los efluentes del proceso de extracción de almidon de yuca, 2004.
[40] Campos, P et al. Biogas y aprovechamiento de la biomasa, Op. cit.
[41] Raul, R, Nutrición Bacterial.

5 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

5.1 Generalidades de la agroindustria de almidón de yuca

5.1.1 La Raíz de Yuca

La yuca (*Manihot Utilssima*), conocida comúnmente como Tapioca, Mandioca (Manioc) o Casaba (cassava), perteneciente a la familia de las liláceas (*Euphorbiaceae) y al género de la Manhiot esculenta*. Este tubérculo es originario de la región amazónica de la América del Sur y se encuentra también en el sur del continente asiático y en el sur del africano, siendo actualmente estos continentes sus mayores productores. Este es un cultivo cuya producción se adapta a ecosistemas diferentes, pudiéndose producir bajo condiciones adversas y climáticas marginales[42].

Las principales ventajas de la yuca son su mayor eficiencia en la producción de carbohidratos en relación con los cereales y su alto porcentaje de almidón contenido en sus raíces. La yuca se clasifica como "dulce" y "amarga", por el contenido de *glucosato cianogénico* en las raíces. A diferencia de las amargas, las variedades dulces registran muy baja o ninguna presencia del principio tóxico[43].

La yuca constituye la principal fuente de alimentación de más de 300 millones de personas en los países tropicales, donde el 70% de la producción es utilizada en varias preparaciones de alimentos. En América Latina, alrededor del 40% de la producción de yuca es destinada al consumo humano[44].

5.1.2 Almidón de Yuca

El almidón es uno de los principales componentes de la yuca y de otras raíces y tubérculos, se encuentra almacenado en gránulos y se extrae utilizando un proceso de disolución en agua y filtrado con mantas. Su composición química es básicamente de amilosa y amilopectina[45], dos carbohidratos de estructura distinta, que son los que le dan las propiedades funcionales al almidón. Ambos se encuentran en proporciones diferentes dependiendo de donde se obtenga el almidón y de otras variables. Ver Figuras 2 y 3.

---

[42] Alnicolsa del Perú S.A.C. 2004.
[43] Ibid.
[44] Alarcón, M.; Dofour, D; Almidón Agrio de yuca en Colombia : Producción y recomendaciones. CIAT – CIRAD, 1998. Volumen 1. Publicación CIAT No. 268.
[45] Ibid.

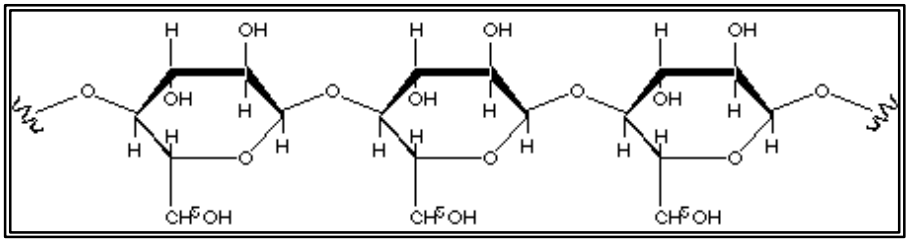


Figura 2. Estructura Química de Amilosa.

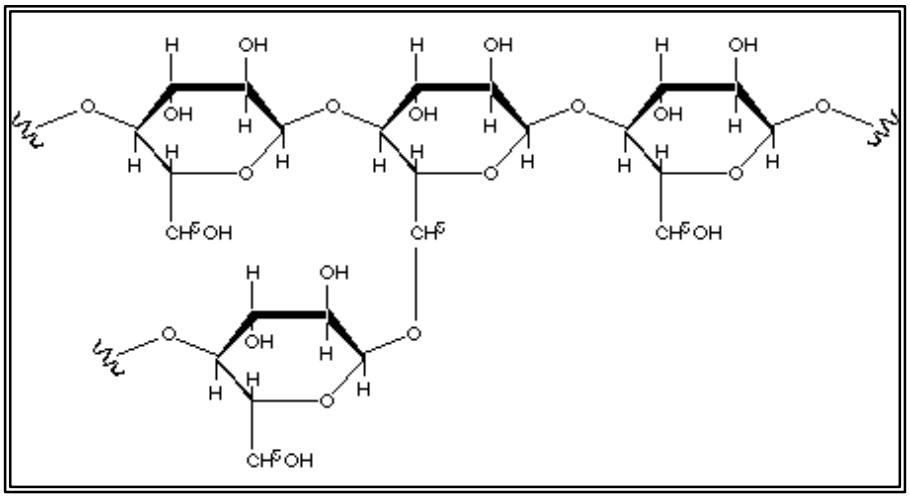


Figura 3. Estructura Química de Amilopectina.

El almidón de yuca es un polvo fino de color blanco, con aproximadamente un 13% de humedad como máximo y un pH cercano a 6. Es utilizado en la industria alimentaria como ligante de agua, coadyuvante de emulsificantes, fuente de carbohidratos, espesante y agente texturizante. Por sus propiedades se puede utilizar en la industria alimentaria para alimentos extruidos y en rellenos de pastel. También se utiliza como espesante en alimentos naturales para sustituir parcialmente el almidón de maíz y de papa en algunos procesos y en alimentos para bebés[46].

Otros usos del almidón de yuca son la obtención de alcoholes, glucosa, acetona, en la manufacturación de explosivos, colorantes, en la coagulación del caucho, en lavandería, en la industria papelera y textil, en la fabricación de pilas secas e impresiones dentales. En la perforación de pozos de petróleo se emplea como componente de los líquidos perforadores y como floculante en minería. Los subproductos de las rallanderías, mancha y afrecho, se utilizan principalmente para elaborar alimentos concentrados para animales y adhesivos[47].

---

[46] Alnicolsa del Perú S.A.C. Op, cit.
[47] Ministerio de agricultura y desarrollo rural. La Economía de la Yuca en Colombia, 1998.

5.1.3 Proceso de extracción de almidón de yuca

A diferencia de los almidones de cereales, que requieren procesos industriales muy tecnificados, los almidones de raíces y tubérculos (papa, batata, achiras y yuca) son más fáciles de obtener en el medio rural[48]. Su obtención requiere básicamente las siguientes etapas[49]:

- ***Lavado y pelado*:** El propósito de esta operación es eliminar la tierra, las impurezas y la cascarilla. Para ello se utilizan tambores giratorios, donde las raíces de yuca reciben chorros de agua mientras se friccionan unas con otras y contra la lámina del tambor[50]. El flujo de agua ayuda a desprender las impurezas y la cascarilla; se consumen aproximadamente $8m^3$ de agua por tonelada de yuca sucia, generando grandes volúmenes de agua residual con concentraciones bajas de DQO y altas concentraciones de sólidos suspendidos[51]. En la Foto 1, se muestra la maquinaria empleada para el lavado y pelado de la yuca.
-

Fuente: Rivier 2001.

Foto 1. Proceso de lavado y pelado de la yuca.

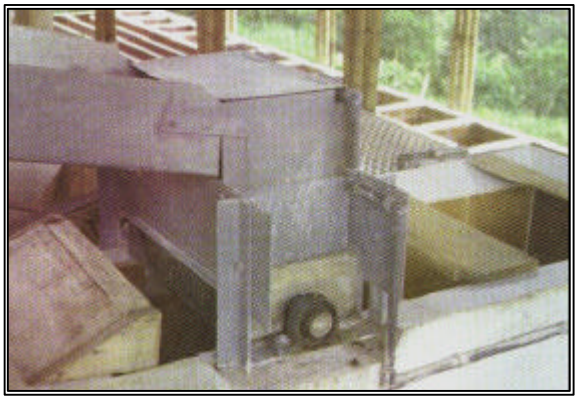
- ***Rallado del tubérculo:*** Después que el tubérculo es lavado y pelado se procede a rallarlo en un cilindro de madera montado en un eje de hierro, recubierto por una lámina de hierro galvanizado y perforado manualmente en toda su área. En el rallado se liberan los gránulos de almidón contenidos en las células de la raíz. El producto de esta etapa es una pulpa que se recoge en un tanque de cemento y está constituida por almidón, afrecho y agua. En esta etapa se generan pequeños volúmenes de agua residual. En la Foto 2, se muestra la maquinaria empleada en el rallado de la yuca.

- ***Colado o Tamizado:*** Esta es la operación más lenta del proceso de extracción del almidón, siendo considerada su principal limitante, aquí se

---

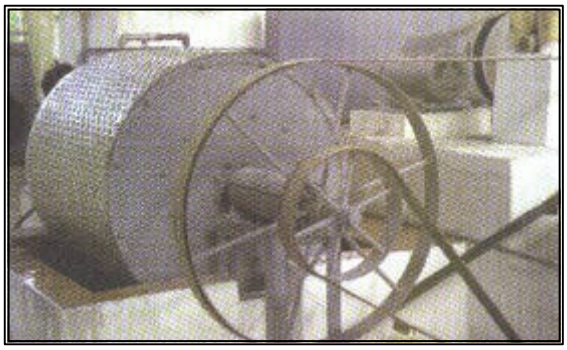
[48] Alarcón, M.; Dofour, D. Almidón Agrio de yuca en Colombia. Op, cit..
[49] Ciat, Cirad - Sar, et al. La Industria del Almidón en el Departamento del Cauca, Colombia. 1995.
[50] Ibid.
[51] Rodríguez V. Msc.; Torres PhD. Experiencias en el tratamiento anaerobio de residuos agroindustriales. Op. cit.

separa el afrecho del almidón disuelto en el agua, utilizando un tambor giratorio recubierto con una lámina galvanizada con perforaciones circulares, estas recubiertas a su vez con nylon o seda[52]. El afrecho separado es utilizado como alimento para animales. En la Foto 3, se muestra la maquinaria utilizada en el colado y tamizado de la yuca.



Fuente: Rivier 2001.

Foto 2. Proceso de rallado de la yuca



Fuente: Rivier 2001.

Foto 3. Proceso de Colado o tamizado de la yuca

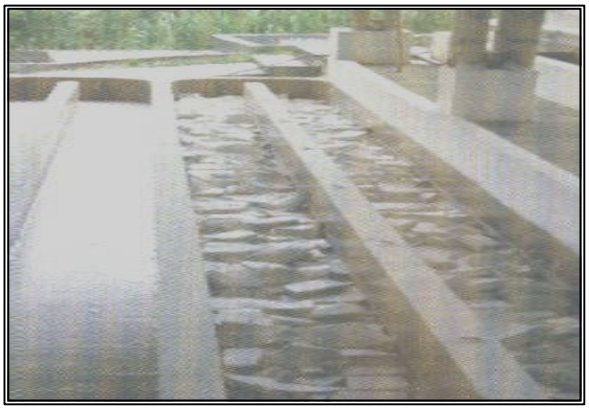
- ***Sedimentación:*** Cuando la lechada de yuca rallada sale de la coladora, contiene almidón, fibra fina y material proteico en suspensión. Con la sedimentación se pretende separar el almidón del agua y para tal fin se utilizan canales o tanques. Los rallanderos han podido comprobar que se logra una mejor sedimentación utilizando canales, lo cual demanda mayor extensión de terreno para su construcción[53].

El tiempo de sedimentación es aproximadamente de 8 a 16 horas. Aquí es donde se genera el mayor volumen de aguas residuales, con altas concentraciones de DQO. Al terminar la sedimentación, se obtienen tres capas en los canales y dos tipos diferentes de almidón: la capa inferior es el *almidón*

[52] Ciat, Cirad - Sar, et al. Op, cit.
[53] Ibid.

puro, la intermedia es denominada *mancha,* esta presenta espesor variable y está compuesta por almidón mezclado con material proteico y la capa superior es el agua residual[54].

El almidón que se compacta en el fondo de los tanques o canales, es transportado directamente al lugar de secado si se pretende producir almidón natural (nativo) para uso industrial o alimentario o a los tanques de fermentación donde se convierte en almidón agrio (fermentado) para uso en panificación[55]. En la Foto 4, se muestran los canales de sedimentación del almidón de yuca.



Fuente: Rivier 2001.

Foto 4. Canales empleados en la sedimentación del almidón de yuca.

- ***Fermentación:*** En esta etapa el almidón húmedo obtenido pasa a una serie de tanques, en donde permanece de 20 a 30 días hasta alcanzar la acidez deseada, de allí el nombre de almidón agrio, esta fermentación se realiza a través de acciones bacterianas. Terminada la fermentación, el almidón se extrae en bloques compactos y se transporte al local de secado[56].

- ***Secado:*** El almidón fresco o ya fermentado posee cierta cantidad de humedad, motivo por el cual es necesario secarlo. El almidón nativo se seca empleando medios naturales o artificiales mientras que el fermentado debe secarse solamente con el calor generado por la radiación solar. El tiempo de secado es de aproximadamente un día, después del cual el almidón presenta un contenido de humedad entre 12 y 14% y una vez cernido es empacado[57].

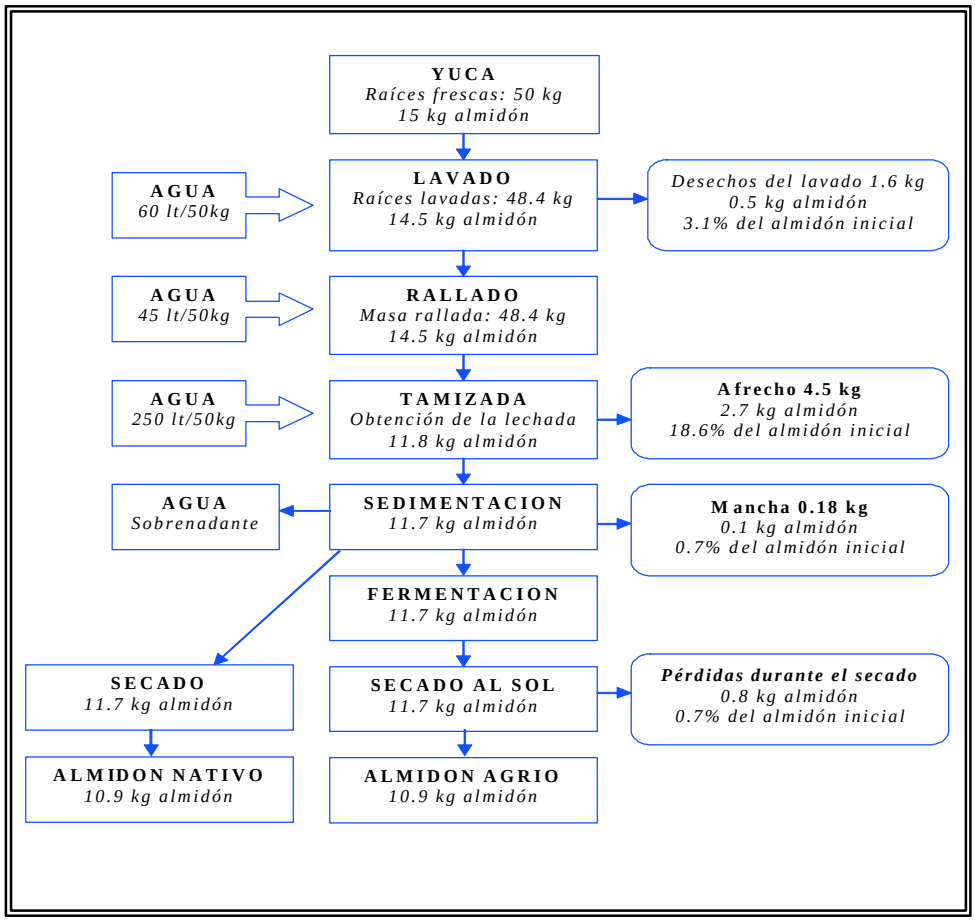
Las aguas residuales que provienen del lavado de la yuca son ricas en materia inerte y presentan valores de DQO bajos; pero son las que contienen mayor

---

[54] Rodríguez V. Msc.; Torres PhD. Op. cit.
[55] Ibid.
[56] Ciat, Cirad - Sar, et al. Op. cit..
[57] Ibid.

proporción de cianuro (40-70%); mientras que las aguas provenientes de los tanques o canales de sedimentación contienen valores altos de DQO y DBO[58].

En la Figura 4, se muestra el diagrama descriptivo del proceso de producción de Almidón de yuca en una Rallandería.



Fuente: Adaptado de Torres y Rodríguez, 2002

Figura 4. Diagrama descriptivo del proceso de extracción de almidón de yuca.

5.2 Impacto ambiental generado por el proceso de extracción de almidón de yuca.

En nuestro país y por diferentes razones, la extracción de almidón de yuca es uno de los procesos agroindustriales que vierte sin ningún control sus desechos líquidos a quebradas y ríos, la mayoría de ellos con bajo caudal lo cual agudiza el problema de contaminación hídrica. Estas aguas residuales se generan en los procesos que se realizan para la obtención del producto final,

[58]BernaL, EI., Gijzen, H., y Ferrer, H. Efecto del Cianuro sobre los organismos que intervienen en la fermentación anaerobia del almidón de yuca. En: Memorias IV Seminario – Taller Latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales, 1996.

específicamente en la etapa de lavado y en el desagüe de la etapa de sedimentación[59].

El agua en contacto con la materia prima, en este caso específico yuca, disuelve una enorme cantidad de materiales de naturaleza orgánica e inorgánica, cargándose de esta manera de elementos y compuestos potencialmente nocivos para la biota de los cuerpos de agua receptores de estos vertimientos y la salud pública[60].

En Colombia, los vertimientos de este proceso tienen un potencial de contaminación alto, debido en primer lugar al gran volumen utilizado de agua, derivado de la técnica con que se realizan las operaciones a escala pequeña y mediana y en segundo lugar al alto contenido de materia orgánica que permite clasificarlas como de mediana y alta fuerza y con gran carga contaminante. Además poseen en su estructura química compuestos glicogénicos cianurados de comprobada y alta toxicidad, incluso para los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica en los procesos biotecnológicos de depuración[61].

En el norte del departamento del Cauca se han realizado varias caracterizaciones de los efluentes de las rallanderías de la región, sus características fisicoquímicas presentan muchas diferencias debido a la variación en la calidad y especie de la yuca y al proceso de producción de almidón al que se somete, como se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Características fisicoquímicas de los efluentes del proceso de extracción de almidón de yuca.

Parámetro	Valor Promedio	Rango
DQO (mg O_2/ l)	9,100	3,900 – 12,800
DBO_5^- 20º C (mg O_2/ l)	3,100	1,500 – 8,600
DQO/DBO_5 (relación)	2,9	-
Cianuros (mg CN^-/ l)	2,12	1,2 – 4,04
Sólidos Totales (mg/ l)	5,740	2,680 – 10,020
Sólidos Volátiles (mg/ l)	4,870	2,020 – 9,320
Carbono Orgánico Total (mg/ l)	2,420	870 – 5,300
pH (unidades)	-	3,9 – 4,7
Temperatura (ºC)	-	19 – 22
Sedimentabilidad (ml/ l)	29	15 – 47
Nitrógeno (mg N/ l)	105	29 – 233
Fósforo (mg P/ l)	21.2	0,3 – 25

Fuente: Adaptado de Raddatz, 1997 y Rojas, 1999.

5.3 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico fermentativo, en el cual la materia orgánica medida como demanda química de oxigeno biodegradable (DQO_{BD}), es descompuesta en ausencia de oxigeno molecular por la acción de

[59] Rojas, O, 1999. Op. cit.
[60] Rojas O, Ibid.
[61] Ciat, Cirad - Sar, et al, 1995. Op. cit.

una serie de microorganismos bacterianos y transformada en nuevas células bacterianas y en una mezcla de gases constituida principalmente por metano y dióxido de carbono.

$$MO + Nutrientes \xrightarrow{Microorganismos\ Anaerobios} CH_4 + CO_2 + NH3 + BIOMASA$$

El proceso de DA, frente a los procesos aerobios, transcurre con un menor desprendimiento calorífico, lo que determina un mayor contenido energético de los productos resultantes y consecuentemente, un mayor rendimiento energético del proceso[62] como lo muestra el Cuadro 4.

Los principales substratos susceptibles de degradar por digestión anaerobia son[63]:

- residuos agrícolas y ganaderos
- cultivos energéticos
- residuos industriales orgánicos
- aguas residuales urbanas e industriales
- lodos de depuradora
- fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.

Cada tipo de substrato plantea una serie de ventajas e inconvenientes, ante la fragilidad de la población microbiana, ya que estos complejos bacteriales pueden ser paralizados, parcial o totalmente, por diversos factores, presentando diferentes potenciales de producción de biogás y por ende distintas eficiencias de metabolización de material orgánico[64].

Cuadro 4. Ventajas y Desventajas de la Digestión Anaerobia.

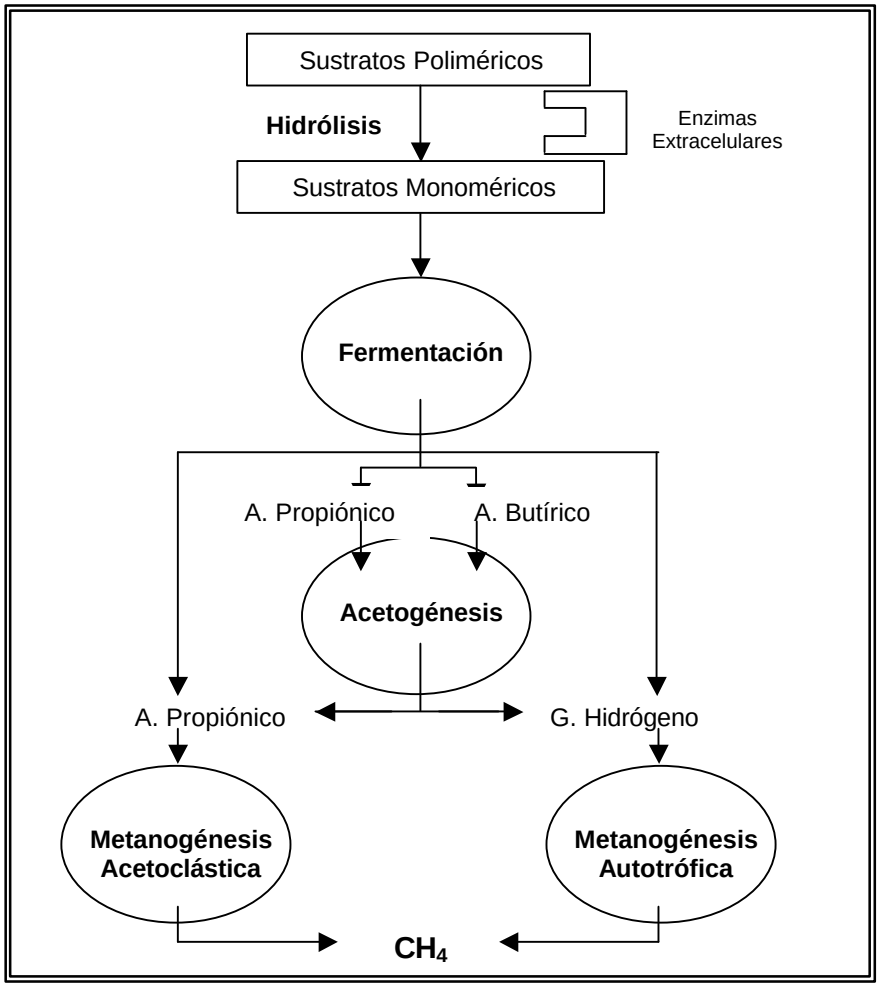
Ventajas	Desventajas
– Menor fracción de la energía total disponible usada por los microorganismos para su propio crecimiento.	– Es un proceso complejo que requiere bastante control para asegurar un correcto funcionamiento.
– Mayor grado de estabilización.	
– Menor producción de lodos biológicos.	– Existe gran cantidad de tóxicos e inhibidores del proceso, que pueden hacerlo no viable para el tratamiento de determinados substratos.
– Menores requerimientos nutricionales, no necesita oxigeno, por lo cual hay menores necesidades energéticas	
– Transforma la MO en un gas combustible y mineraliza el residuo.	– Es muy sensible a las sobrecargas orgánicas por lo que la alimentación deberá ser lo más homogénea posible
– Se produce un desdoblamiento de la materia orgánica en combustible y fertilizantes (N, P, K) de forma natural, conservando la mayor parte de los compuestos minerales	

Fuente: Adaptado de Campos Pozuelo et al., 2000.

[62] Campos, P et al. Biogas y aprovechamiento de la biomasa, Op. cit.
[63] Ibid.
[64] Ibid.

5.3.1 Procesos de Conversión en Sistemas Anaerobios

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico complejo compuesto por varias reacciones secuénciales, cada una con su población bacteriana específica. Los compuestos orgánicos (DQO) o sustratos poliméricos como proteínas, carbohidratos y lípidos que eventualmente pueden ser utilizados en un determinado ambiente anaeróbico (DQO_{BD}) son degradados por la combinación de cuatro grandes tipos de bacterias anaeróbicas[65]. El curso de la DQO en el ambiente microbiano anaerobio se muestra en la Figura 5. Los procesos intracelulares ocurren dentro del circulo y los extracelulares fuera de el.



Fuente: Zegers F. 1987

Figura 5. Flujo de la DQO a través de una comunidad microbiológica anaeróbica.

---

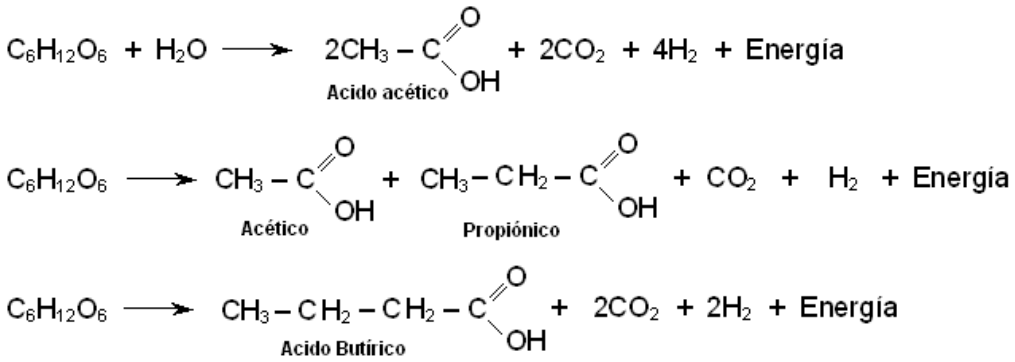
[65] Zegers, F, "Microbiología". En: Curso sobre Arranque y Operación de Flujo Ascendente con Manto de Lodos–UASB, 1987.

- **Hidrólisis:**

Los sustratos poliméricos son inicialmente hidrolizados por enzimas extracelulares. Estos compuestos son hidrolizados fuera de la célula bacterial por ser demasiado grandes para penetrar a través de la membrana celular. Las enzimas extracelulares son producidas dentro de las bacterias fermentativas y excretadas fuera de la célula. En el exterior, estas pueden atacar los sustratos poliméricos e hidrolizarlos hasta monómeros más pequeños (azúcares, aminoácidos y grasas) que pueden atravesar fácilmente la membrana celular de las bacterias fermentativas. El fraccionamiento de la materia orgánica absorbe agua y por ello es llamado hidrólisis.

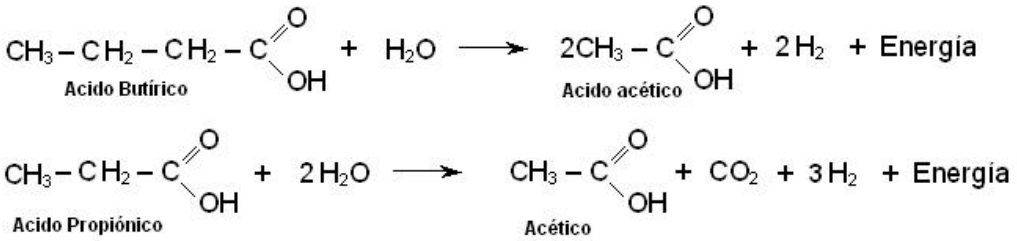
- **Acidogénesis:**

Las bacterias fermentativas metabolizan los sustratos monoméricos dentro de la célula. Generalmente, solo una pequeña cantidad de la energía potencial en la DQO_{BD} es utilizada para la fermentación. Una gran proporción de la DQO_{BD} consumida (casi el 80%) es luego excretada fuera de la célula en forma de alcoholes, ácidos grasos volátiles (AGV) y gas hidrógeno. Los productos principales de la fermentación son AGV (ácido acético, propiónico y butírico). El resultado total de la fermentación es la conversión de sustratos neutros, tal como azúcares y aminoácidos, en ácidos orgánicos relativamente fuertes.



- **Acetogénesis:**

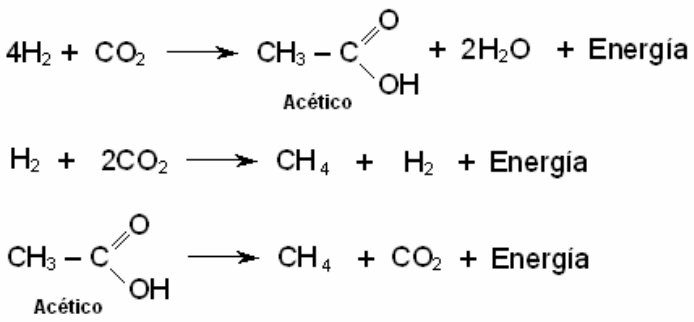
Al final de la fermentación, la mayoría de la DQO_{BD} se encuentra en cuatro compuestos tales como ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico y gas hidrógeno. Los productos finales de la fermentación como el ácido butírico y el ácido propiónico, no son sustratos directos de las bacterias metanogénicas, por lo tanto un grupo metabólico intermediario de organismos llamados bacterias acetogénicas, los toman dentro de sus células y los oxidan anaeróbicamente hasta acetato (C_2) e hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), para luego ser excretados fuera de la célula. Aproximadamente el 70% de la DQO_{BD} es convertida en ácido acético y el resto en hidrógeno.



- **Metanogénesis:**

La DQO_{BD} degradada a C_2 y H_2 proviene en una parte de la fermentación y en otra de la Acetogénesis. Estos dos compuestos son los verdaderos sustratos metanogénicos. Ambos son tomados dentro de las células bacteriales metanogénicas y metabolizados a metano, que a su vez es excretado fuera de la célula. Dependiendo de la cantidad de sustrato metanogénico usado, se pueden clasificar las bacterias metanogénicas en dos grupos principales:

- Productoras de metano a partir de ácido acético o metanol (acetoclásticas): $CH_3COO^- + H^+$? $CH_4 + CO$.
- Productoras de metano a partir de Hidrógeno o gas carbónico (hidrogenotróficas): $4H_2 + HCO_3^- + H^+$? $CH_4 + 2H_2O$.

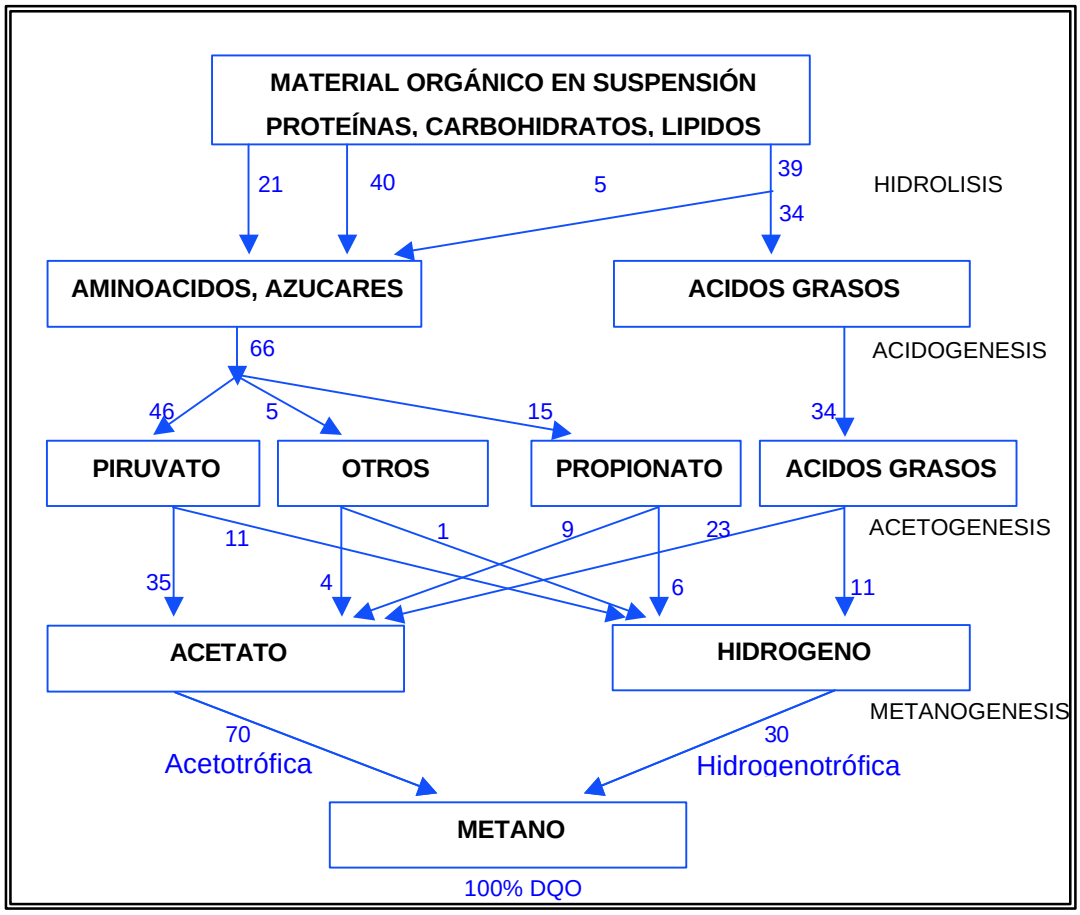


Las bacterias que producen metano a partir de hidrogeno crecen mas rápidamente que aquellas que usan ácido acético, de modo que las metanogénicas acetotróficas o acetoclásticas generalmente limitan la velocidad de transformación de material orgánico complejo.

Cada una de las cuatro fases de la digestión anaerobia pueden representar un riesgo en el desarrollo del proceso, sin embargo las etapas de Acetogénesis y Metanogénesis son las limitantes, debido en primer lugar a la extrema lentitud con que se desarrolla la actividad bacterial, lo que ocasiona que cualquier alteración de la población microbial demore mucho tiempo en corregirse y en segundo lugar a la velocidad con que crecen las poblaciones de bacterias Hidroliticas y Acidogénicas, esto genera acumulación de los AGV producidos en la Acidogénesis, inhibiendo por ende la metanogénesis[66].

[66] Perez y Cajigas, Op. cit.

La secuencia de los procesos de las macromoléculas complejas durante la digestión anaerobia se muestra en la Figura 6.



Fuente. Foresti et al., 1999

Figura 6. Secuencia de los procesos de las macromoléculas complejas durante la digestión anaerobia.

5.3.1.1 Sintrofía

Lo relevante de todo el proceso, son las asociaciones sintróficas entre los diferentes grupos bacterianos, las cuales hacen referencia a las interacciones microbianas en donde algunos microorganismos en vez de competir por el mismo nutriente, colaboran para llevar a cabo una transformación determinada que ninguno otro de los que intervienen en el proceso podría realizar por si mismo. Las relaciones sintróficas generalmente requieren que los dos o mas organismos que participan convivan en un mismo microambiente, ya que el producto del metabolismo de uno de ellos debe ser de fácil acceso al segundo[67].

[67] Brock, Biología de los microorganismos.

En el proceso general de producción de metano a partir de la fermentación de un polisacárido típico, pueden intervenir hasta cinco grupos fisiológicos importantes de procariotas. Un ejemplo específico de sintrofía es la dependencia de las bacterias acetogénicas por la metanogénesis autotrófica. Lo anterior hace necesario garantizar dentro del reactor flora microbiana equilibrada[68].

5.3.2 Factores Ambientales Incidentes en la Digestión Anaerobia

El éxito de la digestión anaerobia depende de mantener los factores ambientales dentro de los requerimientos de los microorganismos involucrados en el proceso. Desde que la metanogénesis es considerada la etapa limitante en el tratamiento anaerobio de aguas residuales, los factores ambientales incidentes son en mayor medida los que permiten a las bacterias seguir produciendo metano[69]. Los principales requerimientos ambientales de la digestión anaerobia son los siguientes:

- **Temperatura**

Los procesos anaerobios como otros procesos biológicos dependen fuertemente de la temperatura. Los niveles de reacción química y biológica y por ende la velocidad del proceso normalmente aumentan con el incremento de la temperatura. Sin embargo también aumentan los requerimientos energéticos y puede disminuir la estabilidad del proceso, al menos en presencia de determinados tóxicos[70].

Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen de la termoestabilidad en la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo[71]. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo debido a la degradación de las enzimas, lo cual resulta crítico para la vida de las células microbiales, ya que al no contar con mecanismos de control, la temperatura en su interior estará determinada por la temperatura del ambiente externo[72].

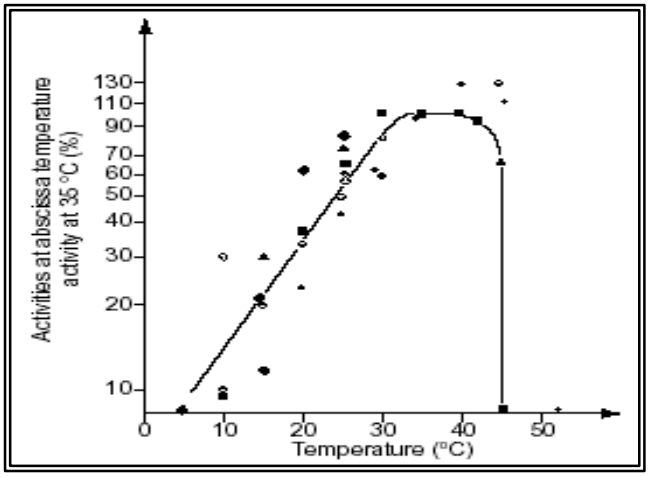
La sensibilidad a los cambios de temperatura ambiental depende de diversos factores, principalmente del grado de adaptación del cultivo, del modo de operación y del tipo de reactor. Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el reactor, esto se debe a que los demás grupos crecen más rápido, como las bacterias acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un catabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas.

---

[68] Rojas, O, 1999. Op. cit.
[69] Sung Shihwu, Ph.D., PE. Anaerobic Waste Treatment.
[70] Campos P E. Nutrientes, Ph y AGV.
[71] R. Sosa, R. Chao y J. del Río, Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogás.
[72] Perez y Cajigas, Op. cit.

Existen tres rangos de temperatura para la digestión de residuales, el primer rango es el mesofílico (de 20 a 45 ^{0}C), el segundo es el termofílico (por encima de 45 ^{0}C) y el tercer rango que es el psicrofílico ocurre entre los 10 y 25 ^{0}C, el rango óptimo puede ser de 35 ^{0}C a 55 ^{0}C. La ventaja de la digestión termofilica es que la producción de biogás es aproximadamente el doble que la mesofílica, así que los biodigestores termofílicos pueden ser la mitad en volumen que los mesofílicos, manteniendo su eficiencia general[73]. Las bacterias que crecen en cada uno de estos intervalos de temperatura son organismos distintos, por ello si el intervalo de temperatura cambia, es necesario arrancar de nuevo el reactor. Una nueva población bacterial ha de ser cultivada[74].

Dado lo anterior la eficiencia de la digestión anaerobia depende de la velocidad de remoción y utilización del sustrato, las cuales a su vez están determinadas por la concentración de microorganismos en el reactor y dependen de la temperatura. La figura 6, muestra la influencia de la temperatura sobre los microorganismos anaerobios[75].



Fuente: Shihwu Sung

Figura 7. Efecto de la temperatura sobre la actividad anaerobia

- **Alcalinidad, pH y Ácidos Grasos Volátiles**

Cada organismo tiene un rango de pH dentro del cual es posible el crecimiento y normalmente posee un pH óptimo bien definido. La mayoría de los ambientes tienen valores de pH de 5,9, y los organismos con pH óptimo equivalente son los habituales. Solo algunas especies pueden crecer a pH inferior a 2 o mayor a 10.

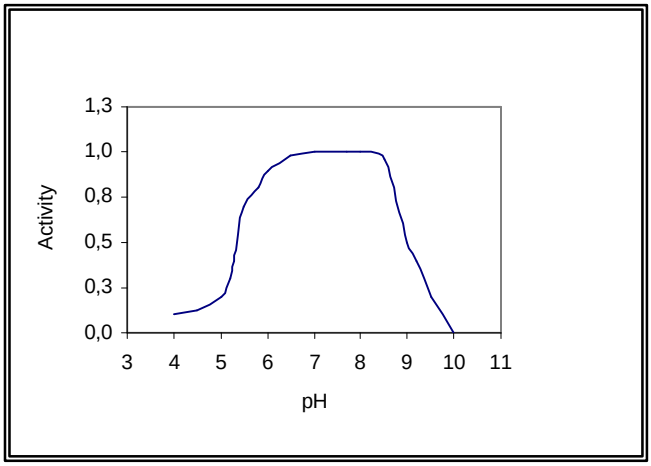
Los microorganismos anaerobios aunque necesitan un pH cercano a la neutralidad para su correcto desarrollo, permiten cierta oscilación. Las bacterias formadoras de metano tienen un crecimiento óptimo entre 6,6 y 7,4 unidades de pH, sin embargo para que el proceso de digestión anaerobia se

[73] R. Sosa, R. Chao y J. del Río, Op, cit., p. 27.
[74] Zegers, F, Op. cit.
[75] Sung, Shihwu, Op. cit.

desarrolle de forma satisfactoria, el pH debe estar en el rango entre 6 y 8,3 unidades de manera que no afecte la actividad enzimática de los microorganismos. La Figura 7 muestra la actividad metanogénica con respecto al pH.

Debe quedar claro que independientemente de las condiciones extremas en que vivan los microorganismos (del pH del ambiente extracelular), el pH intracelular debe permanecer cercano a la neutralidad, con objeto de impedir la destrucción de las macromoléculas hábiles en condiciones ácidas o alcalinas[76].

Muchos fenómenos tienen influencia sobre el pH, ejemplos clásicos son las sobrecargas orgánicas, o la presencia de un inhibidor de la etapa metanogénica[77], los cuales pueden provocar desequilibrios entre la producción y el consumo de ácidos grasos volátiles, ocasionando la acumulación de éstos, el consiguiente descenso del pH y como consecuencia la acidificación del reactor[78].



Fuente: Shihwu Sung

Figura 8. Actividad de las bacterias metanogénicas en relación al pH

Cuando la población de bacterias metanogénicas se encuentra presente en cantidad suficiente, las condiciones ambientales en el interior del sistema de tratamiento son favorables, dado que la población metanogénica utiliza los ácidos intermediarios tan pronto como hayan sido formados, de esta manera no se acumulan, conservando por tanto la alcalinidad natural presente en el medio y garantizando la permanencia del pH en un rango favorable para los microorganismos[79].

---

[76] Brock, Op. cit.
[77] Campos E. El proceso de digestión anaerobia.
[78] Perez y Cajigas, Op. cit.
[79] Perez y Cajigas, Ibid.

La alcalinidad por ser una medida de la capacidad tampón del medio, se encuentra directamente relacionada con el pH y los AGV[80]. Esta puede ser proporcionada por un amplio rango de sustancias, siendo por tanto una medida inespecífica. En el rango de pH óptimo para el proceso de digestión a aerobia, de 6 a 8 unidades, el elemento que proporciona equilibrio y control en la alcalinidad es el dióxido de carbono o bicarbonato[81].

La relación de alcalinidad RA, se define como la relación entre la alcalinidad debida a los AGV (AI) y la debida al bicarbonato (AT), recomendándose no sobrepasar un valor de 0,3 - 0,4 para evitar la acidificación del reactor. La alcalinidad al bicarbonato debe mantenerse por encima de 2.500 mg/l para asegurar la estabilidad del digestor[82].

Cuando el pH empieza a decaer debido a la acumulación de AGV, lo cual quiere decir que prevalece la fermentación ácida sobre la metanogénica, la alcalinidad presente dentro del sistema neutraliza el ácido y previene la caída total del pH, sin embargo si la alcalinidad del sistema no es lo bastante amortiguadora, esta se debe proporcionar externamente para que el reactor funcione adecuadamente. Es por ello necesario que el substrato presente niveles suficientes de alcalinidad[83].

Dado que la manifestación de una variación importante en el pH resulta demasiado lenta pues una vez detectada, el fracaso del sistema puede ser ya irreversible, para tener control sobre el proceso anaerobio, simultáneamente además del pH, se deben tener en cuenta variables como la alcalinidad total y de bicarbonatos, la producción de biogás y su contenido en metano, el contenido de ácidos grasos volátiles o la relación entre ellos, la presión parcial de hidrógeno y los indicadores basados en el número de bacterias o actividad bacteriana[84].

- **Toxicidad e Inhibición**

Son muchas las substancias que pueden resultar inhibidoras del crecimiento de los microorganismos anaerobios. Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones, afectan la digestión y disminuyen los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados. En términos absolutos, una sustancia es un tóxico o un substrato dependiendo de su concentración, así un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta.

Los compuestos existentes en los sustratos que más comúnmente presentan problemas de toxicidad son el nitrógeno, los ácidos grasos volátiles, el

---

[80] Olinto M L, Beal L L, de Luca S J. Requerimento de alcalinidade em processos biológicos anaeróbios. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre - RS – Brasil.
[81] Campos E. Op, cit.
[82] Perez y Cajigas, Op, cit.
[83] Campos P et al. Biogas y aprovechamiento de la biomasa, Op. cit. y Sung Shihwu, Op. cit.
[84] Campos E. El proceso de digestión anaerobia. Op. cit.

hidrógeno, los ácidos grasos de cadena larga, los compuestos azufrados, los cationes, los metales pesados, los desinfectantes y los antibióticos[85].

En el caso particular de las aguas residuales provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca, la presencia de cianuros es conocida como inhibidora del proceso de digestión anaerobia, debido a la liberación de HCN cuando los tejidos de la planta son desgarrados. El cianuro presente se encuentra en su mayoría como linamarina y lotaustralina (glucósidos cianogénicos) y el resto en forma de cianuro libre[86].

Además de lo anterior, la inhibición del proceso también puede presentarse en la competencia de los microorganismos por el sustrato, debido a que la velocidad de crecimiento bacteriano aumenta con la concentración de substrato, llegando a un punto en que se estabiliza y dependiendo de cada caso concreto puede llegar a descender[87].

- **Velocidad de carga orgánica y Tiempo de retención hidráulico**

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el tiempo que el substrato permanece en el reactor sometido a la acción de los microorganismos. Este es un parámetro muy importante que depende del tipo de reactor utilizado, junto con la velocidad de carga son los principales parámetros de diseño en la definición del volumen del reactor y se obtiene dividiendo el volumen del reactor entre la media de la carga diaria. Al aumentar el TRH, la fracción de materia orgánica degradada aumenta, sin embargo la producción volumétrica de metano disminuye una vez superado el óptimo. Es por tanto necesario determinar para cada tipo de residuo y de digestor el TRH adecuado[88].

La carga orgánica es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor, depende directamente de la concentración del substrato y del TRH y es expresada normalmente en unidades de DQO o de sólidos volátiles, por unidad de reactor y unidad de tiempo. Altas cargas orgánicas, en ausencia de inhibidores, proporcionan altas producciones volumétricas de biogás. Parece que la resistencia a ciertos inhibidores puede aumentar con la carga orgánica. Sin embargo la inestabilidad aumenta también con el aumento de carga, especialmente en el caso de “sobrecargas” puntuales, que conllevan la acumulación de ácidos grasos volátiles[89]. Una descripción de los reactores mas usados para el tratamiento de aguas residuales se presenta en el Anexo 1.

---

[85] Campos P et al. Op, cit.
[86] Perez y Cajigas.
[87] Campos, E. Op, cit..
[88] Ibid.
[89] Campos, P et al. Biogas y aprovechamiento de la biomasa. Op, cit.

- **Nutrientes**

El nitrógeno y el fósforo son los nutrientes esenciales para todos los procesos biológicos. De la cantidad de nitrógeno y fósforo en relación con la materia orgánica presente, depende la eficiencia de los microorganismos en obtener energía para síntesis a partir de reacciones bioquímicas de oxidación del sustrato orgánico[90]. La baja velocidad de crecimiento de los organismos anaerobios, comparado con los aerobios resulta en un menor requerimiento nutricional. Además de nitrógeno y fósforo, el azufre también es considerado uno de los nutrientes esenciales para la metanogénesis. Dentro de los micronutrientes considerados esenciales para los procesos anaerobios se destacan el Hierro, el Cobalto, el Níquel y el Zinc[91].

Se pueden presentar situaciones en las cuales sea imperativa la evaluación de nutrientes en los sustratos de sistemas de tratamiento. Entre las cuales se pueden mencionar las siguientes[92]:

- No existencia de información respecto a coeficientes de rendimiento de macro y microelementos para el sistema de tratamiento determinado.

- Existencia de limitaciones nutricionales ocultas, especialmente de microelementos y factores de crecimiento

- Utilización de sustrato que contenga elementos nutricionales en exceso, que pueden causar inhibición del crecimiento microbial.

- Ensayo de sustancias estimulantes, activadoras e inhibidoras del crecimiento y formación del producto

- Empleo de fuentes nutricionales no convencionales.

5.3.3 Actividad Metanogénica Específica (AME)

La remoción de materia orgánica en los procesos anaeróbicos ocurre, principalmente, por la conversión de los productos finales de la etapa fermentativa en metano[93], uno de los productos finales del proceso que es removido físicamente de la fase líquida y es emitido a la fase gaseosa conjuntamente con otros gases formados o presentados en el reactor.

La eficiencia del proceso depende, por tanto, de la actividad metanogénica del lodo, es decir de su capacidad de transformar acetato y H_2/CO_2 en CH_4,

---

[90] Dias L D, Campos J R. Efecto del n-amoniacal en la actividad metanogénica específica durante la degradación de glucosa – USP. São Carlos - São Paulo – Brasil.
[91] Foresti E, Florencio L, Van Haandel A . Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo, 1999.
[92] Oficina de Ciencia y Tecnología. Medios de Fermentación.
[93] Monteggia luiz.

existiendo la relación estequiométrica entre la cantidad de metano formada y la fracción de materia orgánica removida, expresada por ejemplo como DQO[94].

Considerando la ecuación de combustión de metano, se tiene que en la oxidación completa de metano, 1 mol de CH_4 consume 2 moles de O_2. Por lo tanto a condiciones normales de temperatura y presión (T= 273K; P= 1 atm), 22.4 litros de CH_4 corresponden a 64g de DQO o sea, 0.35 litros de CH_4 por gramo de DQO removida. La relación permite estimar la fracción de materia orgánica convertida en metano a partir del volumen de metano producido en el reactor, por unidad de tiempo. Como esta relación es valida para condiciones normales de temperatura y presión, para cualquier otra condición el volumen obtenido debe ser corregido.

Dado que la concentración de biomasa en el reactor esta relacionada con la concentración de sólidos volátiles en suspensión (SSV), la actividad metanogénica del lodo puede ser obtenida por medio de la relación entre la cantidad de DQO convertida en metano por unidad de tiempo y la concentración de SSV. La prueba de actividad metanogénica específica se basa en estos fundamentos del proceso y ha sido utilizado en el monitoreo de desempeño de reactores anaerobios[95].

La evaluación de AME, es considerada de gran importancia pues permite determinar el grado de actividad biológica de cualquier sistema anaerobio y así clasificar el potencial de biomasa para producir metano y gas carbónico[96]. Esta puede realizarse de manera rutinaria usando un sistema de desplazamiento, que consiste en un digestor conectado con una botella de Mariotte y un recipiente, como el que muestra la Figura 8.

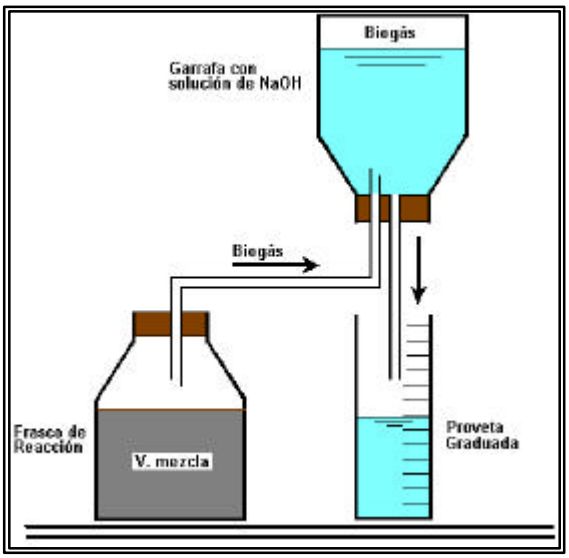


Figura 9. Sistema de desplazamiento usado en evaluaciones de AME.

[94] Foresti, E et al, Op. cit.
[95] Ibid.
[96] Perez y Cajigas, Op. cit.

La prueba de AME, además de cuantificar la actividad metanogénica, permite las siguientes aplicaciones[97]:

- Evaluar el comportamiento de la biomasa bajo el efecto de compuestos potencialmente inhibidores.
- Determinar la toxicidad relativa de compuestos químicos presentes en efluentes líquidos y residuos sólidos.
- Establecer el grado de degradabilidad de diversos sustratos, especialmente desechos industriales.
- Monitorear los cambios de actividad del lodo, debido a una posible acumulación de materiales inertes a causa de los largos periodos de operación de los reactores.
- Determinar la carga orgánica máxima que puede ser aplicada para un determinado tipo de lodo, permitiendo acelerar el proceso de arranque del sistema de tratamiento.
- Evaluar parámetros cinéticos.

5.4 Importancia nutricional en el proceso de digestión anaerobia

Las células microbianas están construidas de sustancias químicas de una amplia diversidad de tipos y, cuando una célula crece, todos sus constituyentes químicos aumentan en cantidad apropiada. Los elementos químicos básicos de una célula vienen del exterior, pero estos elementos químicos son transformados por la propia célula en los constituyentes característicos. Los productos químicos exteriores a partir de los cuales se construye una célula se denominan nutrientes. Los nutrientes son tomados por la célula y transformados en constituyentes celulares. A este proceso de Biosíntesis se le denomina Anabolismo y en él se requiere de energía.

Las células también necesitan de energía para otras funciones tales como movimiento celular (motilidad) y transporte de nutrientes. Esta energía es obtenida del medio exterior celular por medio de dos fuentes, la luz y principalmente la oxidación de compuestos químicos. Los productos químicos utilizados como fuente de energía son rotos en constituyentes más simples liberando energía. A este proceso se denomina catabolismo[98].

Las necesidades nutricionales de las poblaciones microbianas envueltas en los procesos biológicos de tratamiento de desecho son usualmente establecidas a partir de la composición química de las células microbianas, como se muestra en el Cuadro 5. Tal consideración se basa en el hecho de que casi todas las células vivas son formadas por tipos similares de compuestos y que estas

---

[97] Perez y Cajigas, Ibid.

[98] Brock. Op. cit.

presentan composiciones químicas similares, requiriendo por tanto, los mismos elementos con las mismas proporciones relativas[99].

Cuadro 5. Composición química de las bacterias metanogénicas.

Elemento	Concentración (g/kg SST)	Elemento	Concentración (mg/kg SST)
Nitrógeno	65	Hierro	1800
Fósforo	15	Níquel	100
Potasio	10	Cobalto	75
Azufre	10	Molibdeno	60
Calcio	4	Zinc	60
Magnesio	3	Manganeso	20
		Cobre	10

Fuente: Chernicharo, (1997)

La digestión anaerobia por ser un proceso biológico requiere ciertos nutrientes inorgánicos esenciales para el crecimiento de los microorganismos, en ausencia de estos nutrientes el crecimiento está limitado[100]. El proceso anaerobio se caracteriza frente al aerobio por los bajos requerimientos de nutrientes, debido fundamentalmente a los bajos índices de producción de biomasa. La mayoría de las aguas residuales no presentan una deficiencia, sin embargo algunos efluentes industriales pueden necesitar de la adición externa de estos nutrientes para el éxito de su tratamiento[101]. La biomasa involucrada en el proceso necesita para su desarrollo el suministro de una serie de nutrientes minerales, además de una fuente de carbono y de energía[102]. Para determinados procesos necesita, además, compuestos orgánicos especiales, como vitaminas.
No obstante que los microorganismos varían considerablemente respecto de los nutrientes que pueden necesitar es posible efectuar la distinción de las siguientes categorías:

- Macronutrientes: Requeridos en grandes cantidades.
- Micronutrientes: Requeridos en pequeñas cantidades.
- Factores de crecimiento.

5.4.1 Macronutrientes

Los nutrientes macro son requeridos en grandes cantidades por los microorganismos, favorecen sus funciones vitales y muchas de las actividades que estos tienen a cargo dentro del proceso anaerobio. El Cuadro 6, muestra los macronutrientes y su función en el desarrollo microbiano.

---

[99] Chernicharo. Reactores Anaerobios Vol. 5: Princípios do Tratamento Biológico de Aguas Residuárias, 1997.
[100] Zegers, F, Op. cit.
[101] Campos, P et al, Op. cit
[102] Speece, R. E. Nutrient Requeriments. Anaerobic digestion of biomass, 1987

Cuadro 6. Función de los Macronutrientes en el desarrollo microbiano.

Macronutriente	Función
Carbono	Este elemento puede utilizarse en su forma inorgánica como CO_2 para microorganismos autótrofos donde constituye la única fuente de carbono. Es necesario para formar el esqueleto carbonado de las moléculas orgánicas.
Nitrógeno	Después del carbono, el segundo elemento más abundante en la célula es el nitrógeno. Una bacteria típica contiene aproximadamente 12 % de N_2. El nitrógeno es utilizado para la biosíntesis de proteínas, ácidos nucleicos y polímeros de la pared celular. Se encuentra en la naturaleza tanto en forma orgánica como inorgánica, sin embargo el nitrógeno utilizable está en forma inorgánica (NH_3, NO_3 o N_2).
Fósforo	Se encuentra en la naturaleza en forma de fosfatos orgánicos o inorgánicos y es requerido por la célula para la síntesis de ácidos nucleicos y fosfolípidos.
Azufre	Es fundamental por ser un elemento estructural en los aminoácidos cisteína y metionina y porque está presente en vitaminas como la tiamina, biotina, ácido lipoico y como coenzima A. La mayoría del azufre celular procede de fuentes inorgánicas ya sean sulfatos o sulfuros.
Potasio	Es necesario en todos los organismos. Una gran diversidad de enzimas, incluyendo varias implicadas en la síntesis de proteínas lo requieren específicamente. El ión K actúa como coenzima y probablemente actúa como catión en la estructura aniónica de varios componentes celulares.
Magnesio	Estabiliza los ribosomas, las membranas celulares, los ácidos nucleicos, se requiere también para la actividad de muchas enzimas y actúa como cofactor en numerosas reacciones del metabolismo.
Calcio	Ayuda a estabilizar la pared celular bacteriana y juega un papel fundamental en la termorresistencia de la endospora, sin embargo no es un nutriente esencial para el crecimiento de muchos microorganismos.
Sodio	Se encuentra solo en algunos sustratos y es requerido por algunos, pero no todos, los microorganismos.

Fuente: adaptado de Brock.

En el tratamiento de aguas residuales, se han tenido en cuenta principalmente el Carbono, el Nitrógeno, el Fósforo y el Azufre por estar en mayor proporción en las células microbianas y por lo tanto considerarse un requerimiento mayor. Para el tratamiento de aguas residuales con grandes cantidades de carbohidratos, el crecimiento bacteriano es mayor que en las aguas residuales que contienen proteínas y ácidos volátiles, por esta razón los requerimientos de nitrógeno para el primer caso pueden ser hasta 6 veces superiores al los necesarios en el segundo caso. Esto se debe al aumento en la síntesis de bacterias fermentativas[103]. Según Chernicharo en 1997 las relaciones base de requerimientos nutricionales en el tratamiento de aguas residuales acidificadas y difícilmente acidificables en su orden, son las siguientes:

- Biomasa con bajo coeficiente de producción celular (Y ~ 0,05 g SSV/g DQO)
  Ej.: degradación de ácidos grasos volátiles
  DQO : N : P = 1000 : 5 : 1 **C : N : P** = 330 : 5 : 1

[103] Chernicharo, Op. cit.

- Biomasa con elevado coeficiente de producción celular (Y ~ 0,15 g SSV/g DQO)
  Ej.: degradación de carbohidratos
  DQO : N : P = 350 : 5 : 1 **C : N : P** = 130 : 5 : 1

Otros autores han expresado las necesidades de nitrógeno y fósforo en función de la concentración de carbono de la alimentación, considerándose que la relación C/N debe oscilar entre 15-30:1, y la C/P de 75-113/1[104].

- **Carbono:**

Los requerimientos nutricionales están determinados por el tipo de metabolismo celular, ya sea autotrófico, que corresponde a los microorganismos que obtienen el carbono del $C0_2$ y los heterotróficos que necesitan compuestos orgánicos como fuente de carbono. Otro factor esencial está determinado por las condiciones del cultivo, si es aerobio o anaerobio. Las bacterias metanogénicas son autótrofos anaerobios que utilizan H_2 para reducir el $C0_2$ a CH_4 en la obtención de energía. Las fuentes de carbono cumplen también el rol de ser fuente de energía.

- **Nitrógeno:**

Generalmente, el nitrógeno es el nutriente inorgánico requerido en mayores concentraciones para el crecimiento de los microorganismos. El nitrógeno orgánico durante el proceso anaerobio se hidroliza produciendo formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un importante nutriente para el crecimiento de los microorganismos, cuya carencia puede provocar el fracaso en la producción de gas, una concentración excesivamente alta del mismo puede limitar su crecimiento. Los principales microorganismos afectados por altas concentraciones de amonio son los metanogénicos. Un cambio brusco en la concentración de amonio produce un descenso en la velocidad de crecimiento de los organismos metanogénicos, pero no en la tasa de crecimiento de los acidogénicos o acetogénicos. El amonio y la porción de nitrógeno orgánico liberado durante la degradación son las principales fuentes de nitrógeno utilizadas por los microorganismos[105].

- **Fósforo**

La mayoría de los microorganismos son capaces de utilizar ortofosfato inorgánico, que puede ser incorporado por las células en el crecimiento, a través de la mediación de enzimas denominadas fosfatasas. El fósforo se incorpora en ácidos nucleicos, y polímeros celulares[106].

- **Azufre**

La mayoría de las bacterias metanogénicas utiliza el sulfato como fuente de azufre, otras utilizan la cisteína.

La concentración de sulfato en los desechos domésticos es suficiente para proveer el azufre necesario para el crecimiento bacteriano. Se requieren

---

[104] Speece, 1987. Op. cit..
[105] Campos E. El proceso de digestión anaerobia. Op. cit.
[106] Chernicharo. Op. cit.

cantidades relativamente pequeñas debido al bajo contenido de azufre en las células microbianas. Algunas razones para no considerar la adición de sulfato en la digestión anaerobia son:

- Presencia de H_2S en el biogás
- Síntesis microbiana de sulfato
- Precipitación de sulfatos por los metales pesados

Las necesidades de azufre parecen ser del mismo orden de magnitud que las del fósforo. La presencia de sulfatos puede limitar la metanogénesis por la competencia de las bacterias sulfato reductoras por sustrato como hidrógeno y acetato. Por otro lado las bacterias metanogénicas dependen de la producción de sulfatos para su crecimiento. Esto ilustra el ambiente ecológico relativamente estrecho ocupado por las bacterias metanogénicas, donde algunos compuestos inorgánicos pasan de concentraciones ideales a tóxicas, dentro un pequeño rango[107].

5.4.2 Micronutrientes

Los Micronutrientes comprenden las micromoléculas celulares, ellas son las responsables de cerca del 4% del peso seco de las células. Los micronutrientes son metales, muchos de los cuales forman enzimas, la exigencia exacta de estos es difícil de determinar en la práctica porque generalmente están presentes en suficiente cantidad como impureza de los componentes principales, por ello es recomendable una aplicación pulsativa al afluente acidificado, de manera que se perturbe el equilibrio químico y los metales estén momentáneamente disponibles para las bacterias metanogénicas[108]. La actividad de la biomasa depende de muchos factores, pero en el caso de los metales traza, la carencia de tan solo uno puede limitar severamente todo el proceso[109]. Los requerimientos de éstos compuestos pueden aumentar varias veces cuando el cultivo ha estado sujeto a "stres", como por ejemplo por aumento de la temperatura encima de un valor óptimo[110].

Aunque los micronutrientes son requeridos en muy pequeñas cantidades y cualitativamente ya que sólo 4 - 10% de la DQO removida es convertida en biomasa[111], son sin embargo, tan importantes como los macronutrientes. Los efectos de los nutrientes en la velocidad de la metanogénesis son multiplicativos, de allí que la restricción o deficiencia de algún nutriente podría restringir o detener completamente la metanogénesis.

---

[107] Ibid.
[108] Oficina de Ciencia y Tecnología, Op. cit
[109] Speece, 1995. Op. cit.
[110] Raul, R, Op. cit.
[111] Sung Shihwu, Op. cit.

Los metales traza listados a continuación, han sido reportados como estimulantes de las bacterias metanogénicas[112]:

- Hierro
- Cobalto
- Níquel
- Zinc
- Cobre
- Manganeso
- Molibdeno
- Selenio
- Tungsteno
- Boro

Los metales traza no son la respuesta a todas las dificultades operacionales en el tratamiento anaerobio, pero su presencia y su biodisponibilidad pueden rectificar la mayoría de estos problemas[113].

El hierro, el cobalto, el níquel y el molibdeno son importantes oligoelementos para los metanógenos, y los únicos micronutrientes requeridos de manera absoluta para su crecimiento[114]. A continuación en el Cuadro 7 una breve descripción de los micronutrientes usados mas comúnmente y su función dentro del proceso anaerobio.

Cuadro 7. Función de los Micronutrientes en el desarrollo microbiano.

Micronutriente	Función
Hierro	El hierro es requerido por la célula en mayores cantidades que otros metales traza, juega un papel fundamental en la respiración celular siendo un componente clave de los citocromos y de las proteínas que contienen hierro y azufre, implicadas en el transporte de electrones. Muchos microorganismos producen agentes que unen hierro de manera muy específica, denominada sideróforos, que solubilizan sales de hierro transportándolo al interior celular. Un grupo importante de sideróforos son derivados del ácido hidroxámico, el cual quela fuertemente el ión férrico. En algunas bacterias los sideróforos no son hidroxamatos sino compuestos fenólicos. Bacterias entéricas tales como, E. coli y S. typhimurium producen sideróforos fenólicos complejos llamados enterobactinas.
Níquel	El metal traza Níquel, componente de una importante coenzima metanogénica, el Factor$_{430}$, es requerido por todos los metanógenos como reflejo de la abundancia de F_{430} en las células, esta coenzima desempeña un papel destacado en el paso terminal de la metanogénesis como parte del sistema metilreductasa que tiene como función reducir el grupo metilo a metano. Además el Níquel está presente también en las enzimas hidrogenasa y monóxido de carbono deshidrogenasa.

Fuente: adaptado de Brock.

Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de

[112] Speece, 1995. Op. cit.
[113] Ibid.
[114] Raul, R. Op. cit.

nutrientes[115]. Algunos de los valores mínimos necesarios para el correcto crecimiento de los microorganismos se muestran en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Rangos de concentración de algunos nutrientes, necesarios para el correcto crecimiento de las bacterias anaerobias.

Nutriente	g/kg SSV	g/kg DQO (B)
Nitrógeno	80-120	55-85
Fósforo	10-25	7-18
Azufre	10-25	7-18
Hierro	5-15	4-11

Fuente: Henze, 1995.

5.4.3 Factores de Crecimiento

Los factores de crecimiento son compuestos orgánicos que, como los nutrientes, son requeridos en muy pequeñas cantidades y sólo por algunas células. Estos incluyen vitaminas, aminoácidos, poliamidas, purinas y pirimidinas[116]. Aunque, la mayoría de los microorganismos son capaces de sintetizar estos compuestos, otros requieren tomar uno o más preformados del ambiente que no son sintetizados ni metabolizados, sino incorporados a estructuras celulares y de función metabólica específica[117].

Las vitaminas son los factores de crecimiento más necesitados, entre las cuales se cuentan las del grupo B, como tiamina, riboflavina, ácido pantotético, niacina, entre otras. La mayoría de vitaminas funcionan como parte de coenzimas. Muchos microorganismos son capaces de sintetizar todos los componentes de sus coenzimas, pero, algunos son incapaces de hacerlo así y deben ser suplementados con ciertas partes de estas coenzimas en forma de vitaminas que representan para muchas bacterias y levaduras factores esenciales en los medios sin los cuales no se produce crecimiento celular[118].

En el proceso de digestión anaerobia, interviene un grupo de enzimas, que hace posible el paso final de la metanogénesis, gracias a que desempeña importantes funciones en la bioquímica del proceso[119], estas son las enzimas del Níquel. Los microorganismos metanogénicos las hacen parte de su estructura, para suplir sus necesidades nutricionales, por ello son consideradas los principales factores de crecimiento que intervienen en la formación de metano. El Cuadro 9 muestra las enzimas del metal níquel y su función.

---

[115] F.A.O. The effects of environmental fact ors on anaerobic digestion.
[116] Oficina de Ciencia y Tecnología, Op. cit.
[117] Raul, R. Nutrición Bacterial.
[118] Ibid.
[119] Brock. Op, cit.

Cuadro 9. Enzimas del Níquel.

Enzimas de níquel	Fuente	Co-factores	Reacción	Función del níquel
Hidrogenasa	Gran cantidad de bacterias	Ni/Fe/Se y Fe-S	H_2 (g) $\longleftrightarrow$ $2H^+$ (aq) + $2e^-$	Enlace y fragmentación de H_2
Metil coenzima M reductasa	Bacterias metanogénicas	F430	$CO_2 + 8e^- + 8H^+ \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$	Catálisis de Desulfurización
CO deshidrogenasa	Bactérias acetogénicas y metanogénicas	Ni, Zn y Fe-S	$CO + H_2O \longleftrightarrow CO_2 + 2H^+ + 2e^-$	Catálisis de carbonización para la formación y fragmentación de los enlaces C-C

Fuente: Costa P. y Sousa P.

5.4.4 Biodisponibilidad de nutrientes

Aparte de estar presentes en el Sustrato los nutrientes deben estar disponibles para ser usados por la célula[120], ya que aún estando presentes en un proceso de tratamiento los metales traza, no aseguran su biodisponibilidad porque pueden estar fuertemente quelados[121]. La quelación aún manteniendo solubles los metales si es muy fuerte, puede restringirlos, estos son necesarios para todos los microorganismos, pero su biodisponibilidad en los procesos anaerobios puede acarrear problemas operativos significativos.

Existe una gran variedad de sustancias orgánicas, las cuales pueden quelar iones metálicos reduciendo su concentración disponible, entre dichos compuestos podemos citar aminoácidos, proteínas, ácidos orgánicos, polifenoles, polifosfatos y materiales coloidales. En general se puede decir que todo material insoluble presente en el medio de cultivo va a tener una determinada capacidad de unión a elementos metálicos disminuyendo su concentración efectiva. Por otro lado se contempla la hipótesis que con un aumento de la temperatura la biodisponibilidad de los elementos traza puede cambiar por órdenes de magnitud[122].

Es importante tener en cuenta la naturaleza de los compuestos orgánicos que tienen capacidad para actuar como ligandos, y sobre todo el Ion metálico considerado, ya que la concentración libre de éste es lo que interesa[123]. La concentración de nutrientes en el sustrato debe ajustarse a un valor igual a dos veces la concentración mínima de nutrientes requeridos por las bacterias para asegurar que hay un pequeño exceso de los nutrientes y que están lo suficientemente biodisponibles para las bacterias[124].

---

[120] Oficina de Ciencia y Tecnología. Op, cit.
[121] Speece, 1995. Op. cit.
[122] Oficina de Ciencia y Tecnología. Op cit.
[123] Ibid
[124] Field, J. "Medición Parámetros". En: Curso sobre Arranque y Operación de Flujo Ascendente con Manto de Lodos–UASB– Universidad Wageningen (Holanda), 1987.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en el laboratorio de Biotecnología Anaerobia del Área Académica de Ingeniería Sanitaria de la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR) de la Universidad del Valle y con el apoyo del Centro Internacional de Agricultura tropical (CIAT).

La etapa experimental fue dividida en cuatro fases, las tres primeras previas a los ensayos de AME y la última para la aplicabilidad de dichos ensayos:

- Caracterizaciones de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.

- Determinación teórica de requerimientos nutricionales (N, P, Ni, Fe) en la digestión anaerobia.

- Caracterización del Inóculo para la aplicación de ensayos de Actividad Metanogénica Específica (AME).

- Determinación de la dosis óptima de Metales Traza (Ni y Fe), en el tratamiento anaerobio de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca utilizando reactores de flujo discontinuo.

6.1 Caracterización de las Aguas Residuales procedentes del proceso de extracción de almidón de yuca.

Con el objeto de conocer las propiedades nutricionales del sustrato a usar en la alimentación de los reactores de flujo discontinuo, se realizó la caracterización de las aguas residuales del proceso productivo, de la siguiente manera:

- **Toma de muestras**:

Las muestras de aguas residuales se tomaron en el vertedero de control de caudal, antes del ingreso al filtro anaerobio de flujo mixto. Estas fueron muestras puntuales recogidas durante la puesta en marcha del proceso de extracción de almidón de yuca en una de las rallanderías del departamento del Cauca.

Análisis de muestras:
Todas las determinaciones analíticas se realizaron según los métodos normalizados para aguas residuales de la AWWA, WPCF, APHA "Standard Methods for Examination of Water And Wastewater", 16th Ed

El Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT, practicó los análisis correspondientes a nutrientes y micronutrientes o metales traza presentes en el agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca provenientes de la rallandería objeto de estudio en el departamento del Cauca. De la misma forma en el laboratorio de Biotecnología Anaerobia de la Universidad del Valle se realizaron los análisis de Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Química de Oxigeno (DQO), Ácidos Grasos Volátiles (AGV), Índice Buffer (IB), Alcalinidad al Bicarbonato (AB) y Alcalinidad Total (AT) para estas aguas residuales. En el Cuadro 10, se muestran las técnicas de análisis que se emplearon en el estudio.

Cuadro 10. Análisis Fisicoquímicos de las aguas residuales de rallandería.

Parámetros	Técnica de Análisis
pH	Potenciométrica
Alcalinidad total y bicarbonatica	Titulométrica
Índice Buffer	Titulométrica
Ácidos Grasos Volátiles	Titulométrica
DQO	Espectrofotométrica
Nitrógeno Orgánico	Kenjdhal
Nitrógeno Amoniacal	Titulométrico
Fósforo Total	Espectrofotométrico Cloruro Estagnoso
Metales traza	Absorción atómica por Llama

6.2 Determinación Teórica de Requerimientos Nutricionales (N, P, Ni, Fe) en la Digestión Anaerobia.

6.2.1 Macro elementos

Para la determinación teórica de los requerimientos de nutrientes macro (N y P) en las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, se empleó la relación DQO: N: P = 1000: 5: 1, para biomasa con bajo coeficiente de producción celular (Y ~ 0,05 g SSV/g DQO), recomendada por Chernícharo[125] en 1997 y la caracterización fisicoquímica hecha para dichas aguas.

6.2.2 Micro elementos o Metales Traza

Para el caso de los microelementos se utilizó un procedimiento que tiene en cuenta la concentración del micro elemento requerido por la biomasa generada durante la transformación de la materia orgánica. En el Cuadro 11, se muestra la composición elemental de las bacterias del metano.

[125] Chernicharo. Reactores Anaerobios Vol. 5: Princípios do Tratamento Biológico de Aguas Residuárias, 1997.

Cuadro 11. Composición elemental de las bacterias del metano.

Elemento	Concentración mg/kg células secas
Fe	1800
Ni	180
Co	75
Mo	60
Zn	60
Mn	20
Cu	10

Fuente: Adaptada de Zegers F, 1987.

Los siguientes pasos fueron seguidos para calcular la cantidad de micro elementos requeridos por el proceso de digestión anaerobia:

- Cálculo de la cantidad de material celular expresado como SST

El cálculo de la cantidad de material celular se hizo tomando el valor de la DQO afluente al filtro anaerobio, se asumió una remoción del 70% de dicho valor, es decir la fracción biodegradable[126] de la DQO total; de igual manera, se tuvo en cuenta que El 20% de la DQO biodegradable (DQO_{BD}) es transformada en biomasa y se expresó como SST, de la siguiente forma:

$$20\% gDQO_{BD} / l * 1.4 \frac{gSV}{gDQO} * R \frac{gST}{gSV} \quad = \quad gST / l$$

Donde:

20% $gDQO_{BD}$	= DQO convertida en Biomasa.
1.4	= Factor de conversión para bacterias del metano[127] (recomendado para ensayos de AME sin agitación).
R	= Relación entre SV y ST de la muestra de inóculo.

- Requerimientos de µ-nutrientes para síntesis celular

Las bases para determinar las concentraciones de micronutrientes requeridas en el ensayo de AME fueron la composición elemental de las bacterias metanogénicas señalada en el Cuadro 11, el peso molecular de los compuestos de Hierro y Níquel y el peso atómico de estos metales.

- Cálculo de la cantidad de Compuesto que se debe adicionar

La cantidad de microelemento necesaria, fue adicionada como Cloruro de Hierro ($FeCl_3$) al 99,6 %, y como Cloruro de Níquel ($NiCl_2$) al 97.2%. Estas cantidades fueron adicionadas de acuerdo a la siguiente ecuación teniendo en cuenta el volumen del reactor usado en cada ensayo:

---

[126] Universidad del Valle, C.V.C, Universidad Agrícola de Wageningen, Manual del Curso Arranque y Operación de Sistemas de Flujo Ascendente con Manto de Lodo-UASB.1987
[127] Ibid, p c20, 21.

$$\frac{mg\ Elem}{kg\ ST} * \frac{g\ ST}{l} * \frac{1Kg}{1000\,g} * \frac{PM_{Compto}(mg)}{PA_{Elem}(mg)} * \frac{100}{99.6} * Vol\ reactor = gCompto\ Adicionar$$

Donde

Elem = Elemento
PM = peso molecular
PA = peso atómico
Compto = Compuesto
gST/l = Biomasa producida a partir del 20% de la DQO_{BD}.

6.3 Caracterización del Inóculo para la aplicación de ensayos de Actividad Metanogénica Específica (AME).

Para la realización de los ensayos de AME, se utilizó estiércol de vaca como inóculo en la primera y segunda alimentación del primer ensayo; para el segundo ensayo se usó lodo proveniente del filtro anaerobio de flujo mixto ubicado en una de las rallanderías de la región. La caracterización de los dos inóculos se hizo con base en la determinación de Sólidos Volátiles (SV). Estas determinaciones se realizaron siguiendo los métodos propuestos en el Manual de Arranque Y Operaciones de Sistemas de Flujo Ascendente Con Manto De Lodo[128], 1987.

Los Sólidos Volátiles expresan la cantidad de partículas de naturaleza orgánica existentes en una muestra. En este caso específico se refieren a la cantidad de microorganismos por el volumen de lodo húmedo (biomasa). Los SV (g/l) del inóculo muestreado se calcularon como sigue:

$$\frac{[\text{Peso muestra seca (g)} - \text{Peso muestra incinerada (g)}]}{\text{Volumen muestra húmeda (ml)}} * 10^6$$

6.4 Determinación de la dosis óptima de Metales Traza (Ni y Fe), en el Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales del Proceso de extracción de Almidón de yuca utilizando Reactores de flujo discontinuo.

Para la determinación de la dosis de óptima de metales traza, se realizaron dos ensayos de AME, con los cuales se intentó repetir el proceso de degradación anaerobia del lodo. Para ello se tuvieron en cuenta los siguientes elementos y sus especificaciones:

6.4.1 Principio

La prueba de AME puede realizarse de manera rutinaria usando un sistema de desplazamiento, que consiste en un reactor conectado con una botella de Mariotte y un recipiente[129], como el que muestra la Figura 10.

---

[128] Ibid.
[129] Victorino I Hélio.

Dentro del reactor la muestra de lodo convierte la alimentación (AGV) en biogás, que contiene metano y CO_2. El biogás escapa del reactor y pasa por la botella de Mariotte de esta manera se acumula el metano en la parte de arriba de la botella, desplazando el líquido que se encuentra en la misma y dejándolo acumular en un recipiente. La cantidad de líquido en el recipiente es igual a la cantidad de metano producido por el lodo. El gas presente dentro de la botella de Mariotte es susceptible de cambios en su volumen, causados por variaciones de temperatura y presión. Para llevar un control sobre la cantidad de líquido que entra al recipiente por esta razón, se ejecuta simultáneamente la prueba con un reactor "blanco". Este blanco no contiene sustrato (AGV)[130].

6.4.2 Selección de las dosis de micronutrientes

Las dosis para suplementar los reactores en los ensayos, se seleccionaron teniendo en cuenta la necesidad nutricional teórica de las bacterias del metano y la concentración de estos micronutrientes en el agua residual objeto de estudio. Para lo anterior se consideraron dosis dentro del rango requerido por las bacterias y otras que doblaran dicho requerimiento, y por último otras que estuvieran por encima de estas concentraciones teniendo por objeto detectar una posible inhibición de las bacterias debida al exceso de nutrientes en el sustrato.

6.4.3 Equipos

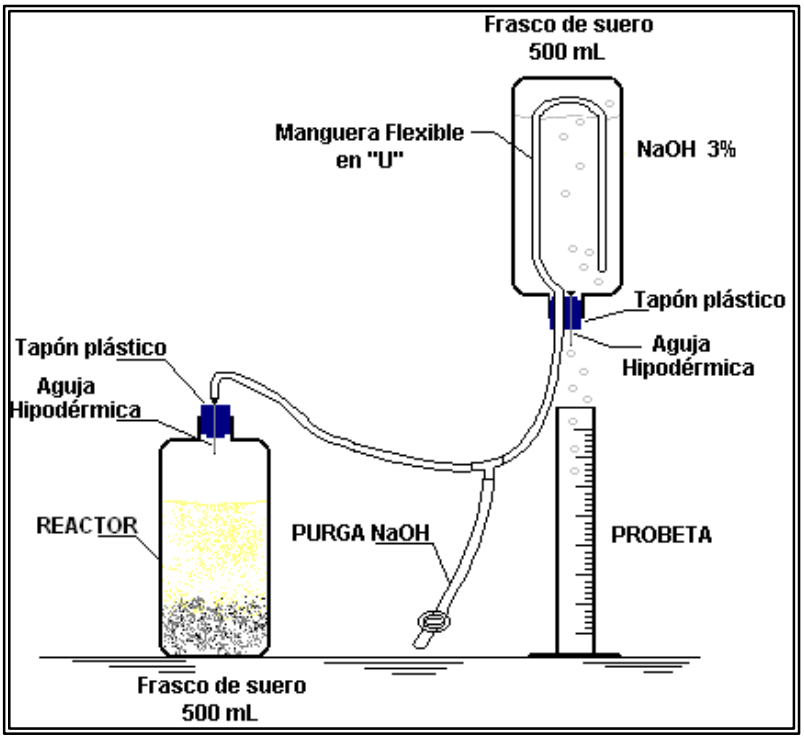
Los montajes de AME se realizaron usando los siguientes materiales, Ver Figura 9:

- Botellas de Suero de 500 ml
- Tapones de caucho
- Agujas hipodérmicas de acero inoxidable Nº 16
- Mangueras
- Probeta

Los equipos usados permitieron cuantificar la generación de metano mediante desplazamiento de líquido en los dos ensayos, para lo cual se usó como sustancia desplazante NaOH al 3%, por su propiedad de reaccionar con el CO_2 ($OH + CO_2 \rightarrow HCO_3$). Esta propiedad de la solución alcalina se tiene cuando el valor de pH se mantiene por encima de 12 unidades. A medida que el biogás pasa a través de la solución de NaOH, el CO_2 del biogás se convierte en carbonato y es absorbido dentro del líquido, así únicamente el gas metano pasa a través de la solución y un volumen equivalente es impulsado afuera de la botella – reactor[131]. Para garantizar lo anterior se adicionó azul de timol o timolftaleína.

---

[130] Field, J, Op. cit.
[131] Ibid.



Fuente: Pérez y Cajigas, 2002.

Figura 10. Montaje de Actividad Metanogénica (Equipos de AME).

Los equipos usados permitieron minimizar las fugas en el sistema, se usó una manguera dentro del frasco con NaOH, la cual se introdujo en forma de U para que actuara como sifón e impidiera que el NaOH descendiera por esta. Además, se contó con un sistema de purga para evitar el riesgo de dañar el ensayo, debido a la ocurrencia de estos inconvenientes en la etapa inicial del primer montaje, como se muestra en el Anexo 3.

6.4.4 Inóculo:

Para determinar el volumen de inóculo adicionado a los reactores de flujo discontinuo (frascos de suero), se tuvo en cuenta:

- La concentración de lodo en términos de g/l STV
- El volumen total de la mezcla. Este no debe estar por encima del 90% del volumen útil del frasco de suero.
- La concentración de sólidos calculada para los ensayos.

El cálculo se hizo con la siguiente ecuación:

$$V_{LODO} = \frac{\left[V_{MEZCLA} * g\ SVT / l\right]}{C_{Inicial\ LODO}}$$

En donde:

V_{LODO} = volumen de lodo a adicionar (l).
V_{MEZCLA} = volumen total de mezcla (l).
$C_{INICIAL\ LODO}$ = concentración inicial de lodo (g/l).

6.4.5 Sustrato:

El sustrato usado para los ensayos de AME, como se mencionó antes, fue agua residual proveniente del proceso de extracción de almidón de yuca de una de las rallanderías del Departamento, debido a que el objetivo de la investigación era recomendar una dosis de nutrientes que permitiera mejorar la degradación anaerobia de carga orgánica, para el tratamiento de estas aguas.

6.4.6 Alcalinizante:

Se emplearon como alcalinizantes en los ensayos de AME, cal hidratada y bicarbonato de sodio en estado sólido. Estos se adicionaron para llevar el pH del agua residual a un rango neutro y garantizar capacidad Buffer en el sistema, respectivamente.

6.4.7 Temperatura:

Los ensayos se desarrollaron a temperatura de 30º ± 1ºC, en un cuarto de temperatura controlada por un termostato.

6.4.8 Montajes de AME

Debido a la sencillez y economía que ofrecen los ensayos de AME, se utilizaron para la determinación de deficiencia de metales traza en las aguas residuales ya mencionadas, adicionando hierro y Níquel en forma individual y una combinación de ambos.

La nomenclatura usada para el primer ensayo con su respectiva concentración de microelementos se detalla en el Cuadro 12. En cada alimentación se contó con dos blancos, uno de agua destilada y otro de agua residual:

Cuadro 12. Composición del primer ensayo de AME.

Ensayo	Composición
P1	Blanco agua destilada
P2	Blanco agua residual
C1	Agua residual + 1,45 mg/l de Fe
C2	Agua residual + 0,145 mg/l de Ni
C3	Agua residual + 1,45 mg/l de Fe + 0,145 mg/l de Ni
E2	Agua residual + 3,0 mg/l de Fe
E2'	Agua residual + 0,5 mg/l de Ni

A partir de los resultados del primer ensayo se decidió realizar uno mas, en este también se contó con un blanco de agua residual. Su composición se muestra en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Composición del segundo ensayo de AME.

Ensayo	Composición
P1	Blanco agua residual
C1	Agua residual + 6,0 mg/l de Fe
C2	Agua residual + 1,0 mg/l de Ni
C3	Agua residual + 6,0 mg/l de Fe + 1,0 mg/l de Ni

Los ensayos se desarrollaron teniendo en cuenta condiciones como inóculo, sustrato, alcalinidad, temperatura y demás mencionadas anteriormente. Para los cálculos subsiguientes a los ensayos se tomaron como base estas variables.

6.4.9 Producción de metano

La reacción estequiométrica que representa la conversión de metano a DQO se muestra a continuación:

$$CH_4 + 2O_2 \quad \rightarrow \quad CO_2 + 2H_2O$$

De acuerdo a la estequiometría de la reacción, 2 moles de oxígeno reaccionan con 1 mol de metano para producir dióxido de carbono y agua. Los gramos de oxígeno que se necesiten para oxidar el metano, representan la demanda de oxígeno (DQO) que se requiere para tal efecto, entonces:

$$2\ moles\ de\ O_2 * \frac{32\ gramos\ de\ O_2}{1\ mol\ de\ O_2} \quad = \quad 64\ gramos\ de\ O_2$$

De acuerdo a la Ley de los Gases se sabe que 1 mol de CH_4 a condiciones normales de presión y temperatura equivale a 22.4 litros, de esta manera la relación entre volumen de CH_4/g DQO es igual a 0.35 l CH_4/g DQO, a condiciones normales:

$$\frac{22.4\ litros\ CH_4}{64\ gramos\ DQO} \quad = \quad \frac{0.35\ litros\ CH_4}{g\ DQO}$$

Para hacer la corrección del ensayo, se tuvo en cuenta la presión de la ciudad de Cali y la temperatura a la cual se realizó el ensayo, utilizando la Ley Combinada de los gases, como se muestra a continuación:

- T = 30 ºC = 303 ºK
- P= 660mm Hg = 0.868 atm

$$\frac{P_O V_O}{T_O} = \frac{P_F V_F}{T_F}$$

Despejando V_F

$$V_F = \frac{P_O}{P_F} * \frac{T_F}{T_O} * V_O$$

$$V_F = \frac{1}{0.868} * \frac{303}{273} * 0.35$$

Finalmente,

$$V_F = 0.447 \frac{l}{g} DQO$$

El valor de V_f, corresponde al factor de corrección (FC) de la producción de metano para las condiciones de la ciudad de Cali.

El volumen teórico de metano se calculó de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{CH_4} = (FC) * DQO_{CH_4}(g)$$

6.4.10 Actividad Metanogénica Específica

Teniendo en cuenta la producción de metano, se efectuó el cálculo de actividad metanogénica específica (AME), a partir de la siguiente ecuación:

$$A.M.E. = \frac{R * 24}{F.C. * V * [S.V.]}$$

Donde:

R = Pendiente máxima en la curva producción de metano (Volumen acumulado CH_4 vs tiempo).
V = Volumen efectivo líquido en el digestor.
SV = Concentración del lodo en g SV/L.
FC = 0.447 (factor de corrección para la ciudad de Cali).

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a la metodología empleada en este trabajo de investigación, los resultados obtenidos y su análisis se presentan de la siguiente manera:

- Características de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.
- Características del Inóculo utilizado en los ensayos de AME.
- Requerimientos nutricionales teóricos en la digestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.
- Ensayos de AME para la determinación de la dosis de Fe y Ni necesaria en el mejoramiento de la digestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.

7.1 Características de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.

El agua residual proveniente del proceso productivo es de naturaleza ácida, dado que está compuesta básicamente por carbohidratos, los cuales son de fácil degradación. Las muestras de agua residual se tomaron en una de las rallanderías ubicadas sobre la vía Panamericana que conduce de Cali a Popayán al norte del departamento del Cauca, durante el periodo comprendido entre el 26 de mayo y el 16 de agosto del año 2003.

Debido a que los procesos biológicos requieren condiciones estables para garantizar el crecimiento de los microorganismos, es necesario controlar las variables que influyen en el sistema, para ello es importante identificar la composición del agua residual usada durante los ensayos de AME. El Cuadro 14 muestra los datos obtenidos en la caracterización del agua residual proveniente del proceso.

Cuadro 14. Características fisicoquímicas del agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca.

Parámetro	Unidades	Valor
Temperatura	ºC	20
DQO	mg O_2/l	3.908
AGV_s	meq/l	14,06
Alcalinidad bicarbonática	meq/l	0,0
pH	Unidades	3,2 - 3,6
Nitrógeno total	mg/l	91,7
Fósforo Total	mg/l	17,2
Níquel	mg/l	< 0,5
Hierro	mg/l	0,645
Cobre	mg/l	0,045
Manganeso	mg/l	0,34
Zinc	mg/l	0,245

La temperatura del agua residual en el momento de la toma de muestra fue de 20ºC, sin embargo con el fin de garantizar un proceso de tipo mesofílico se mantuvo una temperatura constante de 30ºC con el control del termostato en el cuarto de laboratorio.

El pH del agua residual estuvo alrededor de las 4,0 unidades, sin embargo para el óptimo desarrollo del proceso de digestión anaerobia se mantuvo un pH neutro mediante la adición de dos alcalinizantes, cal hidratada para llevar el pH hasta 6,5 unidades y bicarbonato de sodio para llevarlo a 7,0 unidades. Esto garantiza la capacidad tampón para el sistema.

Los datos de AGV_s presentaron concentraciones relativamente altas al inicio de los montajes confirmando lo expresado anteriormente sobre la acidez de esta agua residual. Como se mencionó anteriormente la adición de cal además de prevenir la caída del pH, evita la inhibición de las bacterias metanogénicas y por ende la acumulación de AGV_s en el reactor.

Los valores de DQO del agua residual, se encuentran dentro del rango de la composición típica de las aguas provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca reportado en estudios anteriores[132].

7.2 Características del Inóculo utilizado en los ensayos de AME.

7.2.1 Primer ensayo

El inóculo utilizado para el primer ensayo de AME en sus dos alimentaciones, fue estiércol de vaca con el fin de garantizar condiciones similares a las presentadas en el reactor a escala real. El estiércol de vaca se encuentra en estado sólido ya que su recolección se hace cuando esta seco, por lo cual no se considera como un lodo. Por lo anterior se determina una relación STV/ST y no SSV/SST, lo cual permite emplear en los ensayos un estimativo de microorganismos y no el porcentaje real correspondiente a la cantidad existente de microorganismos en un lodo.

La preservación del lodo se realizó mediante su almacenamiento en un cuarto frío durante un periodo aproximado de seis meses, manteniendo en estado de latencia a los microorganismos propios del estiércol que están presentes en el contenido de materia orgánica aún sin degradar.

Dado que la concentración de microorganismos aptos para la digestión anaerobia presentes en el inóculo se reduce, se aportó durante el ensayo una cantidad un poco mayor de inóculo a la sugerida por la teoría, tal y como lo recomienda Field[133] (1987). Para calcular la cantidad de inóculo que garantiza la concentración de microorganismos necesaria en cada montaje (reactor), se empleó la fórmula que muestra la Sección 6.4.4.

---

[132] Rojas, O, 1999. Op. cit y Perez y Cajigas, Op. cit.
[133] Field, J. “Medición Parámetros”, Op. cit.

7.2.2 Segundo ensayo

El inóculo utilizado durante el segundo ensayo de AME fue lodo proveniente de la purga de lodos del filtro anaerobio de flujo mixto ubicado en la rallandería del departamento del Cauca en la cual se lleva a cabo el estudio. Este se seleccionó debido a que los microorganismos presentes en el lodo ya habían tenido un periodo de aclimatación bajo las condiciones del sustrato, además se utilizaron debido a su naturaleza, pues eran propios del estiércol usado como inóculo en el arranque de dicho filtro.

El lodo presentó olor y color característico, aspecto floculento, bastante denso y burbujeo, lo cual podría indicar actividad de la biomasa. Como se menciona en la metodología (Véase Sección 6.3), la caracterización de los dos inóculos, se basó en la determinación de STV. El Cuadro 15 muestra las características principales de los inóculos.

Cuadro 15. Características principales de los inóculos usados.

Ensayo	Inóculo	AME (gDQO CH_4/g STV.d)	ST (mg/kg)	STV (mg/kg)	STV/ST	pH	% Humedad
Primero	Estiércol	0,1124	219.154	168.767	0,77	5,63	77,9
Segundo	Lodo	0,1419	98.543	69.013	0,70	5,63	99,1

La relación STV/ST para los dos inóculos se encuentra por encima de 0,70, sin embargo no se pueden comparar pues la naturaleza de ambos es distinta y por lo tanto la concentración de microorganismos aptos para el proceso de digestión anaerobia es menor en el estiércol que en el lodo.

A pesar de que esta relación STV/ST es superior a la encontrada por Cardozo[134] (2002) en su estudio de actividad metanogénica en el tratamiento de aguas residuales domésticas (STV/ST = 0,46), los valores de AME para el inoculo utilizado son inferiores a los bajos valores presentados en el mencionado estudio. Es necesario tener en cuenta que la AME depende de la composición y concentración del agua residual a tratar así como de la concentración de microorganismos aptos en el inóculo.

7.3 Requerimientos nutricionales teóricos en la Digestión Anaerobia.

7.3.1 Nitrógeno y Fósforo

Con base en la relación DQO: N: P = 1000: 5: 1, recomendada por Chernicharo[135] (1997) para biomasa con bajo coeficiente de producción celular y la caracterización fisicoquímica hecha para las aguas residuales, se

[134] Cardozo, A. Influencia de la adición de $fecl_3$ sobre el mejoramiento de la calidad de un lodo anaerobio floculento para el arranque de un reactor UASB, 2002.
[135] Chernicharo. Reactores Anaerobios. Op, cit.

determinó la cantidad teórica de macroelementos requerida para la digestión anaerobia de las aguas residuales provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca. La determinación para una DQO promedio de 3.515 mg O_2 /l arrojó los siguientes resultados:

DQO: N: P

3.515 mg/l : 17,57 mg/l : 3,515 mg/l

La comparación de los valores de la caracterización nutricional del agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca y los obtenidos de la relación DQO: N: P permiten establecer que las concentraciones teóricas de Nitrógeno y Fósforo requeridas para la digestión anaerobia, pueden ser suplidas en su totalidad por la concentración existente de estos elementos en el agua residual. Por lo anterior no fue necesario suplementar el ensayo con dosis de estos macronutrientes.

7.3.2 Hierro y Níquel

Los requerimientos teóricos de Hierro y Níquel fueron calculados partiendo de la composición elemental de las bacterias propias del metano, la cual está determinada por los miligramos del elemento existentes en un kilogramo de material celular (ST) o biomasa generada en el proceso de digestión anaerobia (Véase Cuadro 11).

Para este cálculo además se tuvieron en cuenta el peso molecular de los compuestos de Hierro y Níquel, el peso atómico de los elementos a adicionar y los valores de DQO obtenidos en la caracterización realizada a las aguas residuales del proceso productivo de la rallandería de la región durante el periodo Julio - Diciembre del año 2002. También se tuvo en cuenta el dato de DQO obtenido en la caracterización inicial del presente estudio. Los requerimientos teóricos fueron calculados de acuerdo a las siguientes expresiones y se muestran a continuación en el Cuadro 16.

$$MC = \left(\frac{NB}{F_{CC}}\right) * R_C$$ ***(Cálculo de Material celular generado).***

Donde:

MC = Material celular (gST/l).

NB = DQO convertida en Nueva biomasa (20% DQO_{BD} g/l).

F_{CC} = Factor de conversión celular para bacterias del metano (1,4 gSV/gDQO).

R_C = Relación entre SV y ST de la muestra de inóculo (gST/gSV).

$$RT = E_C * MC$$ ***(Cálculo de Requerimiento teórico de Fe y Ni).***

Donde:

RT = Requerimiento teórico del elemento (mg/l).

E_C = Elemento de composición (mgElem/kgST).

MC = Material celular (kgST/l).

Cuadro 16. Requerimiento teórico de Hierro y Níquel.

Microelemento	Requerimiento teórico
Hierro (mg/l)	0,823
Níquel (mg/l)	0,082

Nota: Estos requerimientos fueron calculados para una DQO promedio de 3.515 mg/l.

7.4 Ensayos de AME para la determinación de la dosis de Fe y Ni necesaria en el mejoramiento de la digestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.

Se realizaron dos ensayos de AME, durante el primero se evaluó la adición de cinco concentraciones de Fe y Ni, cuatro de ellas adicionadas de manera individual y una en combinación, además se tuvo un montaje sin adición de metales, presentándose para este las concentración de Fe y Ni propias de las aguas residuales del proceso. Estas concentraciones permitieron evaluar el efecto de la adición de dosis de micronutrientes que estuvieron dentro del rango requerido por las bacterias metanogénicas y la incidencia sobre la AME de dosis mayores de estos elementos a las requeridas teóricamente, con el objeto de tener elementos de juicio suficientes en la determinación de la concentración que mas beneficio podría aportar a la digestión anaerobia de estas aguas residuales.

Durante el segundo ensayo, se adicionaron tres dosis de Fe y Ni con concentraciones superiores a las que requieren teóricamente las bacterias metanogénicas, esto con el fin de analizar el efecto de una mayor adición de estos micronutrientes en un lodo ya adaptado al sustrato

La concentración de microorganismos adicionada a los reactores (montajes), está por encima de la sugerida para ensayos de AME, debido a la baja cantidad de microorganismos aptos para la digestión anaerobia presentes en los inóculos utilizados, (veáse Sección 7.2.2).

El cálculo de la AME se realizar teniendo en cuenta la producción de metano durante el tiempo del ensayo y las condiciones de presión y temperatura a los que estuvieron sometidos los montajes. Una descripción más detallada de las ecuaciones utilizadas se presenta en la metodología (Véase Sección 6.4.9).

7.4.1 Primer Ensayo

El Cuadro 17, presenta las dosis de Fe y Ni adicionadas, con la respectiva nomenclatura utilizada en cada montaje, además se muestran las condiciones iniciales de DQO, Alcalinidad, Temperatura y Sólidos Volátiles en el sustrato utilizado durante el primer ensayo. Es importante mencionar que cada uno de los montajes cuenta con una replica.

Cuadro 17. Condiciones de los montajes de AME del primer ensayo.

PRIMER ENSAYO	*Primera alimentación*	*Segunda alimentación*
DQO	3034 mg DQO/l	3756 mg DQO/l
AGV's	13,2 meq/l	20,8 meq/l
pH	3,45	3,75
Alcalinidad Total	1214 meq/l $CaCO_3$	1157 meq/l $CaCO_3$
Temperatura	30ºC	
SV	2,7 mg SV/l	
Montajes	***Nomenclatura y Composición***	
	P1 Agua destilada	
	P2 Agua residual	
	C1 Agua residual + 1,45 mg/l Fe	
	C2 Agua residual + 0,145 mg/l Ni	
	C3 Agua residual + 1,45 mg/l Fe + 0,145 mg/l Ni	
	E2 Agua residual + 3,0 mg/l Fe	
	S2 Agua residual + 0,5 mg/l Ni	

7.4.1.1 Primera Alimentación

La primera alimentación del ensayo tuvo que dividirse en dos partes, una de ellas corresponde a los montajes que no sufrieron daño alguno durante el tiempo de duración de la alimentación y se muestra en el Gráfico 1 y la segunda a los montajes que arrojaron datos poco confiables debido a que sus equipos presentaron fugas, por lo que fue necesario descartarlos y montarlos nuevamente para contar así con un estimativo de su producción de metano. Estos montajes se muestran en el Gráfico 2.

Por lo anterior los datos del montaje C2, no pudieron ser promediados pues el tiempo de duración de dicho montaje y el de su réplica no es el mismo, sin embargo se cuenta con el promedio de su producción de metano. Debido a esto en los gráficos se presentan ocho curvas y no las siete pertenecientes al ensayo. Los resultados obtenidos durante la primera alimentación del primer ensayo se presentan en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Resultados obtenidos en la primera alimentación.

Primer Ensayo	Primera Alimentación				
	AME (gDQO/gSVT)	DQO (mg/l)	AGVs (meq/l)	Alk B (meq/l)	I.B.
P1	0,0586	235	0,0	0,0	0,0
P2	0,1124	1.079	4,0	18,0	0,49
C1	0,0628	831	4,2	15,1	0,34
C2	0,0823	1.152	7,0	17,6	0,43
E2	0,0845	742	5,6	15,3	0,27
S2	0,0619	1.940	9,0	15,6	0,44
C3	0,0997	649	8,0	16,0	0,28

En los Gráficos 1 y 2 se puede observar que la mayor velocidad de producción de CH_4 en términos de volumen de NaOH desplazado fue alcanzada por P2 correspondiente al montaje que no tiene adición alguna de Fe y Ni, y cuenta únicamente con la concentración propia de estos elementos en el agua residual (Ver Cuadro 14).

El montaje C3 correspondiente a la adición de la dosis de 1,45 mg de Fe y 0,145 de Ni, presentó un comportamiento similar obteniendo la segunda mejor producción de metano durante el tiempo de duración de la alimentación.

Para el montaje C1 con adición de 1,45 mg/l de Fe, se pudo observar una de las más bajas producciones de metano situándose de manera descendente en el quinto lugar frente a los demás reactores, seguido por el montaje S2 el cual obtuvo la menor producción para una dosis de 0,5 mg/l de Ni. Los montajes E2 (3,0 mg/l de Fe) y C2 (0,145 mg/l de Ni) arrojaron mejores resultados y se situaron en el tercer y cuarto lugar respectivamente frente a la producción de CH_4 mostrada por los demás montajes.

Lo anterior se debe posiblemente a que los microorganismos presentes en el inóculo asimilaron más fácilmente las concentraciones de micronutrientes propias del agua residual y se tardaron inicialmente en adaptarse ante la presencia de concentraciones mayores de estos metales, por lo cual en esta primera alimentación no se observa una relación directa entre la dosificación de micronutrientes y los valores de AME obtenidos.

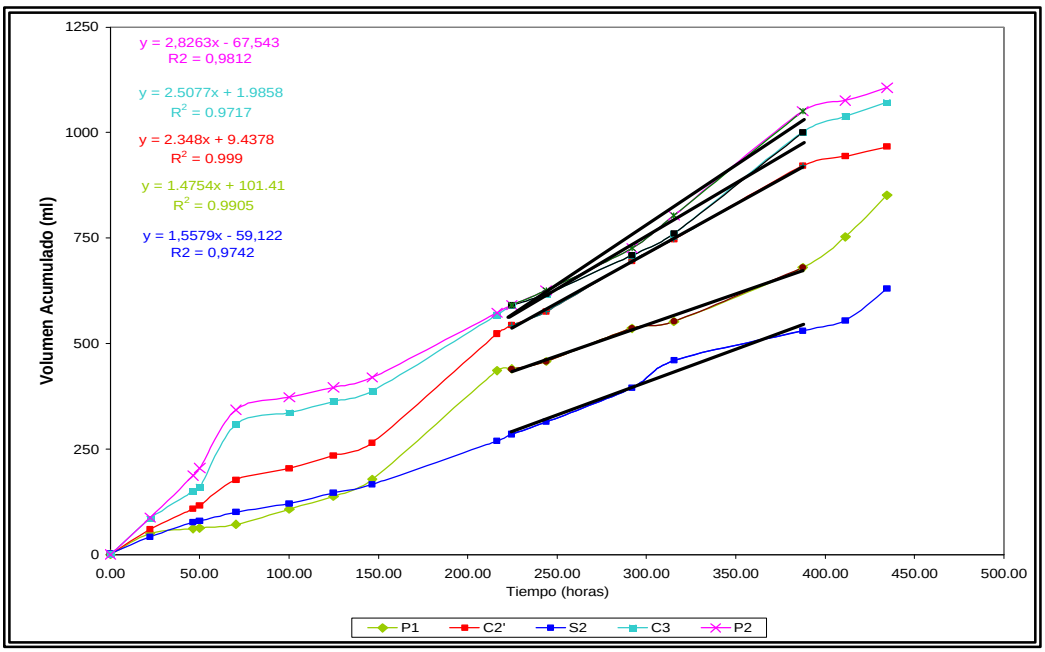


Gráfico 1. Producción de metano durante la primera Alimentación del primer Ensayo - Junio 14 de 2003.

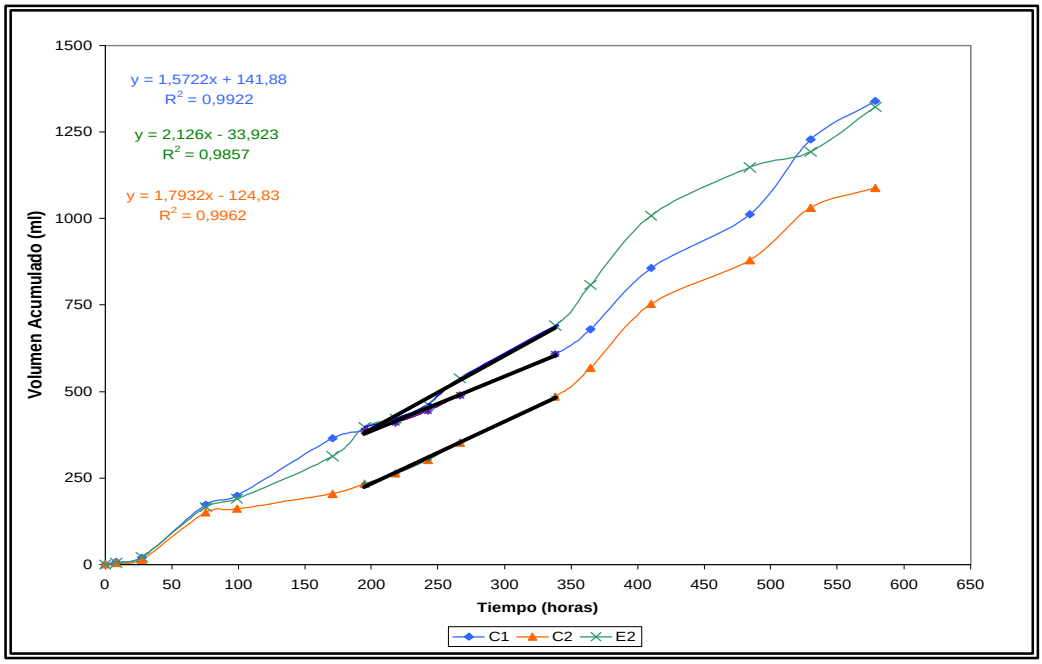


Gráfico 2. Producción de metano durante la primera Alimentación del primer Ensayo - Junio 23 de 2003.

El comportamiento general de las gráficas muestra tres fases claramente definidas durante el tiempo de duración de la primera alimentación, la primera corresponde a las primeras 50 horas del ensayo, en donde se presenta un significativo desplazamiento de NaOH, debido posiblemente al contenido de aire que por las características de los equipos en los que se realizó el ensayo,

quedo atrapado dentro de los reactores en el momento de sellarlos. Posteriormente en esta fase los microorganismos comienzan la asimilación y conversión de los compuestos fácilmente acidificables del sustrato.

Seguidamente se observa una fase de 150 horas aproximadamente, en donde se desarrollan procesos a cargo de los grupos bacteriales acidogénico y acetogénico, precursores de los sustratos propios de las bacterias metanogénicas. La tercera fase corresponde a una mayor producción de metano y es posible gracias a la disponibilidad de los elementos necesarios para ello y a la acción de las bacterias propias del metano.

7.4.1.2 Segunda Alimentación

Los resultados obtenidos durante la segunda alimentación del primer ensayo se muestran en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Resultados obtenidos en la segunda alimentación.

Primer Ensayo	Segunda Alimentación				
	AME (gDQO/gSVT)	DQO (mg/l)	AGVs (meq/l)	Alk B (meq/l)	I.B.
P1	0,0784	200	0,8	0,0	0,0
P2	0,0800	1.097	8,5	12,1	0,40
C1	0,1007	807	9,1	15,1	0,43
C2	0,1279	1.084	7,7	19,1	0,40
E2	0,1726	593	4,8	14,0	0,34
S2	0,1592	733	9,5	16,9	0,38
C3	0,0990	1.426	12,6	20,0	0,53

El Gráfico 3 muestra el desplazamiento de NaOH durante el tiempo de duración de la segunda alimentación del primer ensayo. En el Gráfico se observa además una producción de metano constante desde el inicio de la alimentación, producto de la adaptación de las bacterias al sustrato lo cual permite que se den relaciones sintróficas y por ende que los procesos de digestión anaerobia (DA) se desarrollen de manera adecuada haciendo menos perceptible el lapso entre una fase y otra.

Para la segunda alimentación se observa un aumento en las pendientes de cada montaje con respecto a las reportadas durante la primera alimentación. Esto indica un incremento en la AME debido a la aclimatación de los microorganismos al sustrato y a la producción celular dentro del sistema, lo cual permite la transformación de los compuestos orgánicos en metano y facilita los procesos de digestión anaerobia.

En la segunda alimentación, el montaje E2 presentó el mayor valor de producción de metano en términos de NaOH desplazado, seguido por el montaje S2, el cual mantuvo una alta AME respecto a los demás montajes a diferencia de la primera alimentación.

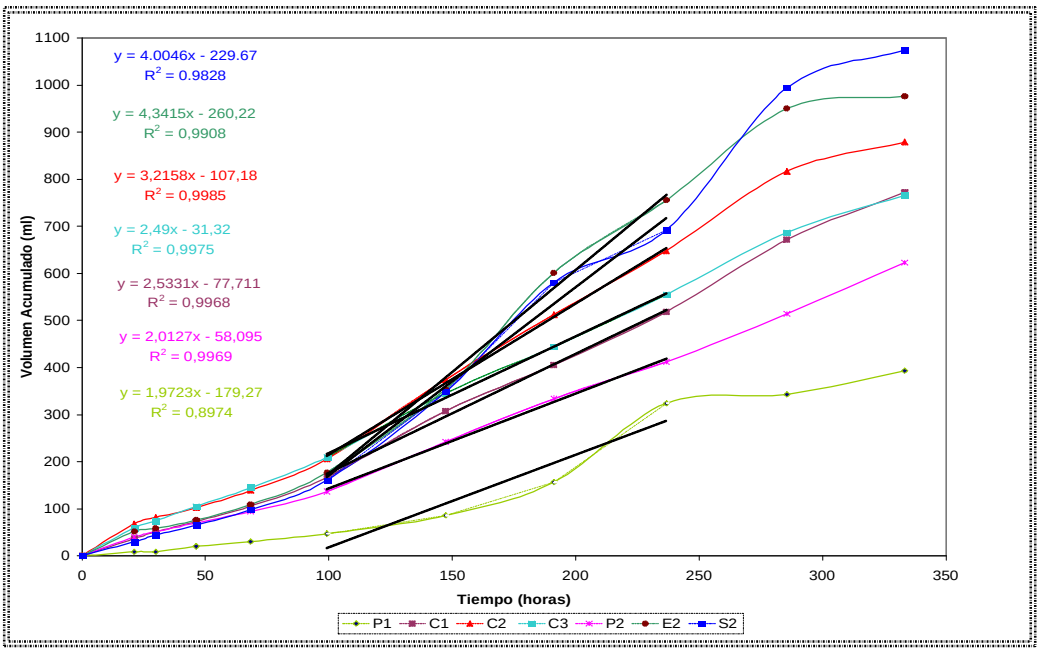


Gráfico 3. Producción de metano durante la segunda Alimentación del primer ensayo.

Los montajes C3 y P2, cuyas producciones de metano fueron las mas altas en la primera alimentación, obtuvieron para la segunda alimentación los valores más bajos. Los montajes C2 y C1 tuvieron un incremento en su producción de metano y esta vez se situaron en el tercer y cuarto lugar respectivamente, de manera similar a su comportamiento en la primera alimentación.

En general durante la segunda alimentación se presenta una relación directamente proporcional entre la dosificación de nutrientes y la producción de metano, de manera opuesta a la relación mostrada para la primera alimentación. Esto se debe probablemente a la asimilación de los metales adicionados al sustrato por parte de las bacterias aclimatadas, ya que de esta manera pueden sintetizar los elementos nutritivos del sustrato para estimular su metabolismo y reflejarlo en el aumento de su actividad.

7.4.1.3 Efecto de la adición de Hierro y Níquel en la AME del primer ensayo.

La siguiente discusión está enfocada a la evaluación de la adición de micronutrientes en cada reactor del primer ensayo, para ello se compara el comportamiento de cada uno durante la primera y segunda alimentación con respecto al comportamiento del reactor al que no se adicionaron elementos traza.

- Reactor – Blanco.

El reactor – blanco muestra el comportamiento del sistema cuando no existe la dosificación de micronutrientes en el sustrato. En la primera alimentación los microorganismos involucrados en la digestión anaerobia consumen los componentes del sustrato de manera sencilla y relativamente rápida, manifestándose con una alta AME y un porcentaje de remoción de 71,3% el cual se esperaba debido a la identificación del sustrato por parte de los microorganismos.

Lo anterior se debe a que el sustrato por estar compuesto básicamente de ácidos grasos y carbohidratos es fácilmente metabolizado por las bacterias acidificadoras y convertido en ácidos orgánicos fácilmente degradables por las bacterias metanogénicas. Durante la primera alimentación las necesidades nutricionales de los grupos bacteriales implicados fueron suplidas por el sustrato, sin embargo en la segunda alimentación los nutrientes presentes en el agua residual no fueron suficientes para mantener los requerimientos de la nueva biomasa generada en el reactor. Las bacterias se vieron afectadas posiblemente por la sobrecarga orgánica aportada por la DQO del nuevo sustrato, lo cual causo un leve descenso en el porcentaje de remoción y una notoria disminución de la AME.

El alto consumo alcalino ocasionado por el descenso del pH y el aumento significativo de AGV's, confirman los resultados de DQO y AME obtenidos por el blanco durante la segunda alimentación, los cuales comparados con los obtenidos en la primera alimentación revelan la carencia de adecuadas condiciones nutricionales entre otras para que los microorganismos del sistema mantengan su buen funcionamiento durante un mayor tiempo y de forma más resistente a las sobrecargas.

- Hierro 1,45 mg/l.

La adición de hierro en una dosis de 1.45 mg/l generó para la primera alimentación una AME menor que la del blanco, debido posiblemente a la falta de adaptación de las bacterias al suplemento ya que es mas fácil para estas inicialmente asimilar los compuestos propios del sustrato que los nutrientes adicionados. Por lo anterior la tasa de degradación de materia orgánica y de consumo de los AGV's es mayor en el blanco que en el reactor suplementado como se observa en el Gráfico 4.

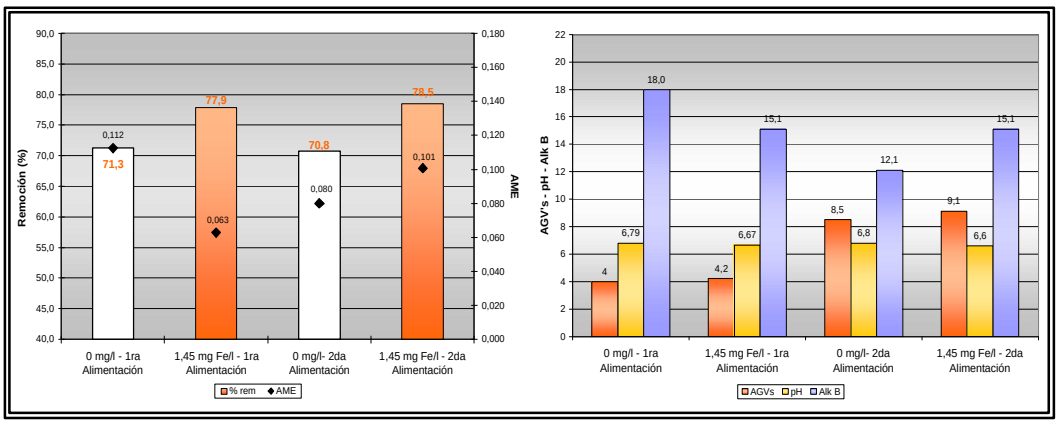


Gráfico 4. Efecto de la adición de 1,45 mg Fe/l en la DA del primer ensayo.

Sin embargo en el blanco se producen buenos porcentajes de remoción hasta cuando los microorganismos dejan de contar con las condiciones necesarias para su crecimiento y detienen su actividad lo cual disminuye la degradación de materia orgánica y por consiguiente la producción de metano, mientras que aún con una menor AME, en la primera alimentación el reactor suplementado con micronutrientes alcanza mayores remociones de DQO debido a la mayor biodisponibilidad de los metales traza.

En la segunda alimentación la adición nutricional logró un aumento significativo en la AME del reactor, produciendo un crecimiento en el porcentaje de remoción de materia orgánica del sustrato. Los valores de remoción de materia orgánica obtenidos luego de la adición de nutrientes estuvieron por encima del 77% en las dos alimentaciones como se observa en el Gráfico, lo que hace evidente el efecto positivo de la adición sobre la disminución de DQO y la AME dentro del sistema.

Lo anterior se corrobora con los datos de AGV's, pH y Alcalinidad al bicarbonato, los cuales estuvieron dentro del rango óptimo para el control del sistema. El valor de AGV's en la segunda alimentación aumentó con respecto a la primera, indicando mayor producción de estos ácidos dentro del reactor debido posiblemente al estímulo de las bacterias fermentativas luego de la suplementación nutricional y a que la acción de las bacterias del metano se vio limitada por el aumento de la carga orgánica del nuevo sustrato y el tiempo de duración de la alimentación.

Aún cuando los valores de pH se encuentran dentro del intervalo 6,7 – 7,4 reportado por Rojas[136] (1984), el cual favorece el crecimiento de las bacterias metanogénicas, estos estuvieron por el orden de 6,7 unidades lo cual también es benéfico para los grupos fermentadores y puede resultar inhibitorio en cierta medida para los grupos metanogénicos. El valor de pH se mantuvo debido a que la capacidad tampón del sistema permitió la estabilidad del mismo

[136] Rojas, O. "Relación alcalinidad – Acidos grasos volátiles", 1987.

amortiguando su acidificación, lo cual se manifiesta en la disminución de la alcalinidad bicarbonática durante las dos alimentaciones.

- Hierro 3,0 mg/l.

En la primera alimentación, el porcentaje de remoción de DQO obtenido por el reactor con la adición de hierro (E2) es mayor que el porcentaje de remoción alcanzado por el blanco, aunque este último tenga mayor AME como se observa en el Grafico 5.

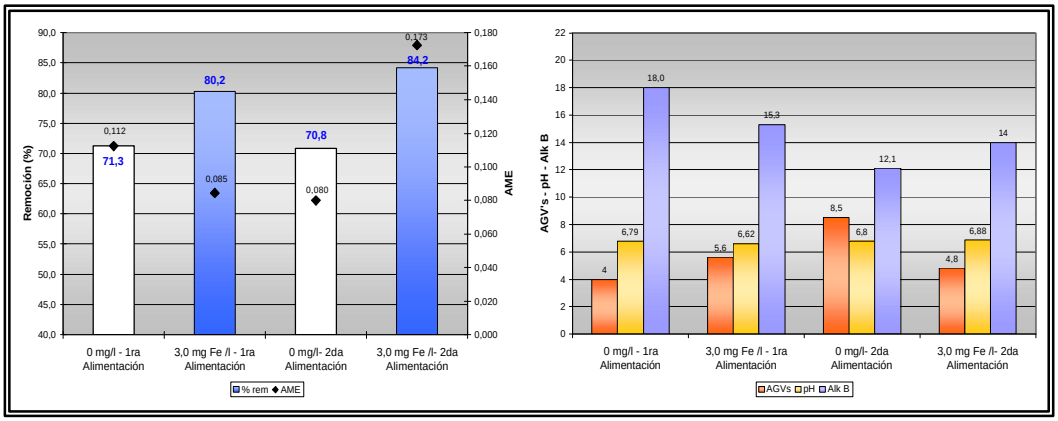


Gráfico 5. Efecto de la adición de 3,0 mg Fe/l en la DA del primer ensayo.

En el caso del blanco esto se puede presentar como se dijo anteriormente gracias a que las bacterias inicialmente asimilan más fácilmente los componentes propios del sustrato que las adiciones de nutrientes, haciendo que la materia orgánica se consuma de manera rápida en menor tiempo lo cual incrementa el valor de AME y luego presentando un detenimiento en su actividad cuando los requerimientos nutricionales no pueden ser suplidos por el sustrato lo cual afecta la tasa de remoción.

Mientras que en el reactor con adición de micronutriente (E2) la velocidad con que se consume la materia orgánica es menor a la presentada por el blanco debido a que las bacterias necesitan un mayor tiempo para adaptarse al sustrato, sin embargo el consumo de materia orgánica no se ve afectado gracias a que la suplementación garantiza por mas tiempo disponibilidad de nutrientes necesarios para que los microorganismos realicen sus funciones.

De manera similar a lo ocurrido con la dosificación de 1,45 mg/l de Fe, en la segunda alimentación el reactor suplementado se recupera obteniendo valores de AME superiores a los reportados por el blanco y remoción de materia orgánica del orden de 84%.

Estos datos son correlacionados con los de AGV's, pH y alcalinidad al bicarbonato, los cuales son indicadores del buen comportamiento del sistema en presencia de la suplementación nutricional y explican las buenas remociones de materia orgánica y los valores de AME alcanzados con respecto al blanco.

En la segunda alimentación, la producción y el consumo de AGV's en presencia de la dosis de 3,0 mg/l de Hierro fue alta, lo cual se manifiesta con los bajos valores de AGV's (4,8) al final de la alimentación y el consumo de la alcalinidad bicarbonática del sistema manteniendo los valores de pH dentro del rango óptimo. Esto se debe posiblemente a mejorías en las relaciones sintróficas de los microorganismos, como lo reporta Zegers[137] (1987), logrando mejores resultados en la coordinación entre la producción de ácidos por parte de las bacterias fermentativas y el consumo de estos por parte de las metanogénicas.

Para la dosis de 3,0 mg/l de Fe, el efecto sobre la remoción de DQO y la AME es mayor que el obtenido en la dosificación de 1,45 mg/l del mismo metal, estos dos parámetros muestran un aumento ante la adición del micronutriente en mayor cantidad, lo que indica una relación directamente proporcional entre la cantidad adicionada y su efecto positivo en el sistema. Esto tiene explicación en lo sugerido por Field[138] (1987) con respecto al ajuste de la cantidad de nutrientes en el sustrato, ya que debe estar en un valor igual a dos veces la concentración mínima requerida por los microorganismos para lograr biodisponibilidad suficiente del elemento.

- Níquel 0,145 mg/l.

En la primera alimentación la adición de 0,145 mg/l de Níquel, produjo menores porcentajes de remoción de materia orgánica y valores mas bajos de AME en comparación con el blanco, a pesar de esto en la segunda alimentación el incremento en los valores de estos dos parámetros fue evidente para el reactor con respecto al blanco como se muestra en el Gráfico 6.

Este comportamiento puede ser interpretado según Field[139] (1987) como una posible inhibición metabólica por parte de los microorganismos involucrados en la DA, cuando son expuestos a concentraciones adicionales de algunos microelementos, ya que los procesos enzimáticos de las bacterias metanogénicas se interrumpen al entrar en contacto con el micronutriente, pero luego de un periodo de latencia empiezan a producir enzimas para degradar el sustrato.

---

[137] Zegers, F. "Microbiología", 1987. Op, cit.
[138] Field, J. "Medición Parámetros", 1987. Op, cit.
[139] Ibid.

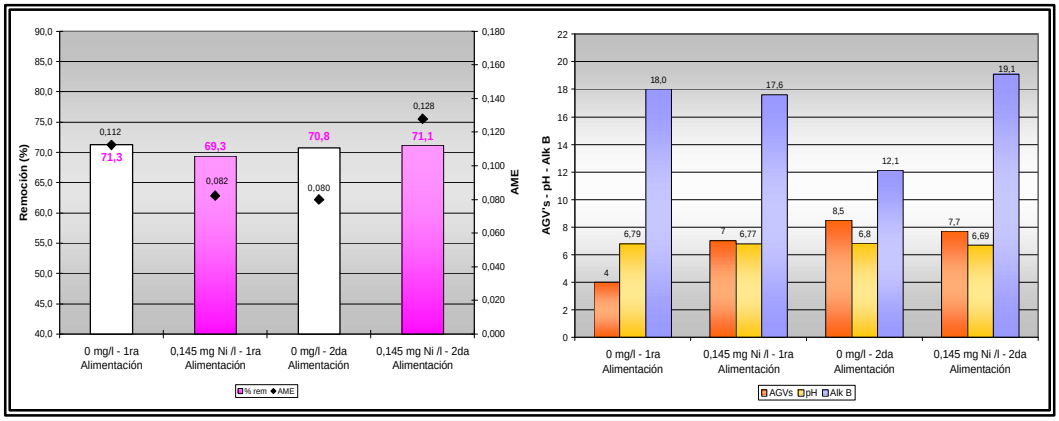


Gráfico 6. Efecto de la adición de 0,145 mg Ni/l en la DA del primer ensayo.

Los resultados obtenidos son confirmados por los datos de AGV's, pH y alcalinidad bicarbonática. El Gráfico muestra que en la primera alimentación se presenta un aumento notorio de los AGV's para el reactor con respecto al blanco ocasionando un leve descenso en el pH el cual fue contrarrestado por el consumo de alcalinidad del sistema. Esto se relaciona con la baja remoción de materia orgánica, debido a la inestabilidad de las bacterias metanogénicas y por ende con su baja actividad.

En la segunda alimentación debido al aumento en la carga orgánica del sustrato, los AGV's del reactor suplementado presentaron un aumento con respecto a la primera alimentación causando también un leve descenso en el pH. Dado que el consumo de AGV´s y la velocidad con que se consumen fue mayor, el porcentaje de AGV's que no alcanzó a ser degradado durante el tiempo del ensayo tampoco significó una amenaza para la estabilidad del sistema, lo cual se puede confirmar con el valor de alcalinidad que muestra el Gráfico 6.

Paralelo a esto el blanco presentó la mayor concentración de AGV's, el menor valor de pH y por consiguiente la mayor alcalinidad consumida con respecto a la primera alimentación y a los reactores que contenían adición de la dosis de micronutriente. Estas condiciones no fueron las más apropiadas para el crecimiento de las bacterias metanogénicas y tienen relación directa con los valores de remoción y AME obtenidos por el reactor blanco, demostrando la necesidad de suplementar con micronutrientes para mantener las remociones en el tiempo.

- Níquel 0,5 mg/l

En la primera alimentación la adición de 0,5 mg/l de Níquel generó con respecto al blanco un menor porcentaje de remoción de DQO y menor AME, siendo valores menores incluso con respecto a la adición de 0,145 mg/l. En la segunda alimentación el reactor suplementado se recuperó con respecto al blanco y de manera más significativa con respecto a la primera alimentación y a la anterior adición como se muestra en el Gráfico 7. Lo anterior reafirma la

inhibición metabólica de las bacterias ante la presencia adicional de un elemento durante el tiempo de adaptación al sustrato, mostrando además una relación directamente proporcional entre la dosis y el retardo bacterial inicial.

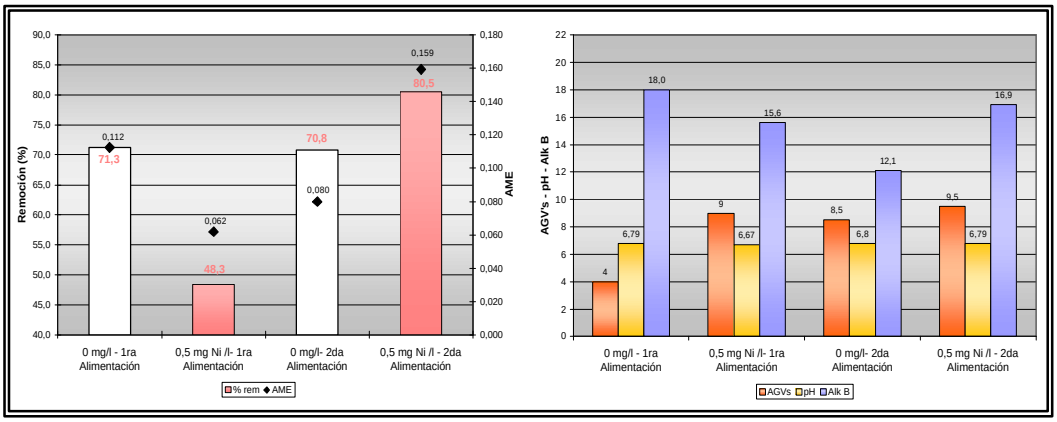


Gráfico 7. Efecto de la adición de 0,5 mg Ni/l en la DA del primer ensayo.

El valor de AGV's alcanzado por el reactor S2 en la primera alimentación es superior a los alcanzados por el blanco. Esto hace evidente la inestabilidad en el sistema por falta de acoplamiento entre los grupos bacterianos que tienen a cargo la etapa inicial de hidrólisis y de acidificación y aquellos que realizan la conversión final del sustrato a metano. Lo anterior lleva a la acumulación de productos intermedios y a la disminución del pH por la posible inhibición de las bacterias metanogénicas incidiendo en el consumo de alcalinidad bicarbonática dentro del sistema.

En la segunda alimentación la concentración de AGV's presenta un valor de 9,5 mg/l la cual es superior con respecto al blanco y a la producción de AGV´s de la primera alimentación, lo cual se debe a un posible desbalance en la fermentación ocasionado por el aumento de carga orgánica en el sustrato, el cual acarrea una mayor producción de sustrato propio de las bacterias metanogénicas. Aún con estas concentraciones de AGV´s, el sistema se mantuvo estable posiblemente por la sintrofía del proceso siendo necesario únicamente un periodo de tiempo mayor para su recuperación a medida que las bacterias metanogénicas alcanzaran la concentración adecuada para metabolizar los ácidos acumulados.

El pH tuvo un valor de 6,79 unidades encontrándose este dentro del rango óptimo para el crecimiento de los microorganismos. De igual manera, se observa que no hubo mayor consumo de alcalinidad bicarbonática en el medio, posiblemente por el equilibrio entre la producción de AGV´s y su degradación a cargo de los microorganismos. Lo anterior se manifiesta en los altos porcentajes de remoción y en los valores de AME obtenidos por el reactor con suplemento, dejando ver el efecto positivo de la adición de níquel con respecto al reactor blanco.

- Hierro y Níquel 1,45 mg/l Fe + 0,145 mg/l Ni

El Gráfico 8 muestra el comportamiento de la adición en combinación de 1,45 mg/l de Hierro y 0,145 mg/l de Níquel con respecto al blanco, en ella se puede observar que en este reactor a diferencia de los demás, se presentó en la primera alimentación una repuesta favorable de las bacterias a la dosis adicionada, lo cual se manifiesta en el porcentaje de remoción alcanzado de 82,7% que estuvo por encima del alcanzado por el blanco.

Sin embargo la AME del blanco (0,112 gDQO/gSVT), fue mayor a la del reactor con suplemento (0,100 gDQO/gSVT), lo cual permite inferir un posible retardo en la actividad bacteriana al inicio de la alimentación debido a la presencia adicional de los micronutrientes. A pesar de que la AME se mantuvo pareja en las dos alimentaciones, para la segunda alimentación la remoción de materia orgánica con respecto al blanco y a la primera alimentación disminuyó. Posiblemente el crecimiento de biomasa estimulado por la dosificación y la sobrecarga orgánica al reactor generada en el cambio de sustrato para la segunda alimentación, provocaron el descenso en la remoción de materia orgánica al final del ensayo.

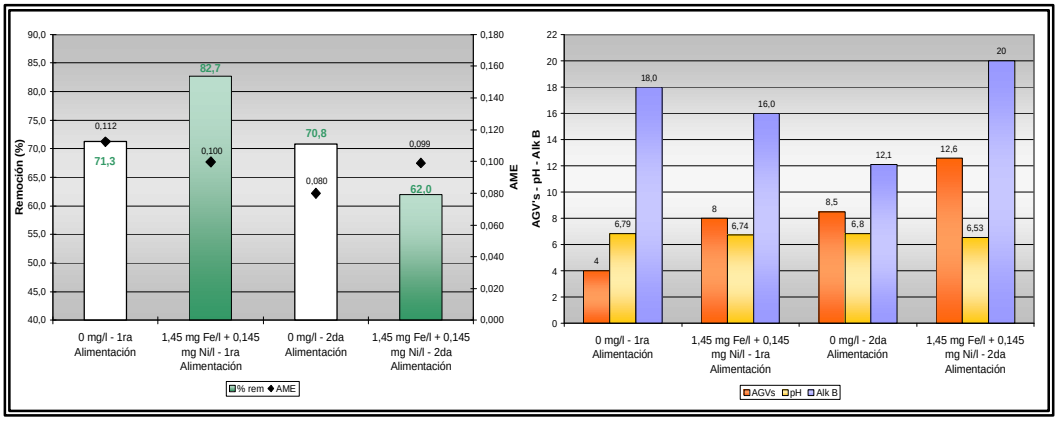


Gráfico 8. Efecto de la adición de 1,45 mg Fe/l + 0,145 mg Ni/l en la DA del primer ensayo.

Se puede deducir que posiblemente en combinación estos metales se consumen de manera más rápida según las necesidades de los grupos bacteriales involucrados en el proceso de digestión anaerobia incitando un mayor crecimiento y funcionamiento de esta, de manera que en la segunda alimentación la creciente y renovada población bacterial para suplir sus necesidades nutricionales y continuar desarrollando sus funciones demandara una mayor cantidad de micronutrientes la cual no pudo ser ofrecida por la dosificación adicionada al reactor y por ende el porcentaje de remoción obtenido luego del periodo de adaptación de las bacterias fuera el mas bajo.

Lo anterior es posible dado que frente al crecimiento bacterial las concentraciones de hierro y níquel adicionadas al reactor se encontraron por

debajo del doble del requerimiento teórico, lo cual es menor a lo sugerido por Field[140] (1987) para suplir las necesidades nutricionales de los microorganismos y garantizar un pequeño exceso de nutrientes en el sustrato que alimenta el reactor. Por lo tanto la asimilación de los elementos adicionados, inicialmente fue sencilla para los microorganismos, pero a medida que la masa microbial crecía, se hacía más ardua la competencia por el sustrato.

El valor de AGV's presente en el reactor para la segunda alimentación fue bastante alto con respecto a la primera y al blanco, lo cual contribuyó al descenso del pH y mantuvo una alta actividad de las bacterias metanogénicas debido a la cantidad presente de sustrato para estas poblaciones, impidiendo que la alcalinidad bicarbonática del sistema se viera afectada.

Síntesis

De acuerdo al desplazamiento de NaOH en el Primer ensayo, el comportamiento de los reactores estuvo determinado por la AME de cada uno situándose de manera descendente en el orden que muestra el Cuadro 20.

Pese a tener un dato inexacto de la concentración de níquel en el agua residual debido a que el límite de detección de la metodología de análisis no permite establecerlo con certeza, es notorio el efecto de las cantidades adicionadas de este metal en la AME de los microorganismos involucrados, lo cual permite inferir que su concentración en el agua residual corresponde a una cantidad menor que el doble del requerimiento teórico bacterial de este metal.

Cuadro 20. AME de los reactores según su posición al final del primer ensayo.

Posición	Reactor	Dosis	AME (gDQO/gSVT)
Primer lugar	E2	3,0 mg Fe/l	0,173
Segundo lugar	S2	0,5 mg Ni/l	0,159
Tercer lugar	C2	0,145 mg Ni/l	0,128
Cuarto lugar	C1	1,45 mg/Fe/l	0,101
Quinto lugar	C3	1,45 mg Fe/l + 0,145 mg Ni/l	0,099
Sexto lugar	P2	Agua residual	0,080

De manera general y de acuerdo a los resultados derivados del primer ensayo, se puede decir que el mejor efecto producido por las adiciones de nutrientes fue el obtenido con la concentración de 3,0 mg/l de hierro seguido por la dosis de 0,5 mg/l de Níquel haciendo evidente que las mayores concentraciones producen mayor incidencia positiva sobre los microorganismos como se muestra en el Gráfico 9.

De acuerdo a lo anterior los efectos logrados por las menores dosis no fueron tan evidentes como los de las mayores, sin embargo estos inciden de manera importante sobre la AME de las bacterias involucradas en el proceso ya que revelan mejores resultados que los del reactor sin dosificación. La dosificación

[140] Field, J. Op, cit

de 0,145 mg/l de Ni presentó mejores resultados sobre el sistema frente a la adición de 1,45 mg/l de Fe, dado que el requerimiento de Níquel en las bacterias es mucho menor que el del hierro, la cantidad adicionada de Niquel produjo mayor incidencia que la adicionada de Hierro.

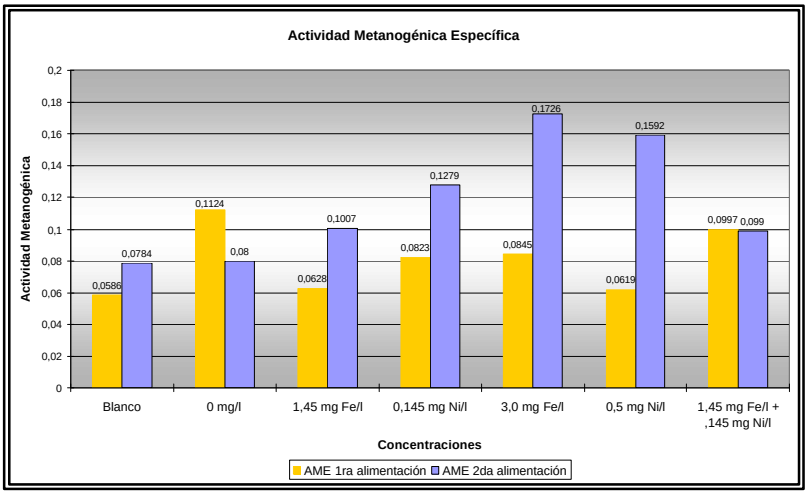


Gráfico 9. Actividad metanogenica específica – Primer ensayo.

Paralelo a esto se nota una mayor dificultad de las bacterias para asimilar las trazas de niquel ya que la inhibición al inicio de la adición es evidente, lo cual hace más lento el proceso de degradación de la materia orgánica, pues los resultados favorables se empiezan a manifestar luego de un tiempo un poco mayor de adaptación bacterial que el requerido por el hierro.

El hierro es mas fácilmente asimilado y produce buenos resultados en menor tiempo por lo que se puede considerar como el de mejor comportamiento. Este metal se requiere en mayores cantidades que otros micronutrientes, por ello es posible encontrarlo catalogado como macronutriente (Brock)[141]. Sin embargo la presencia de hierro adicional ocasionó la disminución de la alcalinidad en los dos reactores que contenían dosis de este metal posiblemente por la hidrólisis del $FeCl_3$ que produce HCl el cual consume alcalinidad.

La combinación de los metales produce buenos resultados desde el inicio, manteniéndose de esta manera durante la primera parte del ensayo posiblemente gracias a las características ya mencionadas de las trazas, aún así la dosificación es consumida en menor tiempo y por ello al finalizar el ensayo los resultados no son los esperados de acuerdo al comportamiento del montaje.

7.4.2 Segundo ensayo

Dados los resultados obtenidos se decidió realizar un nuevo ensayo con el objeto de identificar si algunas concentraciones mayores de los elementos

[141] Brock. Biología de los microorganismos. Op, cit.

adicionados en el primer ensayo arrojarían mejores resultados o si por lo contrario podrían resultar inhibitorias. Las condiciones de los montajes del segundo ensayo se muestran en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Condiciones de los montajes de AME del segundo ensayo.

SEGUNDO ENSAYO	*Alimentación*
DQO	4934 mgDQO/l
AGV's	8,2 meq/l
pH	3,29 UND
Alcalinidad Total	1161 meq/l $CaCO_3$
Temperatura	30ºC
SV	2,5 mg SV/l
Montajes	***Nomenclatura y Composición.***
	P1 Agua residual
	C1 Agua residual + 6,0 mg/l de Fe
	C2 Agua residual + 1,0 mg/l de Ni
	C3 Agua residual + 6,0 mg/l de Fe + 1,0 mg/l de Ni

Los resultados obtenidos durante el segundo ensayo se muestran en el Cuadro 22 y se ilustran en el Gráfico 10.

Cuadro 22. Resultados obtenidos en el segundo Ensayo.

Segundo Ensayo	Alimentación				
	AME (gDQO/gSVT)	DQO (mg/l)	AGVs (meq/l)	Alk B (meq/l)	I.B.
P1	0,14192	270,5	3,3	12,9	0,23
C1	0,10830	36,2	2,9	14,7	0,26
C2	0,13440	46,4	3,4	14,2	0,24
C3	0,10849	36,2	3,1	13,4	0,21

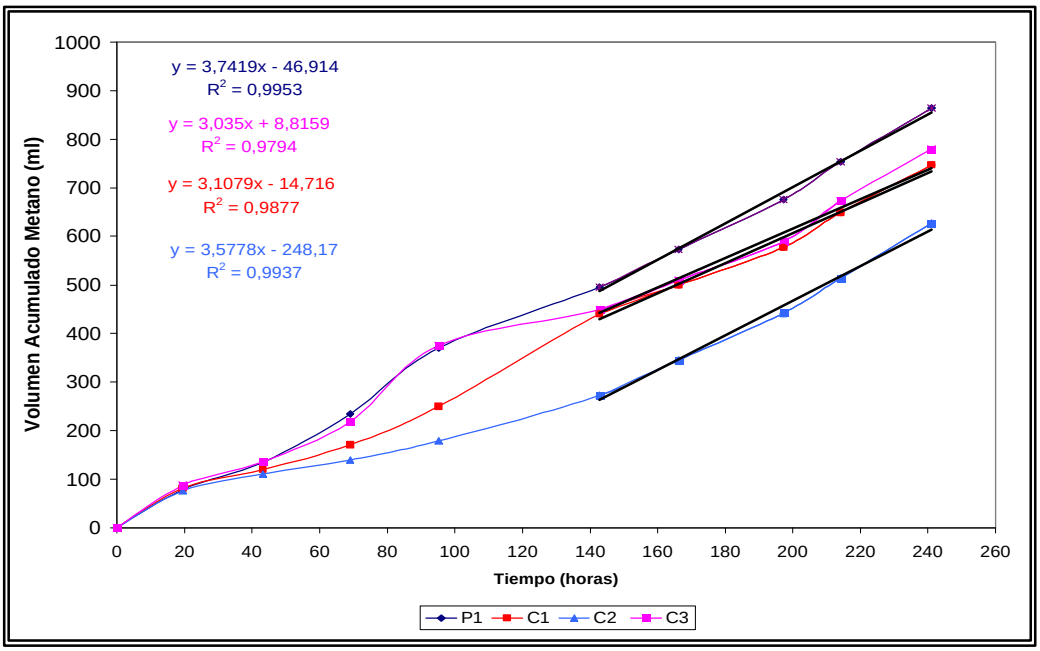


Gráfico 10. Producción de metano en el segundo ensayo.

El Gráfico 10 muestra la velocidad de producción de metano en términos de NaOH desplazado para el segundo ensayo, en el se puede apreciar que las pendientes de cada montaje alcanzan valores menores que las mayores pendientes del primer ensayo lo cual indica una disminución en la velocidad producción de CH_4 bajo las condiciones de las nuevas adiciones nutricionales. Sin embargo cabe resaltar que aún durante este periodo considerado de adaptación los resultados obtenidos con la suplementación nutricional alcanzan valores muy favorables para el proceso de digestión anaerobia.

En la etapa inicial se puede observar que el comportamiento de los montajes no es uniforme ya que los microorganismos del inóculo están adaptándose a los nuevos elementos del sustrato, en la siguiente etapa el comportamiento empieza a ser constante y la producción de metano se estabiliza gracias a la sintrofía lograda en el sistema.

El montaje P1 el cual no contenía adición alguna de microelementos, alcanzó la mayor producción de metano en el segundo ensayo, seguido por el montaje C2 con adición de 1,0 mg/l de Ni y los montajes C1 (6,0 mg/l de Fe) y C3 (6,0 mg/l de Fe + 1,0 mg/l de Ni) en su orden. Observando nuevamente que no existe una relación directamente proporcional entre las concentraciones adicionadas a los reactores y la producción de metano para las etapas iniciales de la suplementación nutricional.

Esto se debe posiblemente a que los microorganismos como se dijo anteriormente no asimilan de manera inmediata los elementos adicionados en el sustrato debido a la falta de adaptación y por el contrario les es mas sencillo metabolizar los componentes propios del agua residual, por lo cual se presentan inicialmente mayores velocidades de degradación o conversión de

materia orgánica en el reactor sin adición y seguidamente en los reactores que tienen menor carga nutricional.

A pesar de que las concentraciones adicionadas en este ensayo exceden en gran medida las adicionadas en el primer ensayo, no se presentaron episodios de inhibición completa de la población bacterial y por el contrario los valores de AME de los reactores con suplementación de micronutrientes estuvieron muy cercanos al valor de AME del blanco.

7.4.2.1 Efecto de la adición de Hierro y Níquel en la AME del segundo ensayo.

La discusión esta dirigida a evaluar la suplementación de micronutrientes en los reactores del segundo ensayo, para ello se compara los reactores que contienen las adiciones de los elementos con el reactor sin adición alguna de la misma alimentación. Los reactores se muestran en el Gráfico 11.

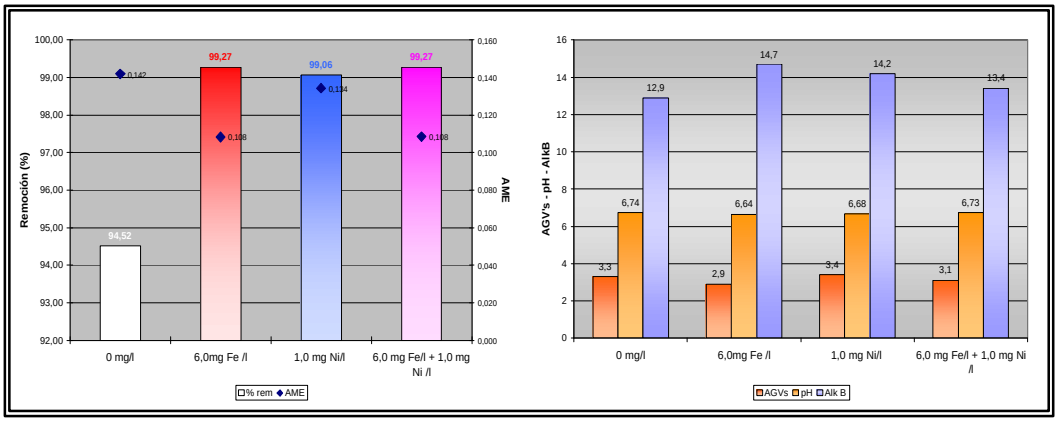


Gráfico 11. Efecto de la adición de nutrientes en el segundo ensayo.

El Gráfico muestra que los valores de AME alcanzados por los reactores con adición de micronutrientes son menores que el valor de AME del reactor que solo contiene agua residual. De manera contraria a lo que sucede con los porcentajes de remoción de materia orgánica ya que los reactores C1 (6,0 mg/l de Fe) y C3 (6,0 mg/l de Fe + 1,0 mg/l de Ni) obtuvieron para este ensayo el mayor porcentaje de remoción de materia orgánica con 99,27% seguido por 99,06% alcanzado por el reactor C2 (1,0 mg/l de Ni) frente a 94,52% alcanzado por el reactor si adición de microelementos. Los porcentajes de remoción alcanzados en este ensayo por dichos reactores están por encima de los arrojados por el primer ensayo.

La relación entre la AME y el porcentaje de remoción indica que a pesar de que las bacterias sufren una pequeña inhibición de tipo metabólico al inicio del ensayo, ocasionada por la presencia de concentraciones mayores de microelementos, los porcentajes de remoción no se ven afectados puesto que la DQO del sustrato al final del ensayo se redujo casi en su totalidad.

Lo anterior es posible dado que según Field[142] (1987) la adaptación en las bacterias significa que pueden funcionar mejor en la presencia de una toxina después de una exposición a concentraciones subletales de esta, lo cual garantiza una buena remoción de la DQO del sistema.

Teniendo en cuenta que cualquier nutriente o micronutriente puede considerarse toxico en concentraciones mayores a las posiblemente toleradas por ciertos grupos bacteriales, se puede deducir que de manera similar a lo ocurrido en el primer ensayo las dosis usadas para este ensayo pudieron causar el desbalance entre la AME y los porcentajes de remoción, sin embargo dado que los resultados de la adición se observan en un corto plazo luego de la adaptación de los microorganismos involucrados en el proceso, es posible encontrar que las concentraciones mayores de microelementos adicionales arrojen mejores resultados que el blanco luego de dicho periodo de adaptación.

Los resultados de AGV's, pH y alcalinidad bicarbonática obtenidos para este ensayo muestran un comportamiento bastante estable de los reactores. El pH se mantuvo para todos los reactores dentro del rango que favorece a las bacterias metanogénicas, las concentraciones de AGV's presentes al final del ensayo estuvieron por debajo de la concentración al inicio de este, descartando una posible acidificación del sistema. La alcalinidad bicarbonática mostró un aumento debido al aporte de H_2 y CO_2 producido por las bacterias acetogénicas en la conversión de ácidos butírico y propiónico hasta acetato, aseverando los efectos positivos de la suplementación en los sistemas por la mayor eficiencia de los grupos bacteriales y sus relaciones sintróficas.

Síntesis

De acuerdo al desplazamiento de NaOH en el Segundo ensayo, el comportamiento de los reactores estuvo determinado por la AME de cada uno situándose de manera descendente en el orden que muestra el Cuadro 23.

Cuadro 23. AME de los reactores según su posición al final del primer ensayo.

Posición	Reactor	Dosis	AME (gDQO/gSVT)
Primer lugar	P1	Agua residual	0,142
Segundo lugar	C2	1,0 mg Ni/l	0,134
Tercer lugar	C1	6,0 mg Fe/l	0,108
Tercer lugar	C3	6,0 mg/Fe/l + 1,0 mg Ni/l	0,108

La combinación de los microelementos a pesar de contener las dosis de metales traza usada para las adiciones individuales, no produjo efectos significativos frente a las otras dosificaciones. Por otro lado las adiciones restantes con dosificaciones individuales, arrojaron resultados muy favorables en este periodo, incluso los resultados de la adición de Níquel estuvieron por encima de los de la combinación de manera similar a lo ocurrido en la primera alimentación del primer ensayo, siendo esta dosificación la que mejor

[142] Field, J. Op, cit

comportamiento obtuvo en el segundo ensayo como se muestra en el Gráfico 12.

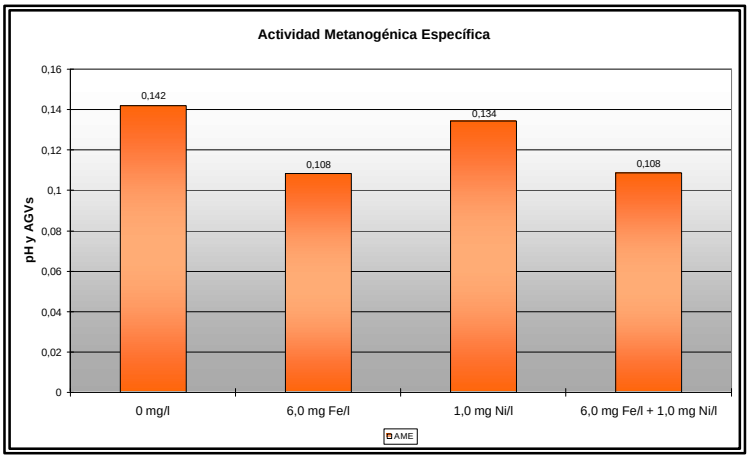


Gráfico 12. Actividad metanogenica específica – Segundo ensayo.

Lo anterior demuestra que de comportarse el segundo ensayo de acuerdo a la pauta del primer ensayo posiblemente se producirían mejores resultados luego del periodo de adaptación para todos los reactores y de manera especifica el reactor que contiene las dosis en combinación reportaría resultados muy significativos para el proceso de digestión anaerobia.

De acuerdo a los resultados obtenidos la dosis requerida para el mejoramiento de la Digestión anaerobia del agua residual proveniente del proceso de extracción de almidón de yuca es la de 3,0 mg/l de Hierro, ya que presentó los mejores efectos en cuanto a la AME de las bacterias y el porcentaje de remoción de materia orgánica del sistema sin afectar significativamente sus demás condiciones ambientales. Por otro lado también es recomendable probar nuevamente la suplementación de la combinación de 6,0 mg Fe/l + 1,0 mg Ni/l ya que esta aporta cantidades suficientes de nutrientes para las bacterias involucradas y sus resultados positivos no tardan mucho en manifestarse.

Los aportes derivados de este trabajo de investigación dejan muchas expectativas con respecto a la incidencia de ciertos elementos sobre el comportamiento de los microorganismos involucrados en los tratamientos biológicos, dejando clara la necesidad de ampliar la investigación dentro de este campo para contribuir con el mejoramiento de los sistemas de tratamiento biológico.

7.5 Análisis Costo Beneficio en la Adición de las Dosis de Hierro y Níquel al Sistema de Tratamiento a escala real.

El siguiente análisis está enfocado a determinar el beneficio que desde el punto de vista económico se obtiene luego de la adición de nutrientes al sistema de tratamiento de las aguas residuales del proceso productivo. Para ello, primero se cuenta con una definición de la normatividad que rige el cobro por tasas

retributivas y luego se presentan las características del sistema de tratamiento que ha sido implementado en una de las rallanderías de la región. Finalmente, se presentan el análisis de costos por el cobro de tasas retributivas para el sistema con adición y sin adición de Hierro y Níquel, asumiendo una eficiencia de remoción de DQO, DBO_5, SST del orden del 70% para este sistema de tratamiento.

7.5.1 Marco Normativo de Referencia

El análisis costo – beneficio es determinado luego de aplicar lo estipulado en el Decreto 3100 de 2003[143], el cual reglamenta las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de vertimientos puntuales y establece la tarifa mínima y su ajuste regional. En este decreto se estipula el factor regional para el incremento en el cobro de la tasa retributiva y se implementa a partir del segundo año de entrado en vigencia dicho decreto. De igual manera, el incremento está asociado a las metas de reducción de carga contaminante para cada sector específico, como se menciona en su artículo 15 con un valor no menor a 1 y no mayor a 5.5. Cada corporación regional establecerá, junto con los usuarios, las metas sectoriales e individuales de acuerdo a su artículo 8. Sin embargo, para la implementación en el presente documento el factor regional empezará con un valor igual a uno (1), pues aún no ha transcurrido el primer año luego del establecimiento de dicha norma y además la Corporación Regional del Cauca (CRC), aún no ha definido las metas sectoriales en la agroindustria rallandera.

Para el cálculo de la tasa retributiva se requiere conocer la carga contaminante diaria y la tarifa mínima de los parámetros. Se usan por consiguiente las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{Cc = Q \times C \times 0{,}0864 \times (t/24)} \qquad \mathbf{(1)}$$

Donde:

Cc = Carga contaminante del parámetro (Kg/día)
Q = Caudal promedio (l/s)
C = Concentración de la sustancia contaminante (mg/l)
0,0864 = factor de conversión de unidades
t = tiempo de vertido del usuario (h)

El monto a pagar por tasa retributiva de cada usuario, dependerá de su carga contaminante vertida y de su correspondiente meta sectorial o individual. Si se cumple con la meta respectiva, el factor regional aplicado al usuario será igual a 1; si se incumple, el valor del factor regional será el calculado conforme el artículo 15 del presente Decreto 3100 de 2003[144], en el cual se definen las metas sectoriales anuales para los diferentes sectores industriales junto con un factor de incremento de la tasa retributiva para los usuarios que incumplen esa

[143] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Op, cit.

[144] Ibid.

meta. El monto a cobrar por concepto de tasa retributiva será de conformidad con la siguiente fórmula:

$$MP = S\, C_i * Tm_i * Fr_i \qquad (2)$$

Donde:

MP = Total Monto a Pagar
C*i* = Carga contaminante de la sustancia *i* vertida durante el período de cobro
Tm*i* = Tarifa mínima del parámetro *i*
Fr*i* = Factor regional del parámetro *i* aplicado al usuario. Si cumple con su meta individual o sectorial es igual a 1; si incumple es calculado de acuerdo al artículo 15.
N = Total de parámetros sujetos a cobro

7.5.2 Análisis de costos del sistema

El siguiente análisis plantea dos escenarios ideales, el primero de ellos es el del costo generado por el cobro de tasas retributivas al tratamiento de las aguas residuales del proceso con los porcentajes de remoción asumidos para los parámetros estipulados en el Decreto 1594 de 1984, y el segundo escenario es el del costo de la aplicación de micronutrientes a ese sistema y el consiguiente incremento en las eficiencia de remoción del filtro. A continuación se presenta una descripción general del sistema de tratamiento con los parámetros requeridos para el cálculo de las tasas retributivas, y posteriormente los análisis costo beneficio para cada uno de los escenarios propuestos.

7.5.2.1 Características del sistema de tratamiento

En la actualidad el sistema de tratamiento de las aguas residuales provenientes del proceso productivo en una de las rallanderías de la región, se encuentra operando de manera inadecuada, debido a la sobrecarga del sistema en los días de máxima producción, a la ausencia en la dosificación de la cal, a problemas asociados al diseño del reactor, a las características y volumen del inoculo, entre otros[145]. En el Cuadro 24, se presentan las características fisicoquímicas del agua residual a la entrada del sistema cuando fue operado de manera constante, obteniendo porcentajes de remoción de la materia orgánica del 70%. En él se pueden observar los parámetros utilizados para la realización de los estimativos de costos por el cobro de tasas retributivas.

[145] Caicedo, M. Com. Pers., 2004.

Cuadro 24. Parámetros de control del sistema de tratamiento de una de las rallanderías del departamento del Cauca.

Parámetro	Unidad	Valor
DQO	mg O_2/l	3.515,0
DBO_5	mg O_2/l	2.812,0
SST	mg SST/l	600
Caudal de diseño del reactor	m^3/día	20
TRH	h/día	10,05
Caudal Tratado por día	m^3/día	17,0

7.5.2.2 Escenario 1. Tratamiento sin la adición de nutrientes

Este escenario es el que se ha desarrollado en la rallandería hasta el momento, y considera la hipótesis de que el sistema se encuentra trabajando de manera continua y con porcentajes de remoción de la DBO_5 alrededor del 70%. La literatura plantea que en los filtros anaerobios se consiguen porcentajes de remoción constantes de SST en por el orden de 80%, por lo cual se asumió para esta hipotesis un valor de remoción del 70% para este parámetro.

Partiendo de estos valores y con los datos de caudal tratado por día en el sistema de tratamiento, se procede a efectuar el cálculo del cobro por tasas retributivas. Debe considerarse en este punto que aún no se han llevado a cabo estos cobros a los rallanderos del sector, sin embargo la CRC se encuentra adelantando estudios con los diferentes sectores para establecer las metas regionales y la fecha de inicio en la facturación de las tasas retributivas, está última debe realizarse durante el año 2004. En el Cuadro 25 se presenta la posible carga contaminante por DBO_5 y SST de la rallandería objeto de estudio, luego de la aplicación de la ecuación 1. Con estas cargas se realiza la facturación por el cobro de tasas retributivas aplicando la ecuación 2 a cada uno de los parámetros. Para ello, se plantean las tarifas mínimas estipuladas por el Ministerio del Medio Ambiente las cuales son:

- Para la DBO_5 se plantea un cobro mínimo de $ 74,34 por Kg de DBO_5
- Para los SST se plantea un cobro mínimo de $ 31,75 por Kg de SST.

Cuadro 25. Costos por tasas retributivas para el actual sistema de tratamiento

Parámetro	% Remoción con el tratamiento	Carga (Kg/año) Sin tratamiento[1]	Costo por tasa Retributiva ($/año)
DBO_5	70	5.233,0	389.021,2
SST	70[2]	1.116,5	35.450,9

Nota: [1] Cálculo realizado con el total de días trabajados durante el año en el sistema productivo dentro de un (1) año.
[2] Dato reportado por Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo, (1999) para filtro anaerobio.

Se puede observar por lo tanto, que el costo total por pago de tasas retributivas en el año es de $ 424.472.12 para la rallandería objeto de estudio.

7.5.2.3 Escenario 2. Aplicación de Hierro y Níquel al sistema de tratamiento.

El segundo escenario es la adición de microelementos al sistema de tratamiento y el pago de la tasa retributiva por las descargas contaminantes luego de que el efluente incrementa las eficiencias de remoción. Se empezará primero por el cálculo de las dosis de nutrientes a escala real y la generación de costos por la adición de hierro y níquel. Posteriormente, se realizará el cálculo de la tasa retributiva por la carga contaminante que sale del sistema.

– Dosificación de Microelementos al filtro anaerobio

Las condiciones para la dosificación de hierro y níquel al filtro anaerobio son las presentadas en el cuadro 26, junto con los resultados de las cantidades y los costos asociados al sistema.

Cuadro 26. Costos asociados al sistema luego de la adición de los metales traza.

Parámetro	Dosis de metal a adicionar (mg/l)	Concentración del compuesto a adicionar (mg/l)[1]	Cantidad a adicionar (g/d)[2]	Costo día de metal ($/día)[3]	Costo por año de metal ($/año)
Hierro	3,00	14,514	271	608	221.920
Níquel	0,5	2,025	39	879	320.835

Nota: [1] Valor calculado con el caudal tratado por día (17 m^3/día), el peso molecular del compuesto y peso atómico del elemento. El compuesto utilizado para la dosificación del Hierro es $FeCl_3$ al 99,6 % mientras que para la adición de Níquel es el $NiCl_2.6H_2O$ al 97,2%
[2] Cálculo realizado con un factor de seguridad del 10% y con el caudal tratado por día.
[3] Valores cotizados en laboratorios químicos

Por lo tanto el costo anual de adicionar los microelementos al sistema de tratamiento es de $ 542.755,0

– Pago de tasas retributivas por el aporte de carga contaminante

En el Cuadro 27 se presenta la carga contaminante por DBO_5 y SST de la rallandería objeto de estudio, luego de la adición de micronutrientes al sistema, lo cual representa mayores porcentajes de remoción de la materia orgánica. Para este efecto se considero un porcentaje de remoción del 84,2 % el cual fue obtenido durante los ensayos de actividad metanogénica con la adición de 3,0 mg/l de Hierro.

Cuadro 27. Cobro por tasas retributivas para el actual sistema de tratamiento con adición de nutrientes.

Parámetro	% Remoción con el tratamiento	Carga (Kg/año) con tratamiento[1]	Costo por tasa Retributiva ($/año)
DBO_5	84,2	2.756,0	204.881,0
SST	70	1.116,5	34.448,8

Nota: [1] Cálculo realizado con el total de días trabajados durante el año en el sistema productivo dentro de un (1) año.

Por lo tanto, el costo total por el pago de tasas retributivas luego de la adición de nutrientes y el aumento de los porcentajes de remoción es de $ 239.329,0.

7.5.3 Comentarios finales

Finalmente, para la hipotesis planteada inicialmente la suma del pago por tasa retributiva más los costos generados por la adición de microelementos es de $782.084,0, la cual en la actualidad es mayor al costo por el pago de tasas retributivas sin la adición de micronutrientes correspondiente a $424.472.1. Es importante resaltar que aún no se han implementado las metas sectoriales de reducción de carga contaminante, por lo cual el monto a cobrar por tasa retributiva para el sistema de tratamiento no ha aumentado con el ajuste del factor regional. Esto incrementaría periódicamente su valor permitiendo suponer un alza considerable en la tarifa a pagar por el sector Rallandero de manera similar a como lo muestra el Cuadro 28.

Cuadro 28. Proyección de costos por Tasa Retributiva - Sector Rallandero ($col).

Tasa Retributiva		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Sin Tratamiento	DBO5	389.021,2	419.753,9	679.371,7	977.389,4	1.318.253,9	1.706.875,2	2.148.671,4
	SST	35.448,9	38.249,3	41.271,0	44.531,4	48.049,4	51.845,3	55.941,1
	Total	424.470,1	458.003,2	720.642,7	1.021.920,8	1.366.303,4	1.758.720,5	2.204.612,5
Con Tratamiento (Incumpliendo Meta)	DBO5	204.881,0	221.066,6	357.796,4	514.749,7	694.268,7	898.939,1	1.131.614,4
	SST	35.448,9	38.249,3	41.271,0	44.531,4	48.049,4	51.845,3	55.941,1
	Nutrientes	542.755,0	585.632,6	631.897,6	681.817,5	735.681,1	793.799,9	856.510,1
	Total	783.084,9	844.948,6	1.030.965,0	1.241.098,7	1.477.999,2	1.744.584,3	2.044.065,7
Con Tratamiento (cumpliendo Meta)	DBO5	204.881,0	221.066,6	238.530,9	257.374,8	277.707,5	299.646,4	323.318,4
	SST	35.448,9	38.249,3	41.271,0	44.531,4	48.049,4	51.845,3	55.941,1
	Nutrientes	542.755,0	585.632,6	631.897,6	681.817,5	735.681,1	793.799,9	856.510,1
	Total	783.084,9	844.948,6	911.699,6	983.723,8	1.061.438,0	1.145.291,6	1.235.769,7

Nota: Los recuadros azules indican el año en el cual el sistema empieza a ser rentable. Para los cálculos de la proyección se tuvo en cuenta el IPC de los últimos 5 años, la remoción de carga que ofrece el sistema suplementado y el posible incremento anual de la tarifa.

La adición de micronutrientes puede garantizar periodos continuos de remoción al sistema (superiores al 80%), mientras que operarlo sin suplementación ocasiona continuas fluctuaciones que a escala real tienden a disminuir su eficiencia lo cual eleva la problemática ambiental de la región y genera mayores costos al sector industrial. Estos costos se ven reflejados en lo altos cobros por concepto de tasa retributiva como lo muestra el Gráfico 13 en el cual se puede observar la tendencia a futuro de dichos costos frente a la implementación del sistema con adición de micronutrientes.

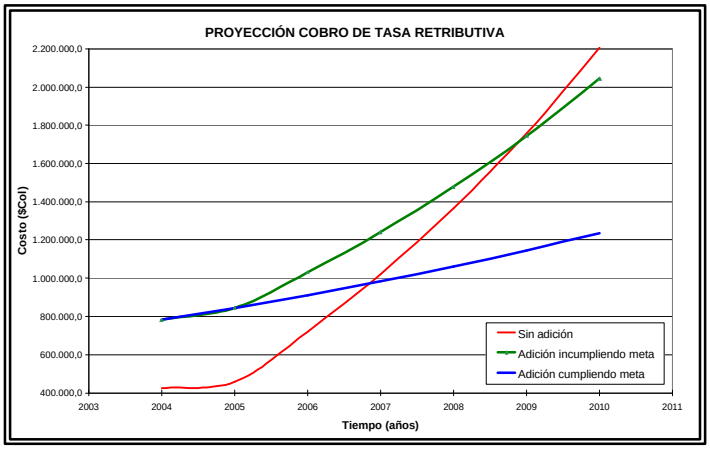


Gráfico 13. Cobro Tasa Retributiva – Adición de micronutrientes.

Por lo anterior, aunque en la actualidad se generen mayores costos en el sistema de tratamiento con la adición de micronutrientes, debe considerarse que la adición resulta benéfica luego de la implementación de las metas sectoriales de reducción de carga por parte de la Autoridad Ambiental Competente, ya que de cumplir con dicha meta no se incrementará el factor regional disminuyendo los costos asociados al cobro de la tasa y contribuyendo con la normalidad de la actividad industrial.

Sin embargo dentro del análisis debe considerarse que a largo plazo la adición no sólo presentará beneficios desde el punto de vista económico sino también desde el punto de vista social y ambiental, los cuales no han sido considerados en el presente estudio, pues aún no se han establecido indicadores por parte de la autoridad ambiental, que permitan cuantificarlos.

Algunos de los beneficios intangibles que puede obtener el Sector Rallandero con la implementación de un sistema que cumpla con los límites de vertimientos permisibles establecidos y las metas de reducción de carga contaminante vertida son:

- Sostenimiento del ecosistema.
- Reducción de Morbilidad y Mortalidad (EDA, Infecciones cutáneas).
- Mejoramiento de las condiciones para la recreación.
- Usos del recurso hídrico
- Reactivación del Agro
- Calidad de Vida
- Empleo: Aproximadamente el 8% del empleo en el Municipio de Santander de Quilichao (78.000 habitantes), lo generan las industrias Rallanderas.
- Reducción de costos en el tratamiento de potabilización aguas abajo. Mejoramiento de la imagen de la Rallandería.
- Permanencia del producto industrial en el mercado.
- Incremento en el valor del suelo.

8 CONCLUSIONES

Los resultados arrojados por la caracterización nutricional de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, mostraron que no era necesario adicionar nitrógeno y fósforo al sistema, ya que existe suficiente cantidad biodisponible de estos macronutrientes para llevar a cabo las funciones de las bacterias involucradas en la digestión anaerobia. Sin embargo se encontraron deficiencias de Hierro y Níquel, por lo cual las adiciones fueron realizadas con estos elementos únicamente.

Las concentraciones teóricas de Nitrógeno, Fósforo, Níquel y Hierro necesarias para la digestión anaerobia del agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca calculadas para una DQO promedio de 3515 mg/l son las siguientes:

N = 17,57 mg/l, P = 3,515 mg/l, Ni = 0,082 mg/l, Fe = 0,823mg/l.

Pese a que el límite de detección de la metodología de análisis no permitió establecer con certeza el dato de la concentración de níquel en el agua residual, es notorio el efecto de las cantidades adicionadas de este metal en la AME de los microorganismos involucrados, lo cual admite inferir que su concentración en el agua residual corresponde a una cantidad menor que el doble del requerimiento teórico bacterial de este metal.

La deficiencia teórica de Níquel y Hierro en el agua residual del proceso de extracción de almidón de yuca, marca una diferencia importante en su digestión anaerobia, ya que luego de adicionar dichos elementos la AME aumentó drásticamente, lo que indica que la suplementación con Hierro y Níquel produjo efectos positivos en la digestión anaerobia de las aguas residuales provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca, logrando una mayor actividad de las bacterias encargadas de producir metano y por ende mayores porcentajes de remoción de materia orgánica en el sistema.

Los efectos positivos de la suplementación nutricional sobre el metabolismo bacteriano se manifiestan en el corto periodo de arranque logrado para el sistema inoculado con lodo sin adaptar, ya que la AME aumenta considerablemente luego del periodo de aclimatación de las bacterias a las nuevas concentraciones de nutrientes del sustrato, haciendo menos prolongado el periodo de tiempo en que se logran mejores resultados en la digestión anaerobia de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.

El efecto producido por la concentración de 3,0 mg/l de hierro fue el mejor durante el primer ensayo, seguido por la dosis de 0,5 mg/l de Níquel. Lo cual hace evidente que las mayores concentraciones producen mayor incidencia positiva sobre los microorganismos debido a que están presentes con mayor biodisponibilidad en el sustrato.

La dosificación de 0,145 mg/l de Ni presentó mejores resultados sobre el sistema que la adición de 1,45 mg/l de Fe. Dado que el requerimiento de Níquel en las bacterias es mucho menor que el de hierro, la cantidad adicionada de Niquel aún siendo pequeña alcanzó a suplir las necesidades bacteriales de este elemento y produjo mayor incidencia que la adicionada de Hierro la cual no fue suficiente frente a las necesidades nutricionales de las bacterias.

La combinación de metales en el primer ensayo produjo altas cantidades de metano con una AME de 0,100 y mejores porcentajes de remoción frente a los demás montajes del orden de 82,7% al inicio del ensayo, sin embargo la falta de una dosis mayor al final del ensayo que supliera las necesidades nutricionales de la biomasa generada en el sistema produjo una disminución en la AME de los microorganismos y por ende una disminución de la remoción de materia orgánica.

El reactor sin adición de nutrientes al inicio de los dos ensayos presento una AME mayor que los reactores suplementados, sin embargo debido a la carencia de condiciones apropiadas para el estímulo del metabolismo bacteriano ya que los micronutrientes no se encuentran en concentraciones suficientes para la realización de los procesos vitales de los microorganismos anaerobios, la AME disminuyó haciendo evidente la necesidad de suplementar con Hierro y Niquel.

Los microorganismos respondieron positivamente a las dosificaciones de Hierro y Níquel adicionadas de manera individual en el segundo ensayo, logrando valores de AME en el orden 0.100 y porcentajes de remoción de 99% para esta alimentación, logrando mejores resultados que los presentados por las dosificaciones de la primera alimentación del primer ensayo.

En el segundo ensayo la combinación de los microelementos no produjo efectos significativos frente a las otras dosificaciones de manera contraria a lo sucedido en el primer ensayo, debido probablemente a la falta de tiempo para la adaptación de las bacterias a las nuevas y mayores dosis de metales traza.

Debido a que los microorganismos del lodo ya estaban adaptados al sustrato, la dosificación de micronutrientes para el segundo ensayo no es muy significativa frente al blanco en cuanto a porcentajes de remoción y valores de AME, sin embargo en cuanto a disminución de cobros por tasas retributivas la minimización del contaminante es benéfico para la industria en cualquier proporción.

Las mayores adiciones de hierro aportan mayor biodisponibilidad de este elemento para los microorganismos produciendo buenos resultados en menor tiempo, sin que los posibles agentes quelantes o los demás elementos existentes en el sustrato con los que puede reaccionar, constituyan un mayor inconveniente.

La capacidad del reactor para soportar altas e inesperadas cargas orgánicas, posiblemente aumenta con la adición del micronutriente de manera

directamente proporcional debido a la mayor biodisponibilidad de los elementos en el sustrato.

Las condiciones de pH, alcalinidad y AGV´s de manera general durante los ensayos se mantuvieron dentro de los rangos necesarios para evitar el colapso de los sistemas (reactores) suplementados con las diferentes concentraciones de micronutrientes.

Los sistemas del segundo ensayo, los cuales contaban con adiciones en mayor cantidad de micronutrientes además de mantener valores de pH cercanos a la neutralidad sin afectar su alcalinidad, presentaron valores de AGV por debajo de 3,4 lo cual corrobora la eficiencia del sistema aclimatado. Paralelo a esto las adiciones del primer ensayo las cuales contienen menos cantidad de metales traza, a pesar de mantener su pH dentro del rango requerido muestran concentraciones de AGV´s más altas y en aumento luego del periodo de adaptación de la primera alimentación, por lo cual y para evitar la acidificación del sistema se ve disminuida la alcalinidad del mismo.

Los valores de AGV's para el montaje con adición de 3,0 mg/l de Fe tuvieron una creciente significativa en el transcurso del proceso pero al final sus concentraciones fueron reducidas por la metabolización de los mismos a CH_4, lo cual indica que dentro del sistema se presentó un equilibrio sintrófico, ya que la producción de AGV`s por parte de las bacterias acidogenicas y acetogénicas fue consumida en su mayoría por las bacterias metanogénicas. Lo anterior se refleja en que el pH sufrió cambios durante el proceso, siendo mitigados por la alcalinidad del sistema sin verse afectada esta última de manera significativa, razón por la cual se considera junto con la dosis de 0.5 mg/l de Ni como una de las dosis necesaria para el mejoramiento de la digestión anaerobia de esta agua residuales.

La suplementación con micronutrientes al sistema de tratamiento propuesto a escala real para las aguas procedentes del proceso de extracción de almidón de yuca incrementa los costos a pagar al sector Rallandero. A pesar que la eficiencia del sistema luego de la adición de micronutrientes aumenta disminuyendo el monto a pagar por tasa retributiva, la suma de costos de dosificación y tasa retributiva que tendrían que pagar los rallanderos, resulta mayor que el pago que harían de la tasa retributiva actualmente sin adición alguna de micronutrientes.

9 RECOMENDACIONES

En el diseño de sistemas de tratamiento biológico deben tenerse en cuenta muchos factores, sin embargo su eficiencia depende de la actividad de los microorganismos, por lo cual de manera especial es indispensable procurarles las condiciones que les permitan desarrollarse y crecer de manera adecuada. Por ello es preciso estudiar el metabolismo de los diferentes grupos bacteriales involucrados ya que cada uno tiene requerimientos ambientales y nutricionales únicos, los cuales deben ser garantizados para el mejoramiento de dichos sistemas de tratamiento.

La actividad de la biomasa depende de algunos factores entre los cuales la biodisponibilidad nutricional es muy importante. Por lo anterior y de acuerdo con (Wheatley et al 1988) en que muchos de los desechos industriales incluyendo algunos provenientes de comidas, bebidas y fermentación no son balanceados nutricionalmente para un óptimo tratamiento anaerobio, es preciso continuar con los estudios en este campo de manera que se tenga en cuenta la caracterización de los desechos a tratar y la incidencia de ciertos nutrientes sobre el comportamiento de la biomasa.

Los sistemas de tratamiento biológico inoculados con lodo sin adaptar, deben suplementarse con micronutrientes ya que estos pueden aceleran el proceso de arranque que en la mayoría de los casos lleva bastante tiempo y se hace dispendioso debido a los altibajos ocasionados en el periodo de aclimatación de los microorganismos al sustrato.

Considerar los beneficios ambientales y sociales de la dosificación de micronutrientes al sistema de tratamiento, ya que dichos sectores son los más afectados con la problemática actual del sector industrial productor de almidón de yuca, cobrando más importancia en cuanto las autoridades ambientales competentes establezcan indicadores con los cuales sea posible identificar sus pérdidas.

Los resultados obtenidos con el análisis costo beneficio, deben ser actualizados ya que los factores usados para el cálculo de la tasa retributiva del sector rallandero, serán modificados antes del termino del presente año, lo cual traerá un aumento en el monto a pagar por tasa retributiva para este sector. Por lo anterior no se puede desechar la posible rentabilidad de la suplementación al sistema de tratamiento biológico propuesto para este sector industrial.

Debido a que el inóculo usado (estiércol) en los sistemas de tratamiento de estas aguas residuales no es el más apropiado respecto de la cantidad de microorganismos aptos para el proceso y teniendo en cuenta que la AME depende de la composición y concentración del agua residual a tratar así como

de la concentración de microorganismos aptos en el inóculo, es necesario aportar al ensayo una cantidad mayor de inóculo a la sugerida por la teoría.

Es necesario adaptar con anterioridad las bacterias a la adición nutricional con el objeto de evitar una posible inhibición metabólica que junto con las cargas entrantes entorpezcan definitivamente el proceso de metanogénesis.

El requerimiento básico de microelementos debe ser suplementado en cantidades que superen el doble de lo estipulado por la teoría. De esta manera se provee un exceso de nutrientes en el sustrato el cual a su vez garantiza la biodisponibilidad de dichos nutrientes para los grupos bacteriales involucrados en el proceso.

La suplementación en combinación debe hacerse con las mayores concentraciones de los microelementos para garantizar de manera constante alta AME y lograr mayores porcentajes de remoción de materia orgánica en el sistema. Debido a que una mayor dosis de microelementos procura a las bacterias las condiciones nutricionales adecuadas para degradar toda la materia orgánica.

10 BIBLIOGRAFÍA

ALARCON, M. Freddy; DOFOUR, Dominique; *Almidón Agrio de yuca en Colombia : Producción y recomendaciones.* Cali, Colombia. Centro de Agricultura Tropical (CIAT). Montpellier, Francia, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Département D'Amélioration des Méthodes pour L'innovation scientifique. 1998. Volumen 1. Publicación CIAT No. 268.

APHA, AWWA y WPCF. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. 1985.

APONTE, L. *Efectos del cianuro sobre la fermentación metanogénica. Estudios realizados a reactores anaerobios con flujo discontinuo*. Universidad del Valle, Facultad de Ciencias, Cali, Colombia. 1996

ARROYAVE, Pulido. *Factibilidad de depuración de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, utilizando un sistema de digestión anaerobia de fases separadas*. Universidad del Valle, 1996.

BAENA, L.M. y DUQUE, V.A. *Estudio de tratabilidad de las aguas residuales generadas en el beneficio de yuca mediante filtro anaerobio de flujo ascendente*. CVC. 1994.

BARBA H., y ALTAMIRANO, C.P. *Biodegradabilidad anaerobia del material en suspensión de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón agrio de yuca*. Universidad del Valle, Cali.1995.

BERNAL, EI., GIJZEN, H., y FERRER, Henry. *Efecto del Cianuro sobre los organismos que intervienen en la fermentación anaerobia del almidón de yuca*. En: Memorias IV Seminario – Taller Latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales. 1996.

BOLAÑOS, Carolina y ARIAS, Carlos A. *Evaluación de un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca usando cáscara de coco como medio de soporte*. Universidad del Valle, 2001.

BROCK; *Biología de los microorganismos*, 8ª edición. Michael T Madigan, John M Martinko, Jack Parker.

CIAT, CIRAD-SAR, Fundación Carvajal, Corpotunía, CETEC y UNIVALLE. *La Industria del Almidón en el Departamento del Cauca, Colombia*. CIAT : Cali, Colombia 1995.

CAMPOS P, FLOTATS,I X, BONMATÍ I A. *Biogas y aprovechamiento de la biomasa*. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl de la Universitat de Lleida. Grupo Laboratori d'Enginyeria Ambiental, 2000.

CAMPOS José Roberto. *Consideraciones de proyecto y operación de filtros anaerobios para tratamiento de efluentes liquidos industriales*; Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de Sao Carlos, Universidad de Sao Paulo – Brasil – EESC/USP. Taller Regional y conferencia sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales en América Latina, Ciudad de Mexico Noviembre/1990.

CARDOZO, A. *Influencia de la adición de* $fecl_3$ *sobre el mejoramiento de la calidad de un lodo anaerobio floculento para el arranque de un reactor UASB*. Universidad del Valle, 2002.

CARVALHO Henriques de, Eraldo y JURANDYR Povinelli. Filtros biologicos anaerobios: revisao de literatura, projeto e desenvolvimento, Escola de Engenharia de Sao Carlos – Universidad de Sao Paulo (EESC-USP), 1996.

CARRIZOSA. UMAÑA Julio. *La política ambiental en Colombia*, Desarrollo Sostenible y Democratización. 1998

CASTRILLON, L.M Y CASTRILLON, M.E. *Factibilidad de depuración de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca utilizando un reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos*. Universidad del Valle, 1994.

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT). *Situación actual del cultivo de la yuca en el norte del departamento del Cauca y sur del departamento del Valle del Cauca*. Diagnostico, 2002.

CORDOBA, A Y SALAS, D. *Tratamiento de las aguas residuales de la pequeña industria de extracción de almidón de yuca utilizando un biofiltro anaerobio con lecho de paja*. Universidad del Valle. 1996.

Corporación Colombiana Internacional *CCI: SIM. Perfil de Producto.* No. 6. Octubre -diciembre 1999. Boletín.

Corporación regional del Cauca *Evaluación de calidad del recurso disponible en el departamento de Cauca*. 2003

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. *Reactores Anaerobios Vol. 5: Princípios do Tratamento Biológico de Aguas Residuárias*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997.

DIAS Lopes Deize, CAMPOS José Roberto *Efecto del n-amoniacal en la actividad metanogénica específica durante la degradación de glucosa.* Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos – USP. São Carlos - São Paulo – Brasil.

ECTA – Engenharia, Consultoría e Tecnología das Aguas S.C. Ltda. Diversos Projetos de Sistemas de Tratamento de Efluentes Industriais (Arquivo). Sao Carlos, SP, Brasil.

FIELD, J. *"Medición Parámetros"*. En: Curso sobre Arranque y Operación de Flujo Ascendente con Manto de Lodos–UASB–(1987: Cali). Memorias del Curso. Santiago de Cali, 1987. Curso Desarrollado Dentro del Marco entre la Universidad del Valle, Corporación Autonóma Regional del Cauca (CVC), Universidad Wageningen (Holanda).

FORESTI E, FLORENCIO L, VAN HAANDEL A . *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*, PROSAB. Capitulo 2. 1999.

GOMEZ, Andres; CAICEDO, Mercedes. *Arranque de un filtro anaerobio de flujo horizontal con estopa de coco como medio de soporte para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción de yuca.* Programa académico de ingeniería sanitaria. Universidad del valle, 2004.

GONZALES, Jairo y SANTANDER, Claudia. *Factibilidad de depuración de los efluentes generados en el proceso de extracción de almidón de yuca por medio de un reactor anaerobio de flujo horizontal con medio de soporte de bambú*. Universidad del Valle, 1996.

HENZE, M. (1995). *Basic biological processes.* Capítulo del libro: Wastewater treatment, biological and chemical processes. Spring-Verlag.

JESUITAS, E.P. an Investigation of tapioca mastes. Asian Institute of Technology. Bangkok – Thailand 1996. citado por OBANDO G, y REYES, A. en: Características hidrodinámicas de medios de soporte y estudios de filtración con paja de monte en reactores transfiltro. Cali 1996.

MANRIQUE, Javier. *Evaluación del desempeño de dos biodigestores en el tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca*. Universidad del Valle, 1999

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. *La Economía de la Yuca en Colombia*. Santafé de Bogotá, Diciembre de 1998.

OLINTO Monteggia Luiz, BEAL Lademir Luis, de LUCA Sérgio João. *Requerimento de alcalinidade em processos biológicos anaeróbios.* Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre - RS – Brasil.

OSPINA, B. *Manual de Construcción y Operación de una planta de secado natural de yuca. Centro Internacional de Agricultura tropical*. Colombia. 1984.

PEREZ V., y CAJIGAS C. *Corrección de pH en reactores anaerobios tratamdo aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca*. Universidad del Valle. Cali, 2002.

PÉREZ A, CAJIGAS A, TORRES P, RODRÍGUEZ J. *El pH en residuos de almidón de yuca*. Revista ACODAL Nº 196, pag 42-50.

PESCOD, M. y TAN, N. *Characteristics and treatment of tapioca starch industry wasteswaters*. Asian Institute of Technology. Bangkok – Thailand 1996. citado por OBANDO G Y REYES A, pag 13.

RADDATZ, E. *New technologies for reforestation*. Pamphlet of Corpocuencas Conference. Cali, Colombia.1997.

RIVIER m, moreno m, ALARCON f, Ruiz r, DUFOUR d. *Almidón agrio de yuca en Colombia*. Tomo 2. CIAT, CIRAD. 2001.

RODRÍGUEZ Jenny Alexandra V. Msc.; TORRES L Patricia. PhD. *Experiencias en el tratamiento anaerobio de residuos agroindustriales – caso producción almidón agrio de yuca*. Área Académica de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Facultad de Ingeniería Universidad del Valle.

ROJAS, O. "*Procesos agroindustriales, origen de los desechos y opciones del tratamiento*" Edit. Redar. Santafé de Bogotá. 1992.

ROJAS, O. *Evaluación del comportamiento de tres sistemas de tratamiento anaerobio para la depuración de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca*. Universidad del valle, 1999.

ROJAS, O. "Relación alcalinidad – Acidos grasos volátiles". En: Curso sobre Arranque y Operación de Flujo Ascendente con Manto de Lodos–UASB–(1987: Cali). Memorias del Curso. Santiago de Cali 1 de., 1987. Capitulo A: MIcrobiológiaCurso Desrrollado Dentro del Marco entre la Universidad del Valle, Corporación Autonóma Regional del Cauca (CVC), Universidad Wageningen (Holanda).

SPEECE, R.E. Anaerobic *Biotechnology For Industrial Wastewaters*. Vanderbilt University. Archae Press. p. 199-201. 1996.

SPEECE, R. E. *Nutrient Requeriments.* Capítulo del libro: Anaerobic digestion of biomass, ed. Chynoweth y Isaacson. Elsevier applied science. 1987.

SPEECE, R. E. *Anaerobic Biotechnology, for industrial wastewater,* Vanderbilt University, 1996.

TOSIN, G. M y BRANCO, P, M. *Tratamento anaerobio de bohiíto de mandioca por filtro fixo: controle da poluicao, mejo ambiente e ecología.* XII congreso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental. 1983. citado por: OBANDO G, y REYES, A. pag 13.

UNIVERSIDAD DEL VALLE, C.V.C, Universidad Agrícola de Wageningen, *Manual del Curso Arranque y Operación de Sistemas de Flujo Ascendente con Manto de Lodo-UASB*.1987.

VALENCIA MARVIN , VARGAS HAROLD. *Desempeño de un filtro anaerobio de flujo horizontal con guadua como medio de soporte en la depuración de los efluentes del proceso de extracción de almidon de yuca.* 2004.

ZEGERS, F. *"Microbiología"*. En: Curso sobre Arranque y Operación de Flujo Ascendente con Manto de Lodos–UASB–(1987: Cali). Memorias del Curso. Santiago de Cali 1 de., 1987. Capitulo A: MIcrobiológiaCurso Desrrollado Dentro del Marco entre la Universidad del Valle, Corporación Autonóma Regional del Cauca (CVC), Universidad Wageningen (Holanda).

http://taninos.tripod.com/yuca.htm
ALNICOLSA del Perú S.A.C, 2004

http://www.terravista.pt/enseada/5002/inorganica/niquel/svivos.htm.
Costa Pedro e Sousa Pedro, finalistas da Licenciatura em Química da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa 98/99.
O Níquel em Sistemas Vivos.
Visitado el 24/02/2004

Elena Campos Pozuelo ecampos@macs.udl.es

www.udl.es/usuaris/r5213847/titol_sup.html - 1k
Elena Campos. Página personal.
El proceso de digestión anaerobia.
Visitado 7/3/2002.

http://www.udl.es/usuaris/r5213847/
Elena Campos.
Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Universitat de Lleida. Cataluña España.
Nutrientes, Ph y AGV

http://www.fao.org/docrep/t0541e/T0541E06.htm#The%20effects%20of%20environaental%20fact%20ors%20on%20anaerobic%20digestion
The effects of environmental fact ors on anaerobic digestion
F.A.O.

www.ciat.cgiar.org/agroempresas/pdf/ caracterizacion_%20rallanderias.pdf
Gottret Maria Verónica, Dofour Dominique, Guy Henry.
Caracterización de la agroindustria de procesamiento de almidón agrio en el departamento del Cauca, Colombia.

Leonardo Aponte
laponter@yahoo.com

http://www. montegia@if.ufrgs.br.
Luiz Olinto Monteggia
Proposta de metodologia para avaliação do
parâmetro "atividade metanogênica específica"
ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 19o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

Mercedes Caicedo
Caicedom@hotmail.com

www.presidencia.gov.co/decretoslinea/ 2003/octubre/30/dec3100301003.pdf
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Decreto 1594/84 y Decreto 3100/2003, Resolución 372 de 1998.

http://www.geocities.com/roberto_raul/nutricion.html
Nutrición Bacterial.
Visitado 30/01/2004

http://www.udl.es/usuaris/r5213847/nutrientes/nutrientes.html
www.science.oas.org/Simbio/mbio_ind/cap4_mi.pdf.

Oficina de Ciencia y Tecnología. Simbiosis - sistema multinacional de información especializada en biotecnología y tecnología de alimentos para América Latina y el caribe.
Capitulo 4: Medios de Fermentación.

http://www.fing.edu.uy/imfia/ambiental/raectores_anaerobios.ppt.
Oscar J Maggiolo.
Instituto de Mecánica de los fluidos e Ingenieria Ambiental IMFIA. Universidad de la Republica. Montevideo Uruguay, 2002).
Reactores anaerobios.

www.sian.info.ve/porcinos/publicaciones/rccpn/rev62/RCPP62art1.htm
R. Sosa, R. Chao y J. del Río
Aspectos bioquímicos y tecnológicos del tratamiento de residuales agrícolas con producción de biogás.
Instituto de Investigaciones Porcinas; Gaveta Postal 1 Punta Brava 19200, C. de la Habana, Cuba.

www.csetweb.me.iastate.edu/biorenew/BRT%20501%20Handouts/Anaerobic%20Digestion.ppt
Sung Shihwu, Ph.D., PE. Anaerobic Waste Treatment
Digestión anaerobia.

www.aprcp.org/roundtables/4th/papers/Titiresmi&Mulyanto_W13.pdf,
Titiresmi y Mulyanto. Asia pacific rountable for cleaner production
Implementation of anaerobic process on wastewater from tapioca starch industries.
Visitado 22/02/2004.

http://jaibana.udea.edu.co/grupos/revista/nro027/articulos.htm#2
Revista Facultad de Ingeniería Nro_ 27
Universidad de Antioquia.

http://www.macs.udl.es/lea
Universitat de Lleida
Laboratorio de Ingeniería Ambiental

http://www.*helioimbimbo@sabesp*.com.br
Victorino Imbimbo Hélio Rubens (*).Harumi Kakinami Sueli
Avaliação de toxicidade de efluente industrial em biodigestor anaeróbio através do teste de atividade metanogênica específica.

ANEXOS

ANEXO 1. Opciones de tratamiento para aguas residuales provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca.

Existen varios procesos que pueden ser utilizados para la depuración de aguas residuales con contenido de materia orgánica, estos pueden ser físicos, químicos o biológicos. Los procesos biológicos pueden operarse en presencia o ausencia de oxígeno, clasificándose en sistemas aerobios o anaerobios.

Las configuraciones de los reactores tienen por base primaria las *características hidráulicas* (*flujo y mezcla*) en su interior, para promover la mezcla adecuada que proporcione un contacto desecho – biomasa apropiada.

Los reactores básicos, en función de las características hidráulicas, pueden ser clasificados conforme al Cuadro:

Tipos básicos de reactores en función de la hidráulica.

Tipo de reactor	Flujo	Mezcla	Características
Batch	Discontinuo	Completa	Reactor prellenado con desecho al inicio y desocupado al final del tratamiento, se repite esta operación con una nuevo batch. El contenido del reactor es mezclado completamente, permitiendo un buen contacto desecho – biomasa
Pistón o tubular	Continuo	Tubular	El desecho entra y pasa por el medio de un tanque largo y estrecho, con las partículas saliendo con la misma secuencia de entrada. No ocurre mezcla longitudinal y con poca o ninguna dispersión transversal. Las concentraciones de los constituyentes en los desechos disminuyen de la entrada a la salida del tanque longitudinal.
Mezcla completa	Continuo	Completa	Tanto lodo o desecho entran al reactor, las partículas líquidas son inmediatamente dispersadas en el interior, ocurriendo una mezcla completa (homogenización). Las concentraciones son prácticamente iguales en todo el reactor, las mismas del efluente.
Arbitrario	Continuo	Mixta	Características intermediarias entre el reactor tubular y el reactor de mezcla completa. En la práctica, no hay reactores de mezcla completa o tubular, pero si una aproximación a cada uno.

Fuente: Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo, 1999

En América Latina los procesos biotecnológicos mas usados son los lodos activados, sin embargo los procesos de digestión anaerobia de la materia orgánica presentan algunas ventajas en relación con los que utilizan oxígeno, estas ventajas se refieren a la baja producción de lodos, bajos requerimientos de energía y menos infraestructura, adicionalmente se produce metano, el cual puede ser recuperado y utilizado como alternativa energética[146].

La aplicación de reactores anaerobios como principal unidad de tratamiento tiene inicio en la década de 1980, principalmente en Holanda, Brasil, Colombia,

[146] Rojas, O, 1999. Op, cit.

India y México. Es interesante notar que la mayor parte de los países interesados en la aplicación de procesos anaerobios, con excepción de Holanda, son países en desarrollo en los cuales las condiciones climáticas son favorables para la operación de reactores a temperatura ambiente.

Dadas las características de las aguas residuales provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca y las diversas limitantes económicas, sociales y de terreno que presentan las pequeñas industrias productoras de almidón, las ventajas del Tratamiento Anaerobio, hacen de este un método más apropiado para el tratamiento de este tipo de efluente.

Reactores Anaerobios de Alta Tasa

Los reactores anaerobios de alta tasa se caracterizan primordialmente por mantener grandes cantidades de biomasa (flora microbiana) activa dentro del sistema, independiente del flujo del agua residual, lo cual les permite operar con bajos Tiempos de Retención Hidráulicos (TRH) y elevados Tiempos de Retención de Sólidos (TRS)[147].

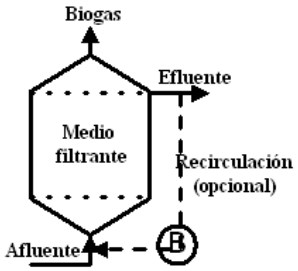
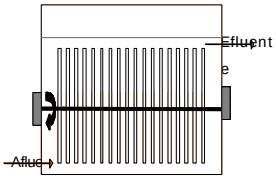
Los reactores de alta tasa se clasifican según el mecanismo de retención de lodos que utilizan[148], en:

- Reactores *con crecimiento adherido*, en donde las bacterias se adhieren dentro del reactor, a un medio de soporte formado por material inerte como arena, piedra y plástico entre otros.

- Reactores *con crecimiento disperso*, en estos los microorganismos se adhieren y agregan unos a otros formando flocs o gránulos con suficiente densidad, para mantenerse suspendidos en el reactor debido a las condiciones hidráulicas y minimizar el arrastre de lodos. La descripción de los diferentes reactores de alta tasa se muestra en el siguiente Cuadro

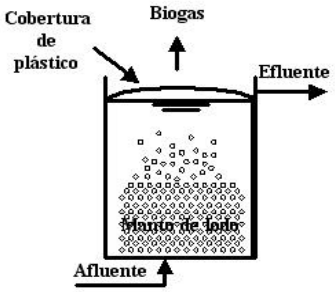
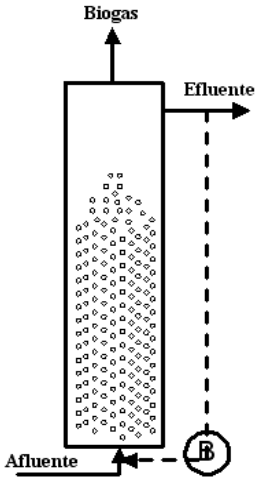
[147] Rojas, O, 1999. Op, cit y Perez y Cajigas, Op. cit.
[148] Maggiolo, O. Reactores anaerobios, 2002.

Cuadro. Descripción de los sistemas de alta tasa

Sistemas de alta tasa	Tipo de Reactor	Descripción
Biomasa adherida	 **Filtro anaerobio ascendente**	- Los microorganismos son retenidos en el interior del reactor, mediante su adosamiento a un soporte. - Se forma la biopelícula y el atrapamiento de flóculos bacterianos entre los intersticios del material que rellena el reactor, gracias al flujo líquido que pasa por estos. (Contacto afluente – biomasa) - El flujo puede ser ascendente, descendente, de lecho ordenado o desordenado y con o sin recirculación del efluente.
	 **Lecho rotatorio**	- Consiste en una serie de discos instalados en forma centrada y paralela, sobre un eje giratorio accionado por un motor externo. - La biomasa se adhiere a los discos de material poroso que se mantienen sumergidos y el reactor es cerrado - Velocidad de rotación: debe permitir la adherencia de biomasa en los discos y el desprendimiento del exceso de biomasa retenida en los mismos. El líquido ingresa por un extremo inferior y sale por el extremo opuesto superior. - Se debe instalar un sedimentador secundario para la decantación de los lodos salientes.

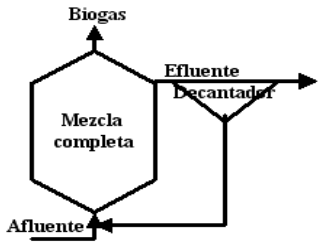
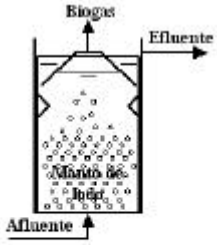
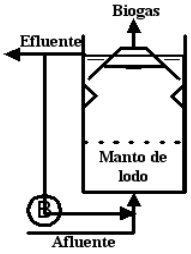
Fuente: Adaptado de Chernicharo, 1997 y Maggiolo, 2002.

Continuación del Cuadro. Descripción de los sistemas de alta tasa

Sistemas de alta tasa	Tipo de Reactor	Descripción
Biomasa adherida	 Reactor anaerobio de lecho fluidizado  Lecho expandido	- El reactor contiene un manto de material inerte que se mantiene expandido por la velocidad ascensional del líquido, al que se adhieren los microorganismos. - La diferencia entre ambos reactores está en el grado de expansión del manto de lodo - Lecho expandido: 10-20% - Lecho fluidificado: > 30% - La expansión del lecho mejora el contacto afluente-biomasa y evita problemas de obstrucciones - En la parte superior de la unidad se ubica un sedimentador que evita la salida de partículas de lodo con el efluente.

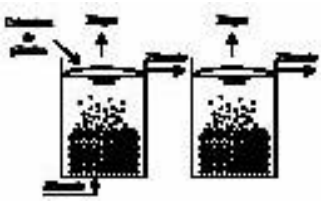
Fuente: Adaptado de Chernicharo, 1997 y Maggiolo, 2002.

Continuación del Cuadro. Descripción de los sistemas de alta tasa

Sistemas de alta tasa	Tipo de Reactor	Descripción
Biomasa dispersa	 **Proceso de contacto**	- Conceptualmente equivale al proceso de lodos activados, por lo que después del digestor anaerobio agitado se ubica un sedimentador externo y recirculación de lodos. - Requiere menor volumen que un digestor anaerobio convencional, pero su parte crítica es el sistema de separación sólido –líquido, ya que los lodos anaerobios pueden flotar fácilmente, debido a la producción continua del biogás en el sedimentador.
	 **Reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos UASB**	- La inmovilización de microorganismos ocurre por auto adensamiento. Formando flocs dispuestos en camadas de lodo en el fondo del reactor - El flujo es ascendente y pasa a través del lecho de lodo denso. - La estabilización de la MO ocurre en todas las zonas del reactor. - En la parte superior se ubica un sedimentador para evitar la salida de partículas de lodo con el efluente. - Debajo del sedimentador existe un dispositivo de separación de los gases.
	 **Lecho de lodo granular expandido**	- La necesidad de aplicar temperaturas inferiores a las óptimas en los sistemas UASB, hace que surja el sistema EGSB. - Las modificaciones se orientaron hacia la optimización del contacto afluente – biomasa y se basaron en las características del lodo granular obtenido en los reactores UASB, que por sus condiciones permite aplicar en el reactor altas velocidades ascensionales que facilitan la expansión del lecho.

Fuente: Adaptado de Chernicharo, 1997 y Maggiolo, 2002.

Continuación del Cuadro. Descripción de los sistemas de alta tasa

Sistemas de alta tasa	Tipo de Reactor	Descripción
Biomasa dispersa	 **Dos fases**	- Se caracterizan por una separación física de las etapas de Hidrólisis y Acidogénesis que se realizan en el llamado Reactor Hidrolítico y de las fases Acetogénesis y Metanogénesis realizadas en el Reactor Metanogénico.

Fuente: Adaptado de Chernicharo, 1997 y Maggiolo, 2002.

Las investigaciones de sistemas anaerobios para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, hasta ahora habían sido abordadas a escala piloto. En la actualidad se realizan algunos estudios de los cuales hace parte esta investigación para la evaluación de los parámetros de control del sistema de filtro anaerobio, razón por la cual este, ha sido implementado a escala real en algunas de las rallanderías de la región norte del Departamento del Cauca, dado que por sus características de construcción, operación y mantenimiento este sistema es una alternativa sostenible para el tratamiento de dichas aguas residuales.

Filtro Anaerobio

Después de las muchas investigaciones encaminadas a encontrar sistemas que permitieran manejar altas cargas orgánicas con TRH bajos, Coulter et al., en el año de 1957[149], proponen un sistema en el cual el TRS era independiente del TRH. Luego en 1969 Young y McCarty[150] retomaron la idea, estudiaron el sistema y lo introdujeron con el nombre de filtro anaerobio.

Dentro de los reactores anaerobios, los filtros se destacan por presentar una elevada seguridad operacional, además de operación y monitoreo más simples. El filtro anaerobio es básicamente una unidad de contacto con crecimiento bacteriano adherido en lecho fijo, en el cual el agua residual pasa a través de este. Además posee considerables cantidades de agregados y flocs con bacterias e incluso gránulos[151].

Estos reactores biológicos se caracterizan por tener material de relleno o medio de soporte, en cuya superficie ocurre la fijación y el desarrollo de

[149] Coulter et al, 1957., citado por Rojas, O, 1999.
[150] Young y McCarty., citado por Rojas, O, 1999.
[151] Campos J R. Consideraciones de proyecto y operación de filtros anaerobios para tratamiento de efluentes liquidos industriales, 1990.

microorganismos en forma de biopelicula y en cuyos intersticios también pueden proliferar microorganismos en forma de gránulos o flocs, En estos reactores el medio de soporte se encuentra inmóvil o fijo y completamente sumergido dependiendo del sentido del flujo dentro de los mismos; este último puede ser horizontal, mixto y vertical ascendente o descendente. El régimen hidráulico básico es tipo pistón[152].

Entre las desventajas del filtro se pueden citar, el alto costo del medio de soporte y algunos problemas operacionales, entre los cuales se debe resaltar la colmatación del filtro, que ocurre generalmente cuando a este entran concentraciones elevadas de sólidos en suspensión[153].

La configuración de los filtros anaerobios depende directamente de la carga orgánica a tratar, pues su longitud y altura varían con respecto a esta. Así para tasas de carga orgánica bajas se emplean alturas de medio de soporte de hasta 3.0 m y no menores de 2.0 m, mientras que para tasas superiores a 10 kg DBO/m^3.d, filtros mas altos pueden ser mas indicados por causa de la concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV) a lo largo de la altura del medio de soporte. En consecuencia estos sistemas presentan gran variación dimensional en diámetros y longitud, tienen de 6 a 26 m de longitud, alturas de 3 hasta 13 m, volúmenes de 100 a 10.000 m^3 y profundidad de lodo proyectada de tal forma que ocupe del 50 al 70% de la altura total del reactor[154]. Sin embargo, el medio de soporte utilizado en el filtro puede ser determinante en el momento de su dimensionamiento.

Diferentes tipos de medio de soporte han sido estudiados, tales como piedras quebradas, bambú, elementos cerámicos y en madera[155]. El surgimiento de los materiales plásticos como esferas perforadas, cilindros gastados y bloques modulares, promovió la revolución de los filtros anaerobios debido a las altas eficiencias de remoción obtenidas con este medio de soporte, ya que por su gran porosidad permite acumular mayor cantidad de sólidos y reduce la formación de zonas muertas además de ser mas leve y fácil de transportar; aún así para los países de América Latina, el empleo de material plástico es limitado, debido a su elevado costo en comparación con los otros medios de soporte[156].

El material de soporte tiene como finalidad:

- Actuar como un dispositivo para separar los sólidos de los gases, proporcionando zonas de sedimentación.
- Promover el flujo uniforme dentro del reactor.
- Mejorar el contacto afluente – biomasa.

---

[152] Carvalho H y Jurandyr P. Filtros biologicos anaerobios: revisao de literatura, projeto e desenvolvimento, Escola de Engenharia de Sao Carlos – Universidad de Sao Paulo (EESC-USP), 1996.
[153] Perez y Cajigas, 2002. Op, cit.
[154] Carvalho H y Jurandyr P. Op, cit.
[155] Ibid.

[156] Campos J R, 1990. Op, cit.

- Permitir la acumulación de la biomasa y por ende un incremento en el TRS.
- Evitar el arrastre de sólidos con el efluente.

Cabe anotar que además de los factores operacionales, los costos y la disponibilidad local son decisivos en la escogencia del medio de soporte. Este tiene gran influencia en la colonización bacterial de los filtros anaerobios, la cual a su vez, de ser apropiada garantizara el correcto desarrollo de cada etapa de la Digestión Anaerobia.

ANEXO 2. Base de Cálculo usada para el análisis Costo – Beneficio de la dosificación de micronutrientes al sistema de tratamiento a escala real.

DOSIFICACION DE µ-NUTRIENTES EN PROCESOS ANAEROBIOS

1) Cálculo de la cantidad de material celular expresado como SST

DQO Afluente (gr/L)		3,5
DQO biodegradable (gr/L)	70%	2,46
DQO biodegradable transformada en biomasa (g/L)	20%	0,492
Cantidad de material celular expresado como SST (g/L)		0,402

2) Requerimientos de µ-nutrientes para síntesis celular

Fe (mg /kg SST)	1800
Ni (mg /kg SST)	180
Co (mg /kg SST)	180

3) Cálculo de la cantidad de reactivos que se debe adicionar

	Condición
Flujo Filtro (L/s)	0,47
Tiempo de alimentación (h/d)	10,05
Flujo de agua residual (m3/d)	17,0

Fe (mg/L)		3,000				
FeCl3 - 99,6 % (mg/ L)		14,514				
		g/d	**FS (%)**	**g/d**	**Costo/dia**	**Costo/mes**
	Condición 1:	246,8	10%	271	$608	$18.244
Dosis de FeCl3 requerida:						

Ni (mg/L)		0,500				
NiCl2.6H2O - 97,2 % (mg/L)		2,025				
		g/d	**FS (%)**	**g/d**	**Costo/dia**	**Costo/mes**
	Condición 1:	34,4292	10%	38	$879	$26.359
Dosis de NiCl2.6H2O requerida:						

COSTOS DE PRODUCTOS QUIMICOS:

PROVEEDOR	Producto	Present.	UN.	Vr. Tot.	Vr. Tot. + IVA	Vr. Unit.
ALQUIM (Cali)	FeCl3	25	kg	$75.000	$56.000,00	$2.240
GMP Productos quìmicos	NiCl2	25	kg	$500.000	$580.000	$23.200

ANEXO 3. Registro Fotográfico.

Foto 5. Montaje usado para evaluación de AME.

Rallandería Piedras Negras

Fuente: Caicedo y Gómez. 2004.

Foto 6. Planta física Rallandería Piedras Negras.

Fuente: Caicedo y Gómez. 2004.

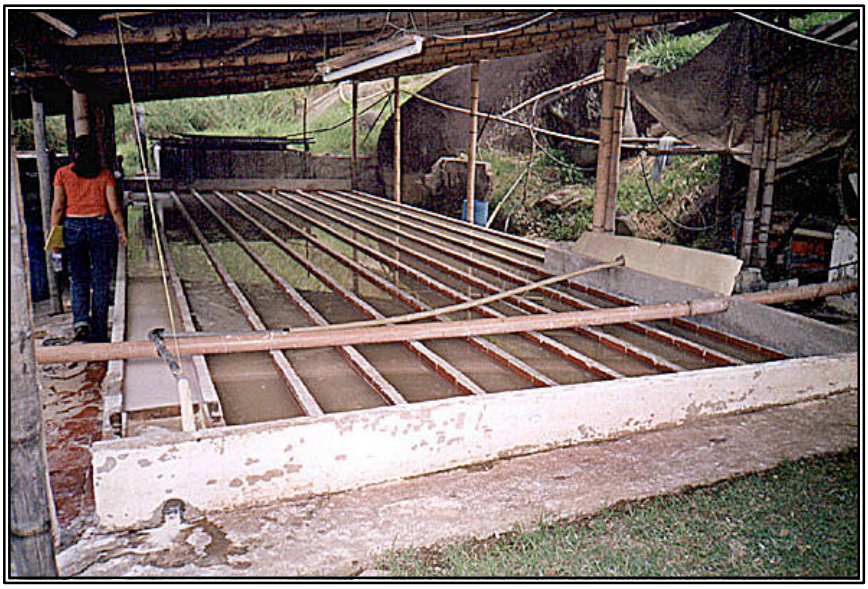
Foto 7. Lavado y troceado de yuca.

Fuente: Caicedo y Gómez. 2004.

Foto 8. Lavado y troceado de yuca.

Fuente: Caicedo y Gómez. 2004.

Foto 9. Ralladores de yuca.



Fuente: Caicedo y Gómez. 2004.

Foto 10. Tanques para sedimentación de almidón.

Fuente: Caicedo y Gómez. 2004.

Foto 11. Lechos de secado de almidón.

Fuente: Caicedo y Gómez. 2004.

Foto 12. Tanque de homogenización de agua residual.

Fuente: Caicedo y Gómez. 2004.

Foto 13. Tanque para la dosificación de Cal.