

**EVALUACIÓN DE INÓCULOS PARA TRATAMIENTO ANAERÓBICO DEL  
EFLUENTE DE UN SEDIMENTADOR DE ALMIDON DE YUCA**



**VIVIANA SALAZAR MOLINA  
ADRIANA LORENA SÁNCHEZ VERGARA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, GIIA  
POPAYÁN  
2007**

**EVALUACIÓN DE INÓCULOS PARA TRATAMIENTO ANAERÓBICO DEL  
EFLUENTE DEL SEDIMENTADOR DE ALMIDON DE YUCA**

**Trabajo de grado en Investigación presentado como requisito parcial para  
optar al título de Ingeniería Ambiental**

**VIVIANA SALAZAR MOLINA  
ADRIANA LORENA SÁNCHEZ VERGARA**

**Director  
CARLOS CÉSAR CABEZAS CÓRDOBA  
Ingeniero Químico, M. Sc.**

**Codirectora  
NEYLA BENITEZ C.  
Microbióloga, M. Sc.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL, GIA  
POPAYÁN  
2007**



## RESUMEN

Este trabajo se realizó para ampliar el conocimiento sobre el tratamiento biológico y brindar soluciones al problema de contaminación generado por el proceso de extracción de almidón agrio de yuca en el departamento del Cauca.

Dado que el objetivo principal de este trabajo es la evaluación de inóculos para reducir la carga contaminante presente en el efluente principal del proceso de extracción del almidón agrio de yuca por medio de un proceso anaeróbico, se realizaron los respectivos ensayos de biodegradabilidad con los cuales se seleccionó un inóculo compuesto por el Estiércol proveniente de cerdos alimentados con mancha y el Efluente de un Biodigestor que opera con agua residual de un sedimentador de almidón de yuca en una proporción volumétrica 75/25 respectivamente, con este inóculo se desarrolló una microflora capaz de modificar las características de sedimentabilidad del sólido en esta agua residual, permitiendo disminuir la carga contaminante.

El inóculo seleccionado está compuesto por microorganismos como coliformes, mesófilos, mohos y levaduras, los cuales son encargados de llevar a cabo el proceso de digestión anaeróbica, permitiendo de esta forma alcanzar una buena eficiencia de remoción en el sistema.



## DEDICATORIA

A Dios por la oportunidad que he tenido de aprender, mejorar y de crecer junto a personas tan especiales para mí.

A mis padres y hermanos por brindarme un hogar cálido y enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr objetivos.

A mis amigos por su continuo y afectuoso aliento.

### VIVIANA SALAZAR MOLINA

A mis padres, hermanos y demás familiares quienes me infundieron la ética y el rigor que guían mi transitar por la vida.

A mis abuelos por su paciencia y por enseñarme a enfrentar los obstáculos con alegría.

A mi esposo por su cariño, comprensión y constante estímulo.

A mis amigos por acompañarme en todos los momentos importantes.

### ADRIANA SANCHEZ VERGARA

A todos y cada uno de los profesores del departamento de Ingeniería Ambiental, en especial al ingeniero Carlos César Cabezas por brindarnos las herramientas para pensar y ejercer el pensamiento.



## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma Presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Popayán, Agosto 8 de 2007**



## TABLA CONTENIDO

	Página
RESUMEN .....	III
DEDICATORIA.....	III
NOTA DE ACEPTACIÓN.....	V
TABLA CONTENIDO.....	VI
Capítulo	
1 INTRODUCCIÓN .....	14
1.1 OBJETIVO .....	14
1.2 DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA .....	15
1.3 BOSQUEJO DE LA TESIS.....	15
2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DEL SEDIMENTADOR Y DISEÑO DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES .....	17
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE.....	17



<b>2.2</b>	<b>DISEÑO DE UNIDADES EXPERIMENTALES.....</b>	<b>20</b>
2.2.1	Características del Reactor Anaeróbico .....	20
2.2.2	Preparación de los Inóculos.....	21
2.2.3	Pruebas preliminares.....	22
2.2.4	Metodología para el análisis de los datos experimentales .....	23
<b>3</b>	<b>EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNIDADES ANAERÓBICAS.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN CADA REACTOR.....</b>	<b>26</b>
3.1.1	Reactor 1.....	31
3.1.2	Reactor 2.....	34
3.1.3	Reactor 3.....	36
3.1.4	Reactor 4.....	36
3.1.5	Mediciones de cianuro.....	39
<b>3.2</b>	<b>ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS REACTORES.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>SELECCIÓN DEL REACTOR CON MEJOR DESEMPEÑO .....</b>	<b>41</b>
<b>3.4</b>	<b>CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL REACTOR SELECCIONADO.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>COLIFORMES TOTALES Y FECALES .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>MOHOS Y LEVADURAS.....</b>	<b>47</b>



4.3	BACTERIAS HETEROTRÓFICAS O MESÓFILOS .....	48
4.4	CONCLUSIONES DEL CAPITULO .....	53
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	54
5.1	CONCLUSIONES.....	54
5.2	RECOMENDACIONES.....	54





## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros medidos en el transcurso del estudio.....	18
Tabla 2. Caracterización inicial del sustrato en cada una de las corridas .....	19
Tabla 3. Composición volumétrica de los inóculos utilizados en cada uno de los reactores.....	21
Tabla 4. Resultados de prueba piloto 1 .....	22
Tabla 5. Resultados de prueba piloto 2 .....	23
Tabla 6. Datos medios obtenidos para la Demanda Bioquímica de Oxígeno	26
Tabla 7. Datos medios obtenidos para Potencial de Hidrógeno, pH .....	27
Tabla 8. Datos medios obtenidos para la Demanda Química de Oxígeno .....	28
Tabla 9. Datos medios obtenidos para los Sólidos Suspendedos Volátiles.....	29
Tabla 10. Datos medios obtenidos para los Ácidos Grasos Volátiles.....	30
Tabla 11. Resultados prueba de hipótesis entre reactores parámetro DBO <sub>5</sub>	40
Tabla 12. Resultados prueba de hipótesis entre reactores parámetro DQO	40
Tabla 13. Resultados prueba de hipótesis entre reactores parámetro AGV..	40
Tabla 14. Prueba de hipótesis entre reactores parámetro SSV .....	41
Tabla 15. Resultados de coliformes totales y fecales.....	46
Tabla 16. Resultados para mohos y levaduras .....	47
Tabla 17. Resultados para bacterias heterotróficas en UFC/ml .....	48
Tabla 18. Características morfológicas de las colonias más representativas	50
Tabla 19. Datos obtenidos para Potencial de Hidrógeno, pH.....	62
Tabla 20. Datos obtenidos para la Demanda Bioquímica de Oxígeno .....	63



Tabla 21. Datos obtenidos para la Demanda Química de Oxígeno.....	64
Tabla 22. Datos obtenidos para los Sólidos Suspendidos Volátiles .....	65
Tabla 23. Datos obtenidos para los $DQO_{sv}$ .....	66
Tabla 24. Datos obtenidos para los Ácidos Grasos Volátiles (mg HAc/l) .....	67
Tabla 25. Datos obtenidos para Cianuro .....	67
Tabla 26. Datos obtenidos para Temperatura .....	68
Tabla 27. Datos obtenidos para la ST .....	69
Tabla 28. Datos obtenidos para la SV .....	70
Tabla 29. Resultados para la Demanda Química de Oxígeno en la corrida final.....	70



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica de las rallanderías en La Agustina.....	16
Figura 2. Diagrama de Flujo para el proceso de extracción de almidón agrio de yuca.....	17
Figura 3. Diagrama del reactor experimental. ....	20
Figura 4. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos durante las corridas experimentales en el reactor 1: (A) DQO total (B) DBO <sub>5</sub> (C) SV (D) Porcentajes de remoción medias .....	32
Figura 5. Comportamiento medio de temperatura para los diferentes inóculos .....	33
Figura 6. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos durante las corridas experimentales en el reactor 2: (A) DQO total (B) DBO <sub>5</sub> (C) SV (D) Porcentajes de remoción medias .....	35
Figura 7. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos durante las corridas experimentales en el reactor 3: (A) DQO total (B) DBO <sub>5</sub> (C) SV (D) Porcentajes de remoción medias .....	37
Figura 8. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos durante las corridas experimentales en el reactor 4: (A) DQO total (B) DBO <sub>5</sub> (C) SV (D) Porcentajes de remoción medias .....	37
Figura 9. Comportamiento medio de CN <sup>-</sup> para los diferentes inóculos.....	39



Figura 10. DBO<sub>5</sub> media durante el tiempo de corrida en los cuatro reactores .....42

Figura 11. Comparación de la DQO media en cada reactor a través del tiempo.....42

Figura 12. Comparación del factor medio de biodegradabilidad del remanente en todos los reactores .....43

Figura 12. Resultado de DQO para corrida final con el reactor 3.....43

Figura 13. Diluciones seriadas .....46

Figura 14. Mohos y levaduras .....48

Figura 15. Variación de la DQO en la prueba piloto 1 .....60

Figura 16. Variación de la DQO en la prueba piloto 2 .....61

Figura 17. Comportamiento de los AGV: (A) Reactor 1, (B) Reactor 2, (C) Reactor 3, (D) Reactor 4 .....71

Figura 18. Comportamiento del pH: (A) Reactor 1, (B) Reactor 2, (C) Reactor 3, (D) Reactor 4.....72

Figura 19. Relación entre AGV y pH: (A) Reactor 1, (B) Reactor 2, (C) Reactor 3, (D) Reactor 4 .....73



## LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Gráficas de pruebas piloto.....	60
Apéndice 2. Datos de laboratorio .....	62
Apéndice 3. Gráficas de AGV y pH para los reactores 1 a 4.....	71
Apéndice 4. Métodos de análisis fisicoquímico .....	74
Apéndice 5. Métodos de análisis Microbiológico .....	77



## 1 INTRODUCCIÓN

La producción de almidón agrio de yuca en Colombia empezó en los años 50's, por medio de pequeñas fábricas a las que se denominó "rallanderías", permitiendo el desarrollo socioeconómico de las familias que habitan el norte del Departamento del Cauca principalmente [28]. En la actualidad estas agroindustrias producen alrededor de 11.000 ton/año de almidón agrio, porcentaje que representa el 80% de la producción del país [8].

El efluente del proceso de extracción de yuca de una sola rallandería, genera cargas orgánicas del orden de 36.000 g DBO<sub>5</sub>/día, equivalentes a la contribución de materia orgánica de una población de 720 habitantes [10]. De acuerdo con trabajos previos [20], se encontró que los filtros anaeróbicos empleados en algunas rallanderías para el tratamiento de este tipo de aguas, tienen remociones bajas debido a una inoculación inadecuada reflejada en el valor de los diferentes parámetros evaluados los cuales permiten constatar el mal funcionamiento de estos sistemas, que no funcionan como reactores biológicos sino como una barrera física [31].

Con la realización de este estudio se pretende ampliar el conocimiento sobre el tratamiento biológico o degradación de los contaminantes generados por la extracción de almidón de yuca en el departamento del Cauca. Para esto se llevaron a cabo estudios a escala de laboratorio donde se evaluaron diferentes tipos de inóculos, que permitirán un funcionamiento adecuado de los sistemas anaeróbicos de tratamiento y de esta manera disminuir la carga contaminante vertida a las cuencas de la región. Mejorando con ello la calidad de vida de la población que hace uso de estas.

### 1.1 OBJETIVO

El propósito del presente trabajo fue la evaluación de inóculos a través de ensayos de biodegradabilidad, para reducir la carga contaminante presente en el efluente principal del proceso de extracción del almidón agrio de yuca por medio de un proceso anaeróbico, seleccionando el que presentó el mejor comportamiento de los parámetros fisicoquímicos evaluados y efectuando las pruebas microbiológicas para establecer el grupo de microorganismos presentes.



## 1.2 DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA

Las muestras de agua residual del proceso de extracción de almidón agrario de yuca, fueron obtenidas en tres rallanderías localizadas en el Departamento del Cauca, sobre la Vía Panamericana en el sector Popayán – Cali, Municipio de Santander de Quilichao, Corregimiento de Mondomo, Vereda la Agustina. Esta se encuentra a 2° 55´ 02” latitud Norte y 76° 33´ 08” longitud oeste, en la zona occidental de Colombia. La Figura 1 presenta el plano topográfico con la ubicación exacta de las rallanderías 3, 4, y 5 las cuales participaron en el proyecto. Las coordenadas rectangulares de partida o inicio para el levantamiento topográfico fueron de: 814046 N, 11058795 W y 1379 metros de altitud. La totalidad de las muestras fueron transportadas y procesadas en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca.

## 1.3 BOSQUEJO DEL DOCUMENTO DE INVESTIGACIÓN

En el primer capítulo se presenta la introducción, los objetivos propuestos y la ubicación geográfica del estudio.

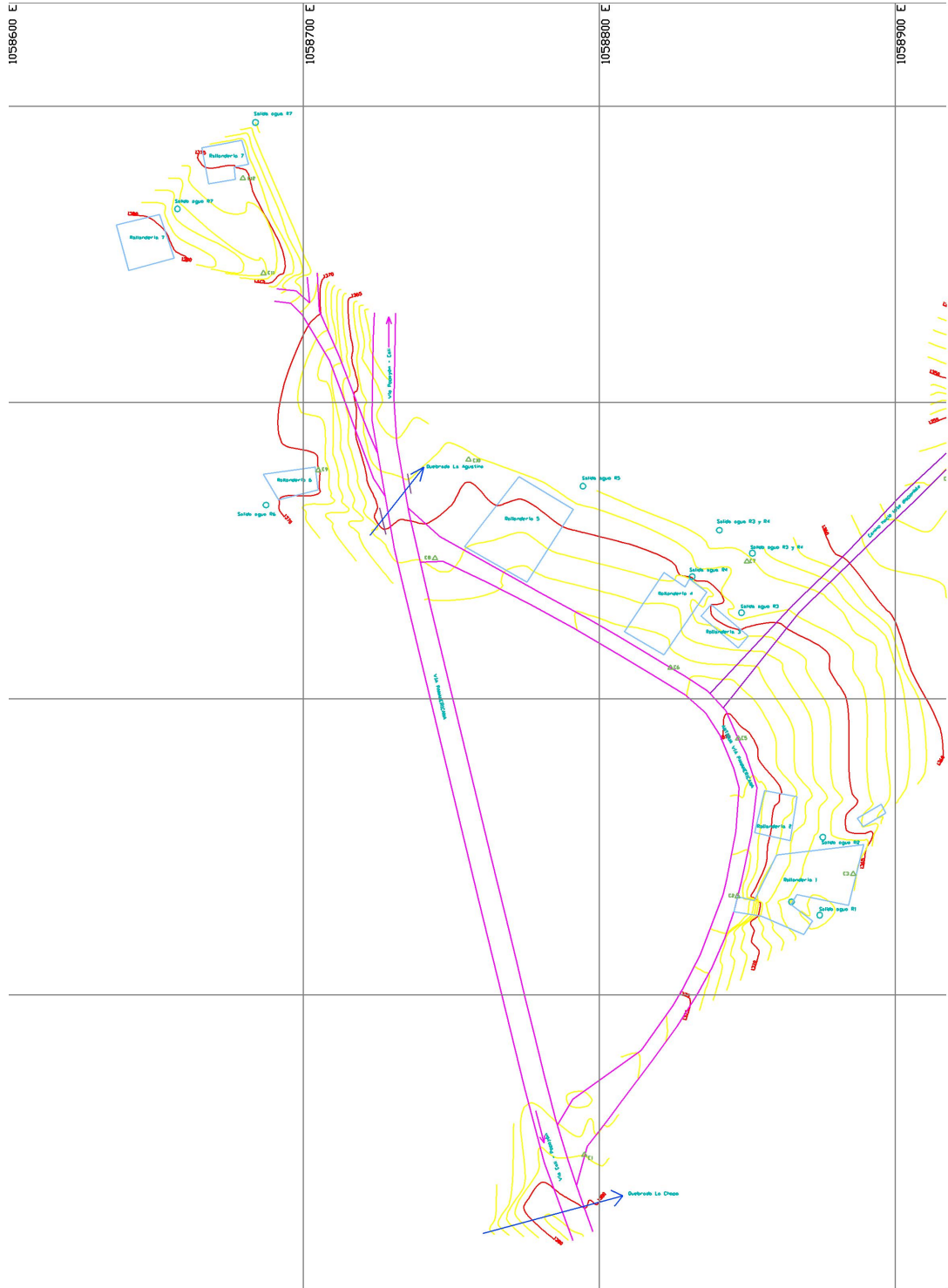
El segundo capítulo presenta una descripción del proceso de extracción de almidón, la caracterización del sustrato, el diseño de las unidades experimentales, la descripción de los inóculos, las pruebas piloto y la metodología de análisis de datos.

En el tercer capítulo se realizó el análisis del comportamiento de los cuatro reactores con respecto a los diferentes parámetros fisicoquímicos, además, se efectuó un experimento comparativo entre los reactores y la selección de la unidad con mejor desempeño.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados y análisis microbiológico realizado al efluente del reactor seleccionado en el estudio. El análisis se llevó a cabo mediante la determinación de coliformes totales y fecales, mohos, levaduras y bacterias heterotróficas.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones globales del trabajo de investigación, asimismo se proponen recomendaciones para investigaciones a futuro que se derivan de las observaciones realizadas y las experiencias obtenidas en la realización del trabajo.

Figura 1. Localización geográfica de las rallanderías en La Agustina.





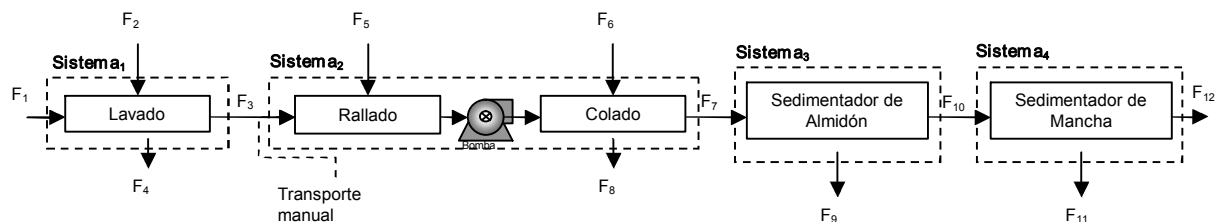
## 2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE DEL SEDIMENTADOR Y DISEÑO DE LAS UNIDADES EXPERIMENTALES

Este capítulo presenta la caracterización del efluente a ser tratado, también se define el diseño de las unidades anaeróbicas utilizado en el desarrollo del trabajo experimental y las características de los inóculos empleados en cada uno de los reactores. Se realizó un ensayo preliminar para determinar la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos. Para el análisis de los datos se realizaron pruebas estadísticas para la validez de los resultados.

### 2.1 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE

La Figura 2 presenta el diagrama de flujo para el proceso de extracción de almidón agrio de yuca. En las rallanderías donde se tomaron las muestras, se efectúa la separación de la cascarilla en el proceso de lavado (sistema<sub>1</sub>), a través del flujo  $F_4$ . La sedimentación del almidón en el flujo  $F_7$  se realiza por medio de canales (sistema<sub>3</sub>). El sistema<sub>4</sub> es un sedimentador para la recuperación de una parte de la macha, de acuerdo con Chaux y Vergara [10], la eficiencia de remoción de este sistema es sustancialmente baja, alrededor de 10,41%, razón por la cual en este trabajo se considera que el efluente a tratar es la alimentación al sedimentador de mancha, es decir el flujo  $F_{10}$  presentado en la Figura 2.

Figura 2. Diagrama de Flujo para el proceso de extracción de almidón agrio de yuca.



Fuente: Chaux y Vergara [10]

Las muestras se recolectaron a la salida del sedimentador de almidón, en recipientes plásticos de uno y dos litros de capacidad y fueron debidamente refrigeradas durante su transporte al laboratorio. Al instante de la toma a cada muestra se le registro el potencial de Hidrógeno (pH) y la temperatura. La Tabla 1 presenta un listado de los parámetros medidos durante el



transcurso del trabajo y la frecuencia con que dicha determinación fue realizada.

Tabla 1. Parámetros medidos en el transcurso del estudio.

Parámetros	Frecuencia		Método	Unidades
	Blanco	Reactores		
pH	Inicial	Diario	Medición Directa	Unidades
Temperatura	Inicial	Diario	Medición Directa	°C
DQO	Inicial	Diario	Volumétrico	mg O <sub>2</sub> /l
DBO <sub>5</sub>	Inicial	Cada 2 días	Volumétrico	mg O <sub>2</sub> /l
ST	Inicial	Cada 2 días	Gavimétrico	mg/l
SV	Inicial	Cada 2 días	Gravimétrico	mg/l
SSV	Inicial	Diario	Gravimétrico	mg/l
AGV	Inicial	Cada 2 días	Volumétrico	mg a.acético/l
CN <sup>-</sup>	Inicial	Cada 2 días	Volumétrico	mg CN <sup>-</sup> /l

Nota: para la prueba de DBO<sub>5</sub>, se tomaron muestras los días 0, 2 y 4, en donde se midió oxígeno disuelto inicial a cada una y se incubaron por 5 días, tiempo en el cual se tomó el oxígeno disuelto final para realizar los cálculos especificados en el Apéndice 1.

La caracterización realizada al efluente del sedimentador de almidón o sustrato, es presentada en la Tabla 2, donde el factor de biodegradabilidad  $f_b$  se calculó de acuerdo con la ecuación:

$$f_b = \frac{DBO_5}{0,65 \times DQO} [17] \text{ Ec. 1}$$

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 2, se tiene un factor medio de biodegradabilidad de 0.66 que lo clasifica a éste efluente en condición de biotratabilidad media, por tanto con los tratamientos biológicos como lagunas de estabilización, filtros anaeróbicos, lodos activados, filtros percoladores, biodigestores, entre otros se tendrían una eficiencia media [10]. La condición de biotratabilidad media hace necesaria la inclusión de microfauna o bacterias climatizadas para tratar el líquido en consideración.



Tabla 2. Caracterización inicial del sustrato en cada una de las corridas

Parámetro	N° Corrida				Promedio	Desviación estándar (S)	Intervalo de confianza	
	1	2	3	4			Limite superior	Limite inferior
DQO(mg O <sub>2</sub> /l)	-	4748.15	2404.05	4193.63	3781.94	1225.08	7509.47	54.42
DBO(mg O <sub>2</sub> /l)	-	980.00	1666.00	2254.00	1633.33	637.63	3217.42	49.25
Factor de biodegradabilidad, fb		0.32	1.00	0.83	0.66			
pH(Unidades)	-	4.87	4.70	5.54	5.04	0.44	6.14	3.93
AGV (mg a.acético/l)	278.02	351.18	577.98	212.17	354.84	159.23	608.01	101.66
SSV(mg/l)	-	756.00	860.00	804.50	806.83	52.04	936.12	677.55
ST(mg/l)	-	3485.00	2488.00	4002.00	3325.00	769.58	5236.89	1413.11
SV(mg/l)	-	3125.00	2182.00	3604.00	2970.33	723.51	4767.77	1172.90
SST(mg/l)	-	764.00	864.00	1215.00	947.67	236.86	1536.09	359.24
Temperatura(°C)	-	-	19.50	19.50	19.50	-	-	-
Cianuro(mg CN/l)	2.80	2.60	-	-	2.70	0.14	3.97	1.43

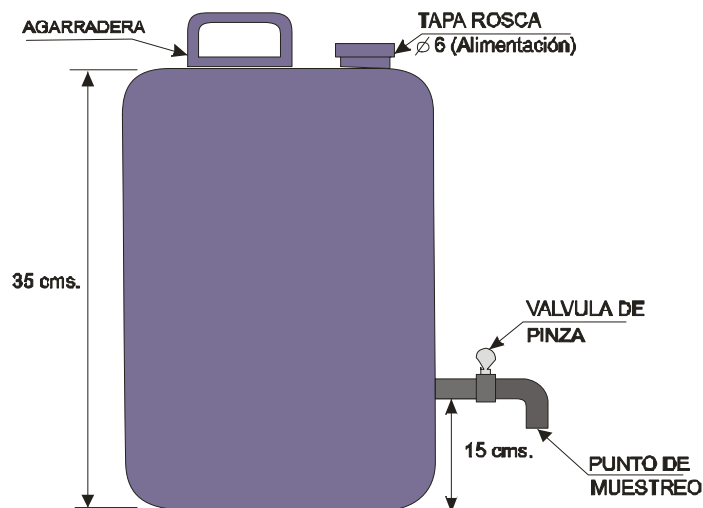
## 2.2 DISEÑO DE UNIDADES EXPERIMENTALES

En esta sección se presenta la descripción de los reactores anaeróbicos, de tipo batch, en donde se desarrollaron las unidades experimentales. Se presentan además los inóculos utilizados en cada uno de los reactores, su composición, volumen, concentraciones empleadas y preparación. Se realizó un ensayo preliminar para determinar la frecuencia del muestreo y la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos. Los datos fueron obtenidos a partir de la realización de cuatro corridas experimentales, consistentes en cuatro reactores anaeróbicos con un inóculo diferente en cada uno de ellos. Para el análisis de los datos se realizaron diferentes pruebas estadísticas, necesarias para la validez de los resultados.

### 2.2.1 Características del Reactor Anaeróbico

El trabajo se desarrolló específicamente en un reactor anaeróbico. Siguiendo un proceso batch, cuya principal característica es la ausencia de flujos, tanto de entrada como de salida. Cada una de las unidades en polipropileno rígido tiene un volumen total de 10L, y está dotada de un punto de muestreo ubicado en la parte inferior del recipiente a 15cm de altura y una entrada en la parte superior para la alimentación del sustrato, tal como puede apreciarse en la Figura 3. Ésta presenta un diagrama detallado del reactor anaeróbico a escala de laboratorio.

Figura 3. Diagrama del reactor anaeróbico a escala de laboratorio.



Fuente propia



## 2.2.2 Preparación de los Inóculos

Para el estudio de biodegradabilidad del sustrato se utilizaron como fuentes de microorganismos el estiércol de cerdo y el efluente de un biodigestor según se describe a continuación:

- **Estiércol de cerdo:** Este fue recolectado en una finca ubicada en la zona donde se tomaron las muestras de sustrato. La selección de este estiércol se dio por que los cerdos del área tienen como parte de su dieta alimenticia el consumo de la mancha, así que se espera que en su estiércol abunden microorganismos adaptados al consumo de mancha. Para su utilización se colocaron 60gr de estiércol en una probeta previamente esterilizada y se agregó agua hasta completar 100ml.
- **Efluente de Biodigestor:** Se recolectaron muestras del efluente de un biodigestor tubular de flujo horizontal construido en plástico y que es alimentado de manera intermitente con el efluente del sedimentador de mancha de una rallandería de la zona. A este efluente no se le realizó ningún acondicionamiento previo a su utilización.

En cada uno de los reactores se agregó una cantidad de inóculo correspondiente al uno por ciento del volumen de sustrato cargado, esto es equivalente a 60ml. En la Tabla 3 se muestran las proporciones volumétricas utilizadas para la preparación de las mezclas usadas como inóculos en los diferentes reactores.

Tabla 3. Composición volumétrica de los inóculos utilizados en cada uno de los reactores.

Fuente del inóculo	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
Estiércol de cerdo	100% (60ml)	-	25% (15ml)	75% (45ml)
Efluente del biodigestor	-	100% (60ml)	75% (45ml)	25% (15ml)

El procedimiento para inocular un reactor consistió en cargar 6L del sustrato y adicionar 60ml del inóculo correspondiente, luego se agitó vigorosamente el reactor para homogenizar el contenido y dos minutos después se tomaron las muestras correspondientes al día inicial del ensayo, luego los reactores fueron colocados en la oscuridad.



### 2.2.3 Pruebas preliminares

Con el fin de observar la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos y determinar el tiempo de duración de las corridas adecuado para llevar a cabo el estudio, se realizaron pruebas previas a la puesta en funcionamiento de los reactores con los inóculos mencionados anteriormente. Se adaptaron dispositivos similares a los descritos en la sección 2.2.1, con la diferencia que se emplearon botellas plásticas de polipropileno de 2L de capacidad. El muestreo se realizó a través de un orificio lateral de 1cm. de diámetro a 15cm. de altura.

La primera prueba, tuvo una duración de 32 horas, durante las cuales se realizó la medición de los parámetros como pH, DQO, SST, SSV y ST, a un intervalo de 3, 8, 24 y 32 horas a partir de la puesta en marcha del reactor. Los resultados obtenidos para esta prueba se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de prueba piloto 1

Parámetros		Tiempo(Horas)				
		0	6	8	12	32
DQO(mg O <sub>2</sub> /l)		4773.36	7949.24	4118.02	4319.66	4470.89
pH		7.02	4.51	-	4.33	6.14
Sólidos (mg/l)	Totales	6081.00	9190.00	5894.00	5960.00	6089.00
	Suspendidos totales	1800.00	3185.71	426.67	775.00	1930.77
	Suspendidos volátiles	1792.31	3214.29	460.00	785.00	1930.77
	Volátiles	5093.00	7915.00	4878.00	4831.00	5036.00

Como se puede apreciar en la Tabla 4, los valores de DQO son muy variables para el primer día de muestreo, se observa que la DQO presenta durante las primeras 8 horas un comportamiento inestable, con un máximo de 7949.24 mg O<sub>2</sub>/l y un posterior descenso a las 8 horas 4118.01 mg O<sub>2</sub>/l, que se mantiene en aumento hasta el último muestreo.

Debido a que es necesario registrar el comportamiento después de las 32 horas monitoreadas durante la prueba 1, se realizó una segunda prueba con



siete días de duración, durante los cuales se monitorearon los mismos parámetros. La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 5. Resultados de prueba piloto 2

Parámetros		Tiempo(días)							
		0	1	2	3	4	5	6	7
DQO(mg O <sub>2</sub> /l)		4319.6	1496.6	488.4	1345.4	2000.7	3059.3	1295.0	2404.0
pH		5.86	4.44	4.52	4.27	4.23	4.23	4.45	4.13
Sólidos (mg/l)	Totales	9817.0	5616.0	5140.0	4614.0	4438.0	4255.0	4282.0	4585.0
	Suspendidos totales	1680.0	710.0	355.0	225.0	-	670.0	276.0	160.0
	Suspendidos volátiles	1660.0	705.0	350.0	225.0	-	630.0	272.0	160.0
	Volátiles	8347.0	4462.0	3999.0	3565.0	3340.0	3284.0	3346.0	3615.0

Durante los dos primeros días de muestreo se observa que el comportamiento es muy similar al presentado en la prueba piloto 1 para la DQO y posteriormente este parámetro aumenta de manera gradual hasta el día siete.

A partir de las observaciones anteriores se determinó que el tiempo para llevar acabo las corridas experimentales sería de cuatro días, debido a que en este periodo de tiempo se presentaron los mayores cambios en los diferentes parámetros fisicoquímicos evaluados y se observó una tendencia estable sin cambios representativos hasta el día siete.

#### 2.2.4 Metodología para el análisis de los datos experimentales

Los datos se obtuvieron a partir de cuatro corridas experimentales. Cada corrida consistió en cargar de manera simultánea los cuatro reactores con la misma cantidad de sustrato y con el inóculo correspondiente, durante cuatro días, en los cuales se evaluaron los parámetros fisicoquímicos con la frecuencia que se presenta en la Tabla 1. Finalizada la corrida se desechó el agua residual tratada. Posteriormente, para llevar a cabo las siguientes corridas, se utilizó sustrato fresco en cada una de ellas y se realizó el mismo procedimiento. Por cada uno de los reactores se realizaron cuatro repeticiones, para tener un total de 16 experimentos.



A las series de datos que se obtuvieron se les aplicó el criterio Q (prueba Q), con el propósito de establecer si era o no necesario rechazar aquellos datos que presentaban una marcada diferencia con el valor promedio de la serie.

El análisis de los resultados obtenidos se efectuó bajo las siguientes consideraciones teóricas:

1. Los valores de los parámetros evaluados para un mismo reactor durante las cuatro corridas no deben presentar una diferencia significativa. Esto significa que el valor obtenido para cada parámetro al mismo intervalo de tiempo debe ser el mismo o en su defecto debe poder representarse por una medida de tendencia central como la media, más o menos el error experimental de la determinación. Para estimar el error experimental de la determinación se calculó el intervalo de confianza con un nivel de significancia del 95 por ciento, utilizando la distribución de t y la ecuación:

$$P\left[\bar{x} - t \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t \frac{S}{\sqrt{n}}\right] = 1 - \alpha \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

$\bar{x}$ : media calculada del parámetro

S: desviación estándar calculada

n: número de datos

t: estadístico definido con  $\alpha/2$  y (n-1) grados de libertad

1- $\alpha$ : probabilidad (0.05)

$\alpha$ : nivel de significancia (0.95)

$\mu$ : media poblacional.

2. Debe existir una diferencia significativa en el tratamiento efectuado en los diferentes reactores, es decir por cada uno los cuatro inóculos utilizados. Para esto, los datos obtenidos en dos reactores se analizaron considerándolos como un experimento comparativo simple. Para tal efecto se calculó la desviación estándar promedio  $S_p$ , el estadístico  $t_o$ , y se efectuó la prueba de hipótesis de dos colas a un nivel de significancia del 95 por ciento, usando la distribución t y las siguientes ecuaciones:

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

$S_1$  y  $S_2$ : desviación estándar calculada con las muestras 1 y 2

$n_1$  y  $n_2$ : número de datos en las muestras 1 y 2

$n_1 + n_2 - 2$ : grados de libertad





$$t_o = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad \text{Ec. 4}$$

Siendo

$\bar{x}_1$  y  $\bar{x}_2$  : media calculada del parámetro en las muestras 1 y 2

Durante este análisis se consideró la hipótesis nula  $H_0: \mu_i = \mu_j$  y como hipótesis alternativa,  $H_0: \mu_i \neq \mu_j$ , para  $i \neq j$ , la hipótesis nula fue rechazada cuando  $t_o < t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$  o  $t_o < -t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$



### 3 EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNIDADES ANAERÓBICAS

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos durante el seguimiento de las corridas, en los cuatro reactores experimentales. Los parámetros determinados fueron: DBO<sub>5</sub>, DQO, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Suspendidos Volátiles, Temperatura, CN<sup>-</sup>, AGV, pH.

#### 3.1 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN CADA REACTOR

Los valores promedio de los cinco principales parámetros fisicoquímicos evaluados durante el seguimiento de las corridas experimentales en los cuatro reactores, se presentan de la Tabla 7 a la Tabla 10. En estas tablas además pueden apreciarse la desviación estándar estimada y la amplitud del intervalo de confianza calculada como  $t \frac{s}{\sqrt{n}}$ , dando a t valores de 4,303 y 3,180 para 2 y 3 grados de libertad<sup>1</sup> respectivamente. Los valores de los parámetros fisicoquímicos obtenidos para cada reactor durante todas las corridas experimentales son presentados en el Apéndice 3.

Tabla 6. Datos medios obtenidos para la Demanda Bioquímica de Oxígeno

Tiempo (Días)	DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /l)	Reactor			
		1	2	3	4
0	Media	1053,50	2180,50	1592,50	1984,50
	Desviación estándar (S)	520,88	526,99	217,30	361,18
	Amplitud del Intervalo de confianza	828,19	837,91	345,51	574,28
	Máximo	1881,69	3018,41	1938,01	2558,78
	Mínimo	225,31	1342,59	1246,99	1410,22
2	Media	980,00	1298,50	1568,00	1557,25
	Desviación estándar (S)	309,90	475,91	339,48	935,32
	Amplitud del Intervalo de confianza	492,75	756,70	539,78	1487,15
	Máximo	1472,75	2055,20	2107,78	3044,40
	Mínimo	487,25	541,80	1028,22	70,10
4	Media	1274,00	1151,50	784,00	1665,00
	Desviación estándar (S)	98,00	502,10	423,41	1039,84
	Amplitud del Intervalo de confianza	243,47	798,34	673,22	1653,35
	Máximo	1517,47	1949,84	1457,22	3318,35
	Mínimo	1030,53	353,16	110,78	11,65

<sup>1</sup> Los grados de libertad 2 y 3 se determinaron con la relación  $n - 1$ , en donde n es el número de datos empleados para el cálculo del intervalo de confianza.



Tabla 7. Datos medios obtenidos para Potencial de Hidrógeno, pH

Tiempo (Días)	pH	Reactor			
		1	2	3	4
0	Media	5,06	4,86	4,84	4,77
	Desviación estándar (S)	0,46	0,59	0,43	0,41
	Amplitud del Intervalo de confianza	0,74	0,93	1,06	1,01
	Máximo	5,80	5,80	5,90	5,77
	Mínimo	4,32	3,93	3,78	3,76
1	Media	4,98	4,50	4,60	4,57
	Desviación estándar (S)	0,48	0,64	0,65	0,55
	Amplitud del intervalo de confianza	1,19	1,59	1,61	1,38
	Máximo	6,17	6,09	6,21	5,95
	Mínimo	3,79	2,91	3,00	3,19
2	Media	4,72	4,60	4,42	4,43
	Desviación estándar (S)	0,50	0,40	0,56	0,47
	Amplitud del intervalo de confianza	1,25	1,00	0,89	0,75
	Máximo	5,97	5,60	5,31	5,18
	Mínimo	3,47	3,60	3,53	3,69
3	Media	4,68	4,32	4,57	4,63
	Desviación estándar (S)	0,58	0,49	0,59	0,48
	Amplitud del intervalo de confianza	0,93	0,78	0,95	0,76
	Máximo	5,61	5,10	5,51	5,39
	Mínimo	3,76	3,54	3,62	3,87
4	Media	4,8	4,49	4,61	4,64
	Desviación estándar (S)	0,62	0,63	0,58	0,77
	Amplitud del intervalo de confianza	0,98	0,99	0,92	1,91
	Máximo	5,82	5,48	5,53	6,55
	Mínimo	3,85	3,49	3,69	2,73



Tabla 8. Datos medios obtenidos para la Demanda Química de Oxígeno

Tiempo (Días)	DQO(mg O <sub>2</sub> /l)	Reactor			
		1	2	3	4
0	Media	3951,11	4833,30	3711,66	5413,03
	Desviación estándar (S)	1656,73	2315,26	1028,20	2923,57
	Amplitud del Intervalo de confianza	2634,20	3681,26	1634,84	4648,47
	Máximo	6585,31	8514,56	5346,50	10061,50
	Mínimo	1316,91	1152,04	2076,82	764,56
1	Media	2993,31	2513,74	2790,53	3324,05
	Desviación estándar (S)	1679,46	1445,16	800,78	986,45
	Amplitud del intervalo de confianza	2670,35	2297,81	1989,40	1568,46
	Máximo	5663,65	4811,55	4779,93	4892,51
	Mínimo	322,96	215,93	801,13	1755,59
2	Media	3500,48	2882,95	2656,10	3172,81
	Desviación estándar (S)	1811,70	1109,42	717,65	1189,65
	Amplitud del intervalo de confianza	2880,60	1763,98	1141,07	1891,54
	Máximo	6381,08	4646,93	3797,17	5064,36
	Mínimo	619,89	1118,97	1515,03	1281,27
3	Media	2387,24	2336,83	2756,92	3210,62
	Desviación estándar (S)	468,40	529,51	702,14	952,04
	Amplitud del intervalo de confianza	1163,65	1315,49	1116,41	1513,74
	Máximo	3550,90	3652,33	3873,33	4724,37
	Mínimo	1223,59	1021,34	1640,52	1696,88
4	Media	2983,77	2845,14	2845,14	3311,44
	Desviación estándar (S)	715,88	1134,24	779,20	1229,31
	Amplitud del intervalo de confianza	1138,25	1803,45	1238,92	1954,60
	Máximo	4122,02	4648,59	4084,07	5266,04
	Mínimo	1845,52	1041,69	1606,22	1356,84



Tabla 9. Datos medios obtenidos para los Sólidos Suspendidos Volátiles

Tiempo (Días)	SSV(mg/l)	Reactor			
		1	2	3	4
0	Media	470,83	582,75	491,25	727,88
	Desviación estándar (S)	154,98	242,91	290,22	442,41
	Amplitud del Intervalo de confianza	246,42	386,22	461,45	703,43
	Máximo	717,25	968,97	952,70	1431,32
	Mínimo	224,41	196,53	29,80	24,45
1	Media	139,25	98,50	133,00	116,67
	Desviación estándar (S)	31,13	33,00	16,64	2,89
	Amplitud del intervalo de confianza	49,49	52,47	41,35	7,17
	Máximo	188,74	150,97	174,35	123,84
	Mínimo	89,76	46,03	91,65	109,50
2	Media	128,31	77,09	82,85	73,17
	Desviación estándar (S)	35,16	37,21	30,82	28,78
	Amplitud del intervalo de confianza	55,91	59,17	49,01	45,77
	Máximo	184,21	136,26	131,86	118,93
	Mínimo	72,40	17,92	33,85	27,40
3	Media	143,33	69,69	97,63	112,82
	Desviación estándar (S)	77,14	37,98	1,48	21,63
	Amplitud del intervalo de confianza	122,65	60,39	3,68	34,39
	Máximo	265,98	130,08	101,31	147,20
	Mínimo	20,69	9,30	93,95	78,43
4	Media	127,56	84,92	77,63	107,75
	Desviación estándar (S)	44,99	43,58	22,15	46,89
	Amplitud del intervalo de confianza	71,53	69,29	55,02	74,56
	Máximo	199,09	154,20	132,65	182,32
	Mínimo	56,02	15,63	22,61	33,19



Tabla 10. Datos medios obtenidos para los Ácidos Grasos Volátiles

Tiempo (Días)	AGV((mg HAc/l)	Reactor			
		1	2	3	4
0	Media	354,84	354,84	354,84	354,84
	Desviación estándar (S)	159,23	159,23	159,23	159,23
	Amplitud del Intervalo de confianza	253,18	253,18	253,18	253,18
	Máximo	608,01	608,01	608,01	608,01
	Mínimo	101,66	101,66	101,66	101,66
2	Media	407,88	557,32	879,39	597,52
	Desviación estándar (S)	143,42	345,52	514,66	342,74
	Amplitud del Intervalo de confianza	228,03	549,37	818,31	544,95
	Máximo	635,91	1106,69	1697,70	1142,48
	Mínimo	179,85	7,95	61,09	52,57
4	Media	656,97	552,38	651,15	640,42
	Desviación estándar (S)	402,85	189,05	385,71	276,74
	Amplitud del Intervalo de confianza	640,53	300,58	613,28	440,02
	Máximo	1297,50	852,96	1264,42	1080,45
	Mínimo	16,44	251,79	37,87	200,40

Analizando detenidamente estas tablas se puede observar que los datos obtenidos presentan una alta desviación estándar y un intervalo de confianza bastante amplio, lo cual indica una alta dispersión en los datos. Ésta dispersión puede atribuir a factores no controlados para el experimento, tales como:

- La naturaleza fisicoquímica del efluente, esta puede variar dependiendo de la variedad, la frescura y la madurez de la yuca [1]. El tipo de yuca utilizada depende de la disponibilidad en mercado.
- El proceso de sedimentación seguido para obtener el almidón, en el caso de las muestras utilizadas en la corrida 1, éste se realiza en un tanque de sedimentación que posee un tiempo de retención de tres horas, mientras las muestras de las otras corridas proviene de un canal de sedimentación de flujo continuo.
- La cantidad de agua utilizada en la etapa de colado, la cual depende del criterio del operador y genera una variación en las concentraciones del efluente, debido a un mayor o menor efecto de dilución.
- El pelado de la yuca, este puede efectuarse de manera mecánica o manual. Para las muestras obtenidas en la corrida cuatro el pelado se



realizó de forma manual mientras que en las otras corridas se efectuó de forma mecánica.

### 3.1.1 Reactor 1

En la Figura 4 se presentan el comportamiento de la DQO, DBO<sub>5</sub>, SV y los porcentajes de remoción durante las corridas experimentales en el reactor 1.

La DQO presentó fluctuaciones en las cuatro corridas, lo cual indica que el sistema estaba asimilando la carga contaminante aplicada. La DQO solo permite cuantificar la cantidad de ésta carga, que es degradada respecto a la inicial, pero no diferencia entre el material soluble, que es fácilmente consumido por los microorganismos y el material insoluble, que puede quedar retenido en el reactor. Debido a esto es necesario diferenciar el aporte a la DQO que hace tanto el material soluble como el insoluble.

Considerando que el aporte efectuado a la DQO por el material insoluble, es debido básicamente a los SV, puede estimarse la DQO de los SV a través de la ecuación

$$DQO_{SV} = 1.42 \times SV \quad [27] \text{ Ec. 5}$$

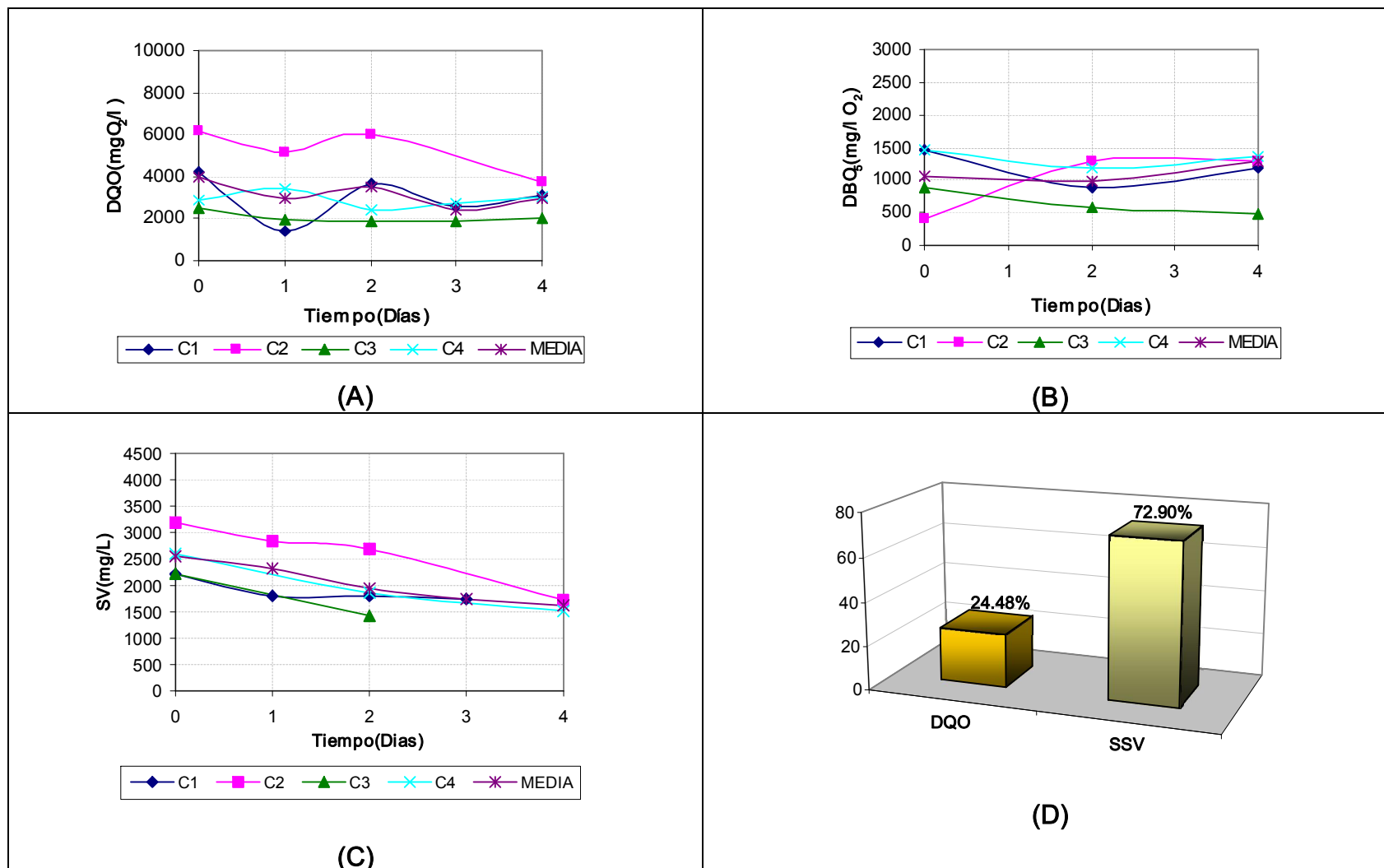
Los resultados obtenidos son presentados en el Apéndice 3, Tabla 23. De ellos puede concluirse que el mayor aporte a la DQO es efectuado por los sólidos volátiles.

Los sólidos volátiles inicialmente están conformados por almidón de baja calidad o mancha, y poseen baja sedimentabilidad según Chaux [10]. Durante el proceso los sólidos volátiles cambian su característica de sedimentación debido a que se transforman esencialmente en microorganismos, los cuales constituyen un sólido fácilmente sedimentable. Esto explica por que los niveles de remoción de la DQO no son muy altos.

Los Sólidos Suspendidos Volátiles en las cuatro corridas presentaron disminución pronunciada en las primeras 24 horas. Esto se explica por el cambio en la característica de sedimentación del sólido. En los días siguientes se presentaron fluctuaciones en la concentración de SSV, estas variaciones se deben al crecimiento de una masa microbiana activa y a la utilización que esta hace del sustrato.



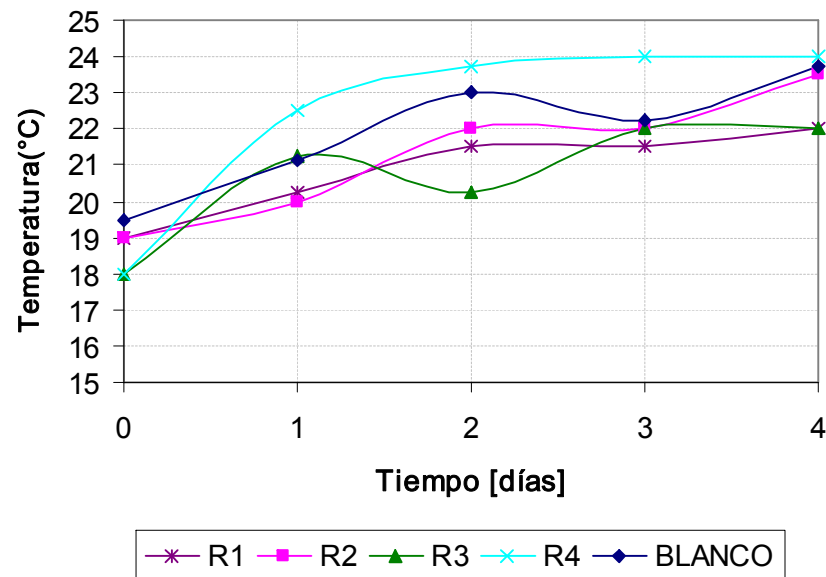
Figura 4. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos durante las corridas experimentales en el reactor 1: (A) DQO total (B) DBO<sub>5</sub> (C) SV (D) Porcentajes de remoción medias





En el comportamiento de los SSV se espera que aumente su concentración ya que esto representa el crecimiento de la biomasa activa del sistema. En nuestro estudio ocurre el fenómeno contrario debido a que durante el primer día se presenta una disminución drástica en la concentración de los SSV, luego de esto la eficiencia de remoción de los SSV cae, atribuyéndose esto a un incremento en la cinética del crecimiento de los microorganismos.

Figura 5. Comportamiento medio de temperatura para los diferentes inóculos



La temperatura en las cuatro corridas osciló entre 19 y 24°C es decir que los reactores operaron en el rango mesofílico (20 y 40°C), de acuerdo con Manrique [15], para mejorar la remoción de la materia orgánica en un reactor anaeróbico se debe tratar de operar éste a una temperatura de 36°C la cual es la temperatura óptima para la reacción anaeróbica.

Los ácidos grasos volátiles AGV, tienen un comportamiento creciente como puede apreciarse en las figuras del Apéndice 4, estos constituyen parte de los productos microbianos y la variación en su concentración indica que efectivamente los microorganismos están consumiendo el sustrato. La concentración de AGV, tiene gran importancia en el proceso de digestión porque puede llegar a acidificar el fango provocando el fallo en el proceso. Los valores óptimos están comprendidos entre 50 y 500 mg/l Hac, considerándose como valor extremo 2000 mg/l Hac. El aumento en la concentración de AGV, puede provenir de una sobrecarga de materia orgánica o por inhibición de las metanobacterias. A su vez, una gran concentración puede provocar la ruptura de la capacidad tapón del fango,



disminución del pH y en consecuencia inhibición de las bacterias formadoras de metano [11]. La  $DBO_5$  presenta una variación a través del tiempo en las diferentes corridas, pero no se presentó remoción debido a que, si bien los microorganismos están consumiendo el sustrato, también están produciendo AGV y no se diferencia su contribución al valor de la  $DBO_5$ .

El proceso de descomposición anaeróbica del sustrato consta de cuatro etapas como son hidrólisis, fermentación, acetogénesis y metanogénesis. Debido a que el sustrato está formado principalmente por almidón de baja calidad o mancha y a la formación de los AGV, puede afirmarse que a través de las diferentes corridas se presentaron las etapas de hidrólisis y fermentación. Una disminución en la concentración de los AGV junto con un incremento en el pH, son un indicador de la etapa de acetogénesis. Durante las diferentes corridas, el sistema desarrolló una capacidad buffer que mantuvo el pH en un rango entre 4 y 5, intervalo que no resulta adecuado para alcanzar la metanogénesis, por esto se puede afirmar que en el sistema no primaron los microorganismos metanogénicos y por tanto no se alcanzó la etapa de metanogénesis. Cabe mencionar que los AGV en su forma no ionizada son tóxicos para las bacterias metanogénicas [2].

### 3.1.2 Reactor 2

La DQO presentó una disminución fuerte durante las primeras 24 horas, en términos generales tuvo un comportamiento similar al del reactor 1, aunque con menores fluctuaciones, tal como se aprecia en la Figura 6.

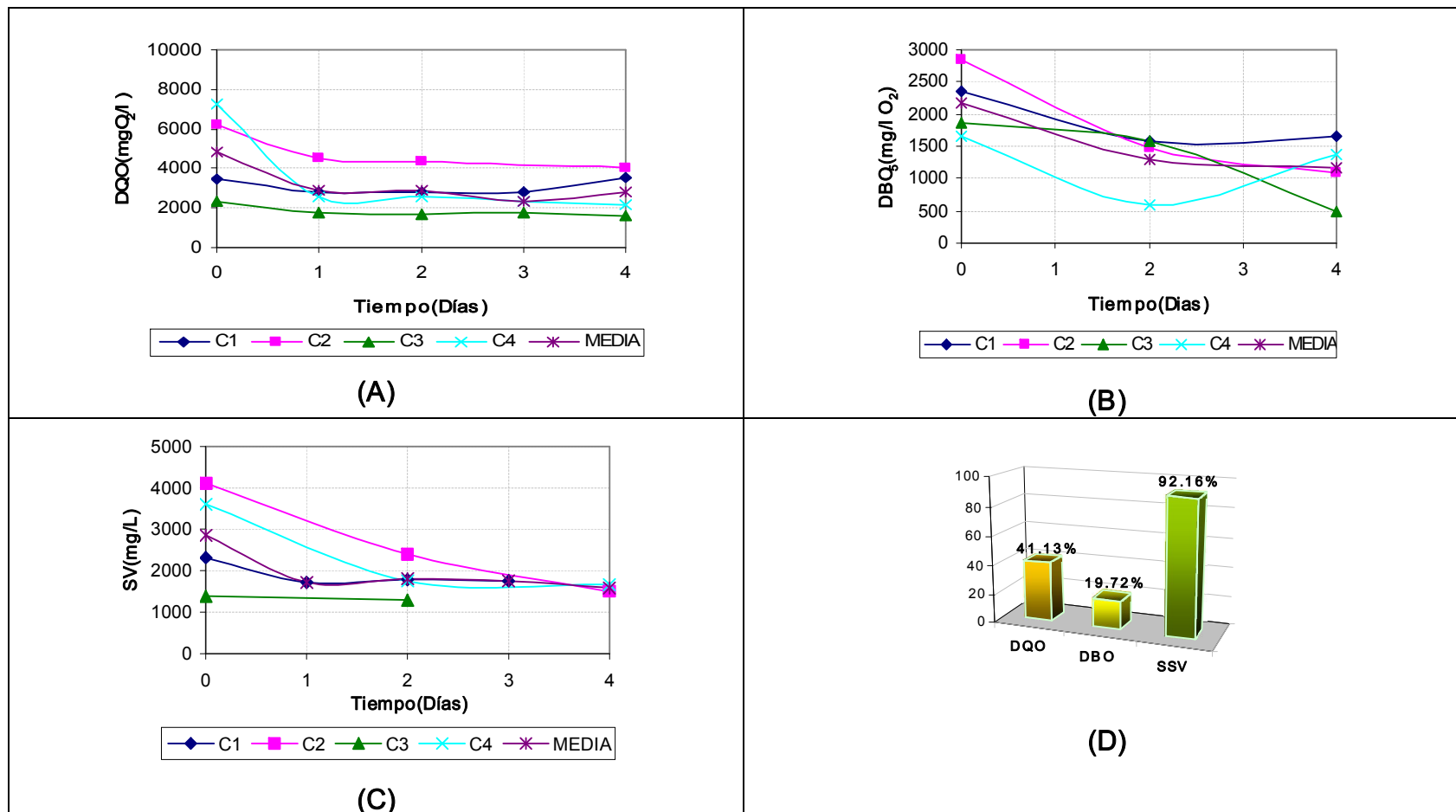
Los sólidos volátiles nuevamente presentan la mayor contribución a la DQO y su disminución se ve reflejada en el comportamiento de la DQO. Análogamente los SSV presentan una disminución durante el primer día, estabilizándose en valores inferiores a 200 mg/l y dando como resultado una eficiencia de remoción media del 92.16 por ciento, la cual es muy buena puesto que la normatividad [12] exige una remoción mínima del 80 por ciento.

A través del tiempo, la  $DBO_5$  presenta una disminución progresiva en todas las corridas. Aunque en el Reactor 1 el porcentaje de remoción media de  $DBO_5$  es ligeramente superior al calculado en el Reactor 2, la cantidad de materia orgánica consumida en el Reactor 2 es mayor ya que la  $DBO_5$  inicial es más alta, esto debido a la composición del inóculo utilizado.

En conclusión el inóculo utilizado en el Reactor 2 presenta un mejor desempeño que el aplicado en Reactor 1, esto debido a las mayores remociones en DQO y SSV, así como el mayor consumo de materia orgánica.



Figura 6. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos durante las corridas experimentales en el reactor 2: (A) DQO total (B) DBO<sub>5</sub> (C) SV (D) Porcentajes de remoción medias





### 3.1.3 Reactor 3

Los parámetros de DQO, Sólidos volátiles y SSV presentan un comportamiento similar al observado en los reactores 1 y 2, como puede apreciarse en la Figura 7.

La  $DBO_5$  tiene una remoción (50.77 por ciento), como se presenta en la Figura 7, marcadamente superior a la encontrada en los reactores 1 y 2, esto puede explicarse debido a la sinergia presentada por el inóculo utilizado en el reactor, dado que éste está conformado por una mezcla entre los inóculos utilizados en los reactores 1 y 2 en proporción volumétrica de 75/25 respectivamente. Este efecto sinérgico se manifiesta en que el inóculo utilizado en el Reactor 1 no causa un incremento brusco en la  $DBO_5$  inicial como lo hace el utilizado en el Reactor 2 y por otro lado el inóculo del Reactor 2 tiene un mayor consumo de materia orgánica. Los AGV permiten ratificar que efectivamente hay un mayor consumo de materia orgánica dado que estos disminuyen lo cual es un indicador de la etapa de acetogénesis.

### 3.1.4 Reactor 4

En la Figura 8 se presenta el comportamiento durante las diferentes corridas de los parámetros DQO, sólidos volátiles y SSV, los cuales al igual que en el caso anterior, tienen un comportamiento similar al explicado en el Reactor 1. El bajo valor de la remoción de  $DBO_5$  (16.1 por ciento) muestra que la mezcla con composición volumétrica 25/75 de los inóculos 1 y 2 respectivamente, no favorece la sinergia para remover materia orgánica sin embargo presenta un efecto positivo en la remoción de sólidos suspendidos volátiles repercutiendo así en un incremento en la disminución de DQO.



Figura 7. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos durante las corridas experimentales en el reactor 3: (A) DQO total (B) DBO<sub>5</sub> (C) SV (D) Porcentajes de remoción medias

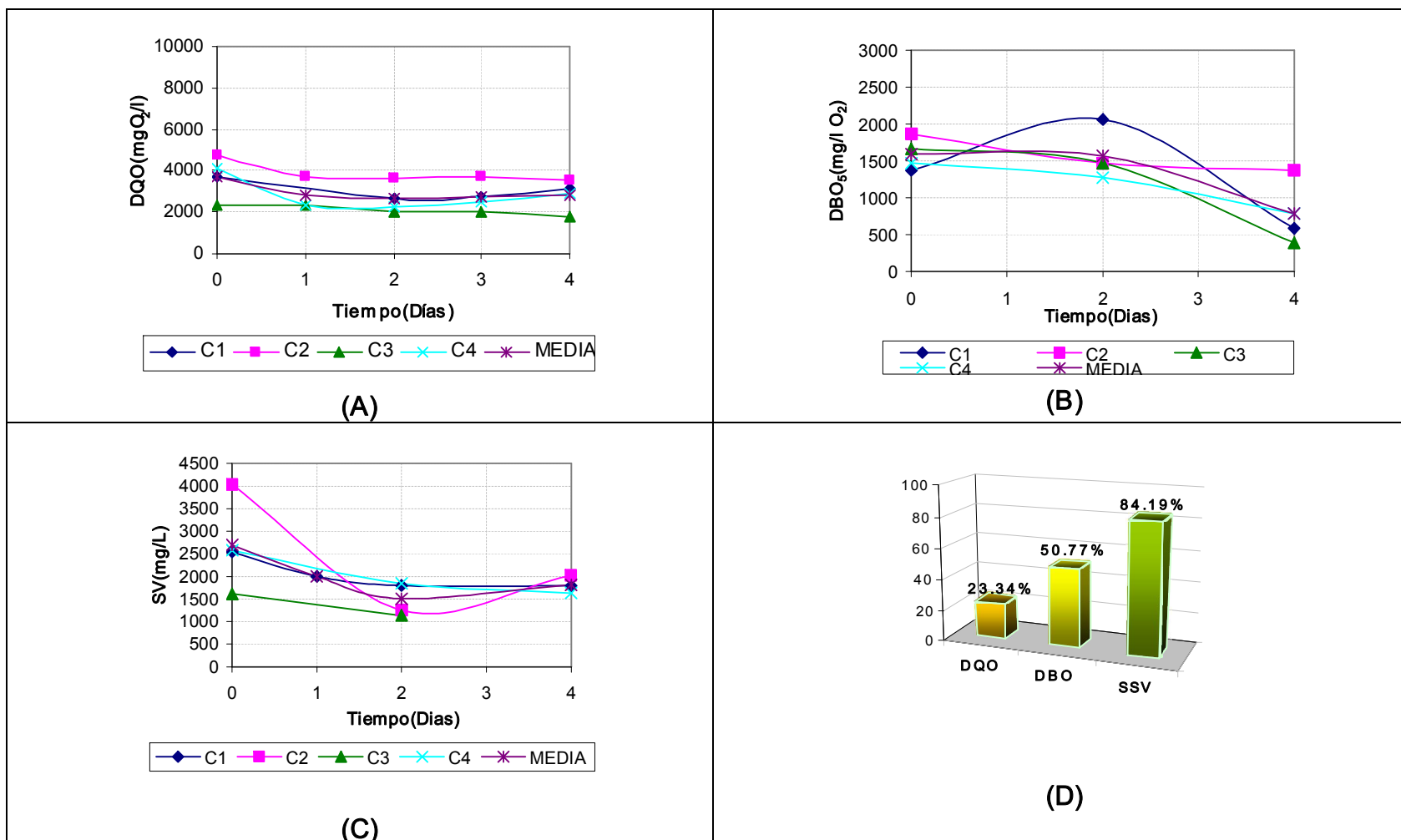
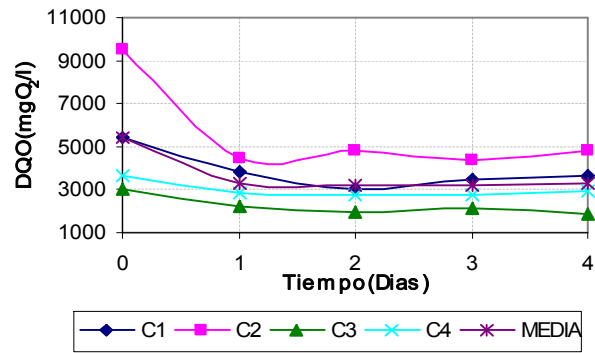
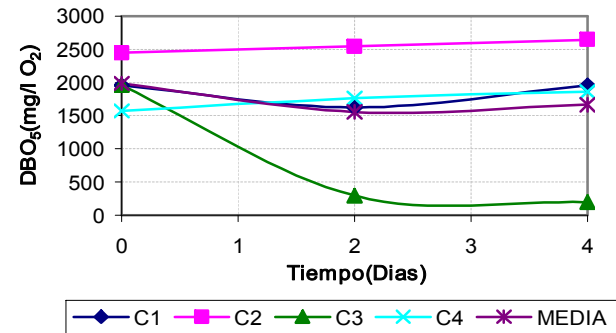


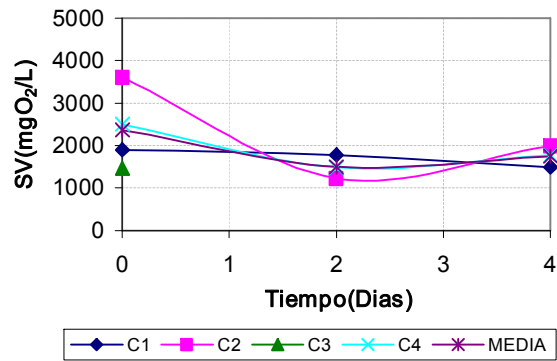
Figura 8. Comportamiento de parámetros fisicoquímicos durante las corridas experimentales en el reactor 4: (A) DQO total (B) DBO<sub>5</sub> (C) SV (D) Porcentajes de remoción medias



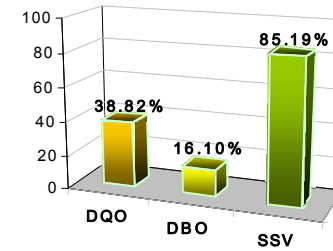
(A)



(B)



(C)

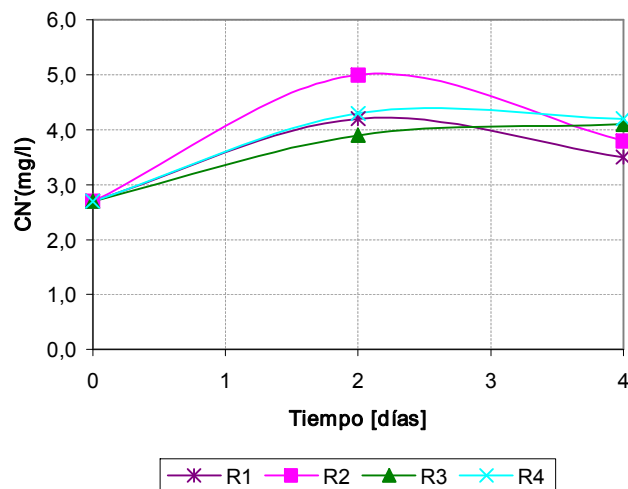


(D)

### 3.1.5 Mediciones de cianuro

El comportamiento del cianuro es presentado en la Figura 9. Estas mediciones se efectuaron para las corridas experimentales 1 y 2. Las referencias bibliográficas [30, 2, 3, 18] reportan concentraciones de 2.12mg CN-/l, 4.8mg CN-/l, 1.5mg CN-/l y 2.8mg CN-/l respectivamente. Éstas son inferiores a las encontradas en éste estudio. Esto se debe a que la concentración de cianuro depende de la variedad de yuca utilizada en el proceso, pues las yucas amargas empleadas para la producción de almidón, presentan mayores concentraciones que las dulces [1] y [2], así mismo factores como las condiciones de los suelos y las temperaturas afectan el contenido de cianuro de las raíces de yuca [5]. En [23] se reporta que para un inóculo no adaptado la concentración de cianuro tóxica para la digestión anaerobia es 1.00 mg/l, teniendo en cuenta lo anterior, los niveles de CN<sup>-</sup> presentes en las muestras analizadas podrían estar causando disturbios en el proceso de digestión anaeróbica para microorganismos no adaptados, además son un factor adicional para la inhibición de la etapa de metanogénesis, debido a que las bacterias metanogénicas son más sensibles a condiciones desfavorables del medio que las demás bacterias que intervienen en dicho proceso anaeróbico [5].

Figura 9. Comportamiento medio de CN<sup>-</sup> para los diferentes inóculos



Puede concluirse entonces que los microorganismos que intervienen en el proceso son capaces de resistir las altas concentraciones de cianuro del sustrato, de hecho la disminución en la concentración de cianuro podría atribuirse a que los microorganismos hayan desarrollado un mecanismo para la degradación de cianuro.



### 3.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS REACTORES

En esta sección se examina si el tratamiento efectuado por cada uno de los reactores presenta una diferencia significativa al compararse entre si, es decir, si sus resultados son equivalentes. Para esto se diseñó y efectuó un experimento comparativo simple según Montgomery [16], tal como se consideró en el apartado 2.2.4, literal 2.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los diferentes parámetros:

Tabla 11. Resultados prueba de hipótesis entre reactores parámetro  $DBO_5$

Reactores	$t_0$		t critico	
R1 – R2	-0.80	>	-2.776	No se rechaza $H_0$
R1 – R3	0.81	<	2.776	Se rechaza $H_0$
R1 – R4	-0.65	>	-2.776	No se rechaza $H_0$
R2 – R3	2.17	<	2.776	Se rechaza $H_0$
R2 – R4	-0.44	>	-2.776	No se rechaza $H_0$
R3 – R4	-1.36	>	-2.776	No se rechaza $H_0$

Tabla 12. Resultados prueba de hipótesis entre reactores parámetro DQO

Reactores	$t_0$		t critico	
R1 – R2	0.22	<	2.447	Se rechaza $H_0$
R1 – R3	0.28	<	2.447	Se rechaza $H_0$
R1 – R4	-0.49	>	-2.447	No se rechaza $H_0$
R2 – R3	7.01E-16	<	2.447	Se rechaza $H_0$
R2 – R4	-0.59	>	-2.447	No se rechaza $H_0$
R3 – R4	-0.68	>	-2.447	No se rechaza $H_0$

Tabla 13. Resultados prueba de hipótesis entre reactores parámetro AGV

Reactores	$t_0$		t critico	
R1 – R2	0.49	<	2.447	Se rechaza $H_0$
R1 – R3	0.02	<	2.447	Se rechaza $H_0$
R1 – R4	0.07	<	2.447	Se rechaza $H_0$
R2 – R3	-0.49	>	-2.447	No se rechaza $H_0$
R2 – R4	-0.63	>	-2.447	No se rechaza $H_0$
R3 – R4	0.07	>	-2.447	No se rechaza $H_0$





Tabla 14. Prueba de hipótesis entre reactores parámetro SSV

Reactores	$t_0$		t crítico	
R1 – R2	1.32	<	2.571	Se rechaza $H_0$
R1 – R3	1.93	<	2.571	Se rechaza $H_0$
R1 – R4	0.65	<	2.447	Se rechaza $H_0$
R2 – R3	-0.26	>	-2.776	No se rechaza $H_0$
R2 – R4	-0.69	>	-2.571	No se rechaza $H_0$
R3 – R4	-1.12	>	-2.571	No se rechaza $H_0$

En todos los casos la hipótesis nula  $H_0$  no fue rechazada, con esto se puede concluir que estadísticamente algunos inóculos son iguales respecto al comportamiento de determinados parámetros. Esto significa que algunos inóculos efectuaron un tratamiento diferente y otros un tratamiento similar entre ellos.

### 3.3 SELECCIÓN DEL REACTOR CON MEJOR DESEMPEÑO

La selección de la unidad con mejor desempeño se realizó considerando que el proceso es de tipo biológico, el principal parámetro a tener en cuenta es la  $DBO_5$ , así el Reactor 3 es el que presenta un mejor desempeño cuando se trata de remoción de  $DBO_5$  un 50.77 por ciento, la remoción de DQO es 23.34 por ciento, y en ambos casos al comparar los valores de estos parámetros luego de cuatro días, son los más bajos entre los cuatro reactores, tal como puede apreciarse en la Figura 10 y en la Figura 11. Adicionalmente el inóculo utilizado en el Reactor 3 logra un cambio significativo en las características de sedimentación de los sólidos alcanzando una remoción del 84.19 por ciento en los SSV. Además como se aprecia en la Figura 12, el factor de biodegradabilidad para el remanente del Reactor 3 es el más bajo (0.42), indicado de esta manera que es el reactor en el cual se presenta una mayor oxidación de la materia orgánica.

La Figura 13 presenta la evolución de la DQO para una muestra tratada con el inóculo 3 por un lapso de 20 días en el mismo reactor. Puede observarse que el mínimo se alcanza a los cuatro días y luego de estos hay una tendencia creciente, la cual podría explicarse según Rittman [27] por que los reactores tipo batch se comportan como sistemas complejos en estado no estacionario, por la acumulación de biomasa y productos microbianos.

Figura 10. DBO<sub>5</sub> media durante el tiempo de corrida en los cuatro reactores

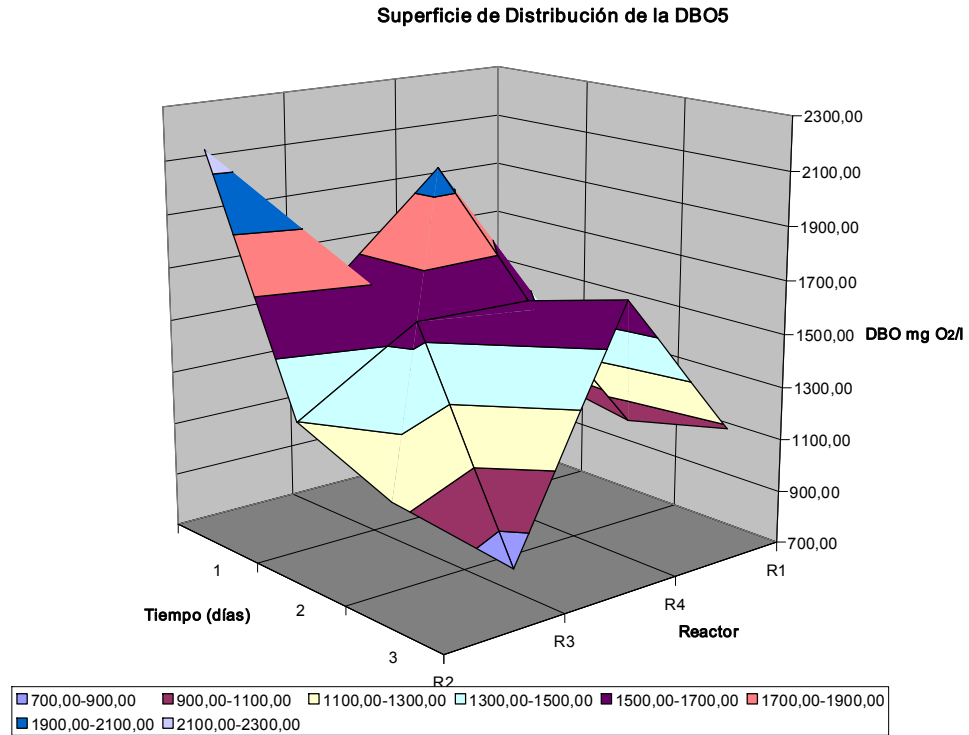


Figura 11. Comparación de la DQO media en cada reactor a través del tiempo

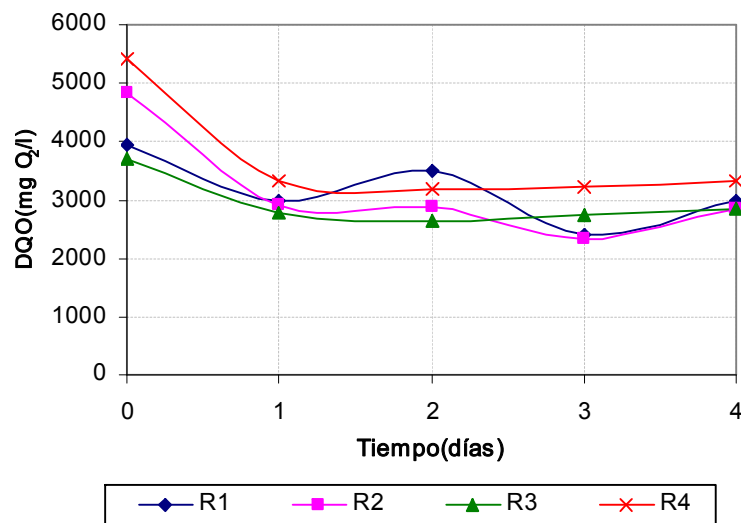


Figura 12. Comparación del factor medio de biodegradabilidad del remanente en todos los reactores

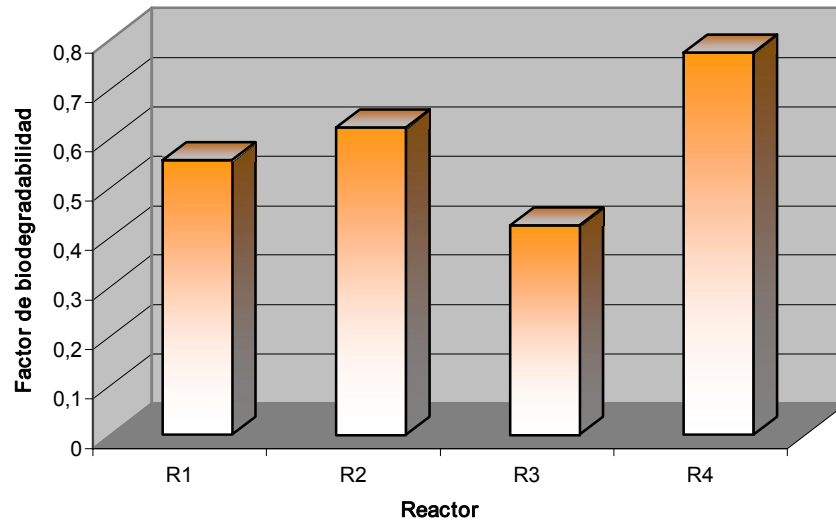
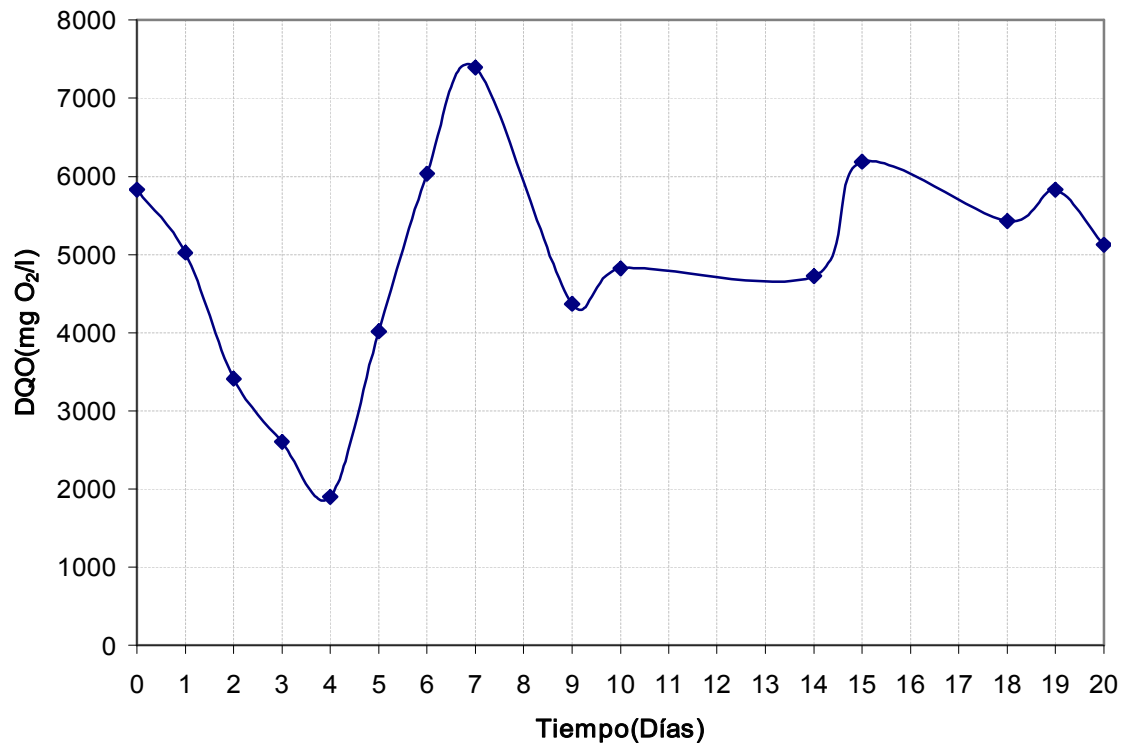


Figura 13. Resultado de DQO para corrida final con el reactor 3





### 3.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

El análisis realizado en cada uno de los reactores determinó que el inóculo tres, compuesto por una mezcla de estiércol de cerdo y Efluente de Biodigestor en proporción volumétrica 75/25, presenta un mejor desempeño tratando el efluente de la sedimentación de almidón de yuca.

Las bajas remociones de DQO y DBO<sub>5</sub> se debieron a la acidificación de los reactores por la prevalencia de la fermentación ácida sobre la metanogénesis y la producción de AGV, contribuyendo al incremento de la DBO<sub>5</sub>, de la misma forma que los SV incrementan la DQO, además, la temperatura alcanzada en el sistema no corresponde a la óptima para un proceso anaeróbico.

Los parámetros fisicoquímicos en los cuatro reactores presentaron los mejores valores alrededor del día 2, este puede constituirse como el tiempo límite para agregar sustrato fresco que permita mantener el sistema biológico en etapa de crecimiento.



## 4 CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA DEL REACTOR SELECCIONADO

En el presente capítulo se presentan los resultados del análisis microbiológico realizado al efluente del Reactor 3, seleccionado en el estudio por su comportamiento fisicoquímico. Se realizaron los análisis de indicadores como coliformes totales y fecales, mohos, levaduras y bacterias heterotróficas, durante tres corridas experimentales de cuatro días. Las mediciones se realizaron al inicio y final de las mismas.

### 4.1 COLIFORMES TOTALES Y FECALES

Se determinó el número de unidades formadoras de colonias (UFC) al inicio y al final de cada una de las tres corridas experimentales de acuerdo al método especificado en el Apéndice 6. Para la determinación de los coliformes totales y fecales por el método de filtración por membrana, se hizo necesario realizar pruebas que permitieran establecer la dilución apropiada para la muestra tanto al inicio de la corrida como al final, debido a que el filtro empleado en la prueba tiene un tamaño de poro muy pequeño que se obstruye fácilmente con muestras que contienen una cantidad de sólidos considerable, como es el caso de las muestras a analizar.

Para determinar las diluciones apropiadas, se tomaron muestras del efluente del Reactor 3, en el día 0 y 4, en donde se realizaron 9 diluciones, desde  $10^{-1}$  hasta  $10^{-9}$ , como se muestra en la Figura 14, y a cada una de las muestras diluidas se les determinaron los coliformes totales y fecales de acuerdo a lo especificado en el Apéndice 6.

En esta prueba se encontró que las diluciones apropiadas para el análisis microbiológico del efluente inicial fluctuaban entre  $10^{-3}$  y  $10^{-6}$ , debido a que la gran cantidad de sólidos del efluente de las rallanderías hace necesario que se utilicen muestras muy diluidas. Las diluciones encontradas para el último día de muestreo, fueron  $10^{-1}$  hasta  $10^{-3}$ , porque de acuerdo a los resultados fisicoquímicos analizados en capítulos anteriores, la cantidad de sólidos para el último día de muestreo disminuyen y además, se esperaba que las unidades formadoras de colonias al final de la corrida se presentaran en menor cantidad que la inicial.

Una vez determinadas las diluciones a utilizar en el análisis microbiológico del efluente, se realizaron las pruebas para las 3 corridas, al inicio y final de la corrida, los resultados se presentan en la Tabla 15.

Figura 15. Diluciones seriadas

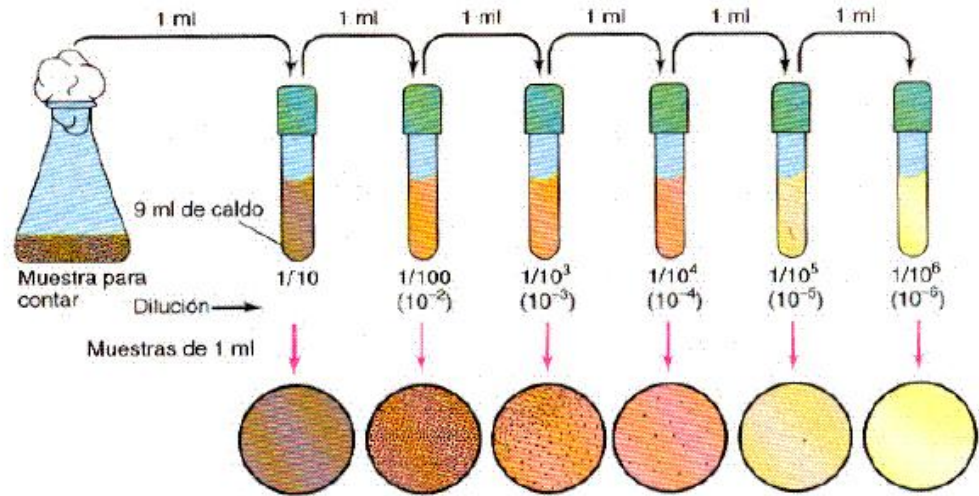


Tabla 15. Resultados de coliformes totales y fecales

Tiempo(día)	0		4	
	Coliformes (UFC/100 ml)		Coliformes (UFC/100 ml)	
Parámetro	Totales	Fecales	Totales	Fecales
# Corrida	Totales	Fecales	Totales	Fecales
1	$85 \times 10^3$	0	$5,0 \times 10^3$	0
2	-	$71 \times 10^3$	$7,4 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$
3	$88 \times 10^3$	$16 \times 10^3$	$6,1 \times 10^3$	$1,3 \times 10^3$
Promedio	$86,5 \times 10^3$	$43 \times 10^3$	$6,2 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$

Los resultados muestran que inicialmente hay una gran cantidad de UFC de coliformes totales y fecales. Estos resultados se presentan debido a que el inóculo utilizado está compuesto por estiércol de cerdo, el cual contiene un gran número de estos microorganismos. Como se puede apreciar en la tabla anterior, hay una reducción muy notable de las unidades formadoras de colonias de coliformes tanto fecales como totales. El porcentaje de remoción de coliformes totales y fecales que se presenta en el reactor escogido, se calcula a continuación:

$$\% \text{ Remoción}(C.Totales) = \frac{(86,5 \times 10^3) - (6,2 \times 10^3)}{(86,5 \times 10^3) + (6,2 \times 10^3)} * 100 = 86.62\%$$

$$\% \text{ Remoción}(C.Fecales) = \frac{(43 \times 10^3) - (1,2 \times 10^3)}{(43 \times 10^3) + (1,2 \times 10^3)} * 100 = 94.57\%$$



La remoción que se alcanza con el reactor 3 en cuanto a las coliformes fecales es de 94.57%. La reducción en términos logarítmicos del reactor en cuanto a coliformes totales es de 1.14 unidades y coliformes fecales de 1.55 unidades. Esta remoción permite que en el efluente del reactor 3 se presente un promedio de  $1,2 \times 10^3$  UFC/100 ml de coliformes fecales. La concentración de coliformes fecales en aguas residuales domésticas crudas es alrededor de  $10^3$  a  $10^7$  UFC/100 ml, siendo el valor más usual  $10^4$  a  $10^5$  UFC/100ml [29], de acuerdo a estos valores, el efluente del reactor 3, presentó niveles inferiores comparados con este tipo de aguas.

## 4.2 MOHOS Y LEVADURAS

Las pruebas se llevaron a cabo al final de cada una de las corridas con el propósito de observar la presencia de mohos y levaduras en el reactor seleccionado. Para realizar el recuento de hongos y levaduras, se utilizó el método especificado en el Apéndice 6. Se dejaron incubar por 7 días a temperatura ambiente y se realizó el recuento cuyo resultado se presenta en la Tabla 16.

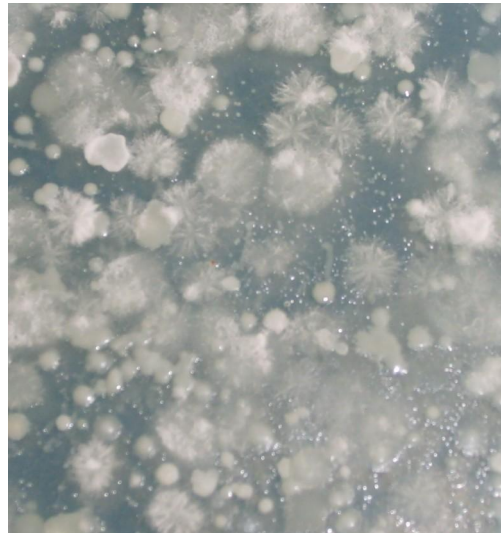
Tabla 16. Resultados para mohos y levaduras

Tiempo(día)	4	
# Corrida	Mohos (UFC/ml)	Levaduras (UFC/ml)
1	$10 \times 10^3$	$21 \times 10^4$
2	$2,1 \times 10^3$	$26 \times 10^4$
3	$90 \times 10^3$	$14 \times 10^4$
Promedio	$34 \times 10^3$	$20 \times 10^4$

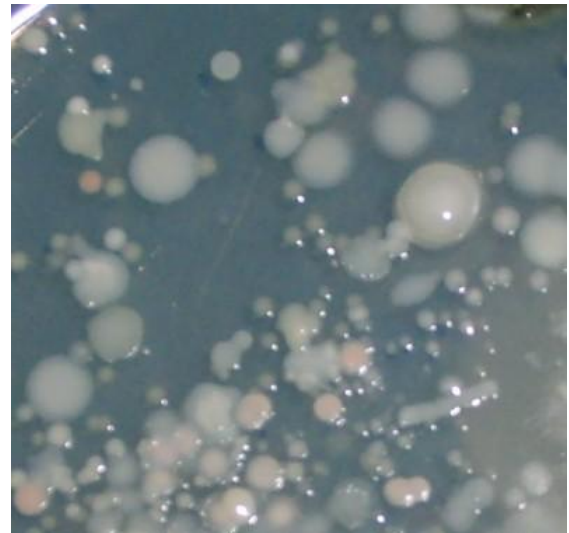
De acuerdo a los resultados anteriores, se observa un gran número de unidades formadoras de colonias tanto de mohos como de levaduras en el efluente del Reactor 3, como se presenta en la Figura 16. El crecimiento en gran cantidad de estos organismos indica que posiblemente parte de ellos producen amilasas que les permiten descomponer almidón para obtener sustancias como glucosa, maltosa y oligoelementos, así mismo, el contenido de proteínas y grasas del sustrato es adecuado. Además, los mohos y levaduras son importantes en el tratamiento de residuos ácidos, debido a que pueden tolerar ambientes con pH en un intervalo de 2-9, con un crecimiento óptimo a pH de 5.6 [26], siendo este pH ácido característico de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca.

Durante el experimento se observó la formación de una película en la parte superior de la masa líquida del reactor, lo que resulta consistente con el hecho de que los Mohos y Levaduras se desarrollan en la interfase líquido – gas.

Figura 16. Mohos y levaduras



Mohos



Levaduras

#### 4.3 BACTERIAS HETEROTRÓFICAS O MESÓFILOS

Para realizar el recuento de bacterias heterotróficas o mesófilos, se utilizó el método especificado en el Apéndice 6. Las diluciones empleadas en la prueba fueron las mismas utilizadas en la determinación de coliformes totales y fecales.

Tabla 17. Resultados para bacterias heterotróficas en UFC/ml

# Corrida	Tiempo(día)	
	0	4
1	$10 \times 10^3$	$23 \times 10^3$
2	$19 \times 10^3$	$25 \times 10^3$
3	$16 \times 10^3$	$31 \times 10^3$
<b>Promedio</b>	$15 \times 10^3$	$26 \times 10^3$

Los resultados del recuento se presentan en la Tabla 17, las unidades formadoras de colonias de bacterias heterotróficas aumentaron entre el inicio y final de la corrida. Este resultado muestra que el sistema permitió el desarrollo de una gran cantidad de microorganismos capaces de degradar polisacáridos como el almidón y las proteínas contenidas en el agua residual, además, este comportamiento muestra que los microorganismos responsables de la degradación del sustrato como mancha y almidón contenido en el agua residual proveniente de las rallanderías de yuca, pueden crecer a la temperatura ambiente de la zona, la cual es de 23°C.





Los microorganismos heterotróficos pueden utilizar azúcares, alcoholes y aminoácidos como fuente de energía. Algunos son capaces de emplear polisacáridos, como almidón y celulosa, al tener la posibilidad de hidrolizar estos compuestos hasta azúcares sencillos y de acuerdo a la composición de la mancha, más del 47% de la misma está compuesta por carbohidratos, a lo que se le suma la cantidad de almidón que no es retenido por los canales de sedimentación y que pasan a constituir parte de los sólidos contenidos en el efluente. Los aminoácidos y nucleótidos suelen constituir la fuente primaria de nitrógeno y para obtenerlos, algunos organismos son capaces de degradar proteínas, cuya cantidad en el fluente es del 22.29%. Además del carbono, los nutrientes primordiales son nitrógeno y fósforo que se incorporan como amonio o nitrato, y fosfato, compuestos que también se encuentran presentes en el agua residual.

Es importante anotar que el recuento de bacterias heterotróficas posiblemente se pueda ver afectado por la presencia de levaduras en el cultivo, porque no se utilizó antimicótico en el medio de cultivo que inhibiera el crecimiento de levaduras, de acuerdo a esto fue necesario realizar una tinción de Gram que permita diferenciar la presencia de bacterias o levaduras en las colonias seleccionadas.

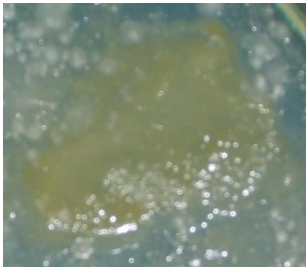
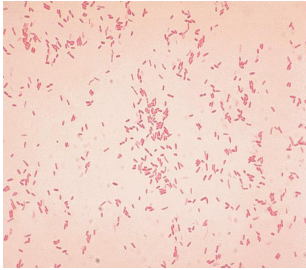
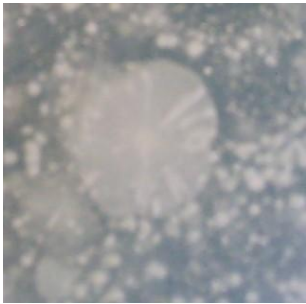
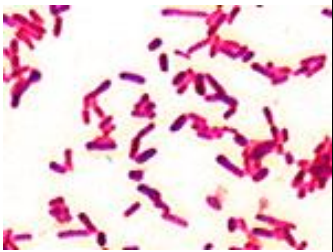
De acuerdo a los resultados obtenidos en el recuento de bacterias heterotróficas, el efluente contiene los requerimientos nutricionales para el desarrollo óptimo de estas bacterias, que además se ven favorecidas por las condiciones de pH y temperatura ambiente bajo la cual se desarrolló el estudio.

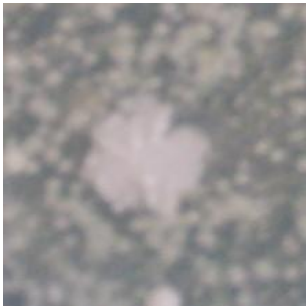


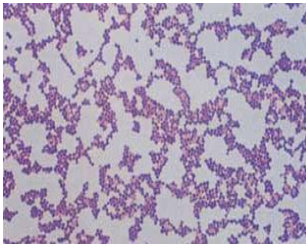
Después del recuento de bacterias heterotróficas realizado para determinar el número de unidades formadoras de colonias, se efectuó la observación de las colonias bacterianas representativas en cada una de las cajas petri que se incubaron. De acuerdo a estas observaciones se seleccionaron 4 tipos de colonias según su morfología, tamaño y color.

Las colonias mencionadas anteriormente fueron aisladas en agar nutritivo a temperatura ambiente con un tiempo de incubación de 24 horas. Tras incubar se pudieron obtener colonias aisladas y el recuento de estas colonias permitió conocer el número de células existentes en el cultivo original. Posteriormente se realizó la tinción de Gram, con el objetivo de distinguir entre varios tipos de células, diferenciar la presencia de bacterias y de levaduras, así como la reacción ante los colorantes de Gram. Para realizar la tinción de Gram se empleó el método especificado en el Apéndice 6. Esta tinción diferencial permite diferenciar dos grandes grupos de bacterias, Gram<sup>+</sup> y Gram<sup>-</sup>, según se comporte ante esta tinción. En la Tabla 18 se

presentan las características morfológicas de las colonias más representativas

Tabla 18. Características morfológicas de las colonias más representativas

Colonias	Descripción macroscópica	Forma celular	Coloración de Gram	Fotografía
A	Presenta color amarillo uniforme, plana, con borde ondulado, la colonia completa es irregular y la superficie es lisa brillante.	Bacilo pequeño no esporulado, alargado, sin agrupación.	Gram <sup>-</sup>	 <p>Colonia</p>
				 <p>Extendido</p>
B	De color blanco, la colonia es irregular, presenta los bordes rizados en forma de abanico, con elevación convexa, más grueso y blanco que el centro de la colonia y la superficie es lisa y brillante excepto por el borde.	Bacilos alargados no esporulados, agrupados en cadena.	Gram <sup>-</sup>	 <p>Colonia</p>
				 <p>Extendido</p>

Colonias	Descripción macroscópica	Forma celular	Coloración de Gram	Fotografía
C	De color blanco uniforme, irregular, plana, lisa y brillante con bordes ondulados.	Cocobacilos, agrupados en cadenas.	Gram <sup>+</sup>	 <p>Colonia</p>
				 <p>Extendido</p>
D	El borde es más blanco que el centro de la colonia, lobulado, la colonia completa presenta forma irregular y la superficie es plana, lisa y brillante.	Cocobacilos, agrupados en racimos irregulares.	Gram <sup>+</sup>	 <p>Colonia</p>
				 <p>Extendido</p>

Con el aislamiento de las colonias bacterianas se observó el crecimiento de los diferentes tipos de bacterias presentes en el efluente del reactor seleccionado y con la tinción de Gram se observaron los grupos que participan en los pasos de conversión de la materia hasta moléculas



sencillas. Entre los grupos que participan en la digestión anaeróbica se encuentran:

**Bacterias hidrolíticas:** Son un grupo de bacterias, entre las cuales se encuentran algunas especies de *Bacillus*, que rompen los enlaces complejos de las proteínas, celulosa, lignina o lípidos en monómeros o moléculas como aminoácidos, glucosa, ácidos grasos y glicerol. Estos monómeros pasarán al siguiente grupo de bacterias.

**Bacterias fermentativas acidogénicas:** Convierten azúcares, aminoácidos y lípidos en ácidos orgánicos (propiónico, fórmico, láctico, butírico o succínico), alcoholes y cetonas (etanol, metanol, glicerol, acetona), acetato,  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ . En este grupo se pueden encontrar bacterias de los géneros *Escherichia* y *Bacillus* entre otros.

**Bacterias acetogénicas:** Son bacterias sintróficas, que solo se desarrollan como productoras de  $\text{H}_2$  junto a otras bacterias consumidoras de esta molécula. Algunas se especializan en la oxidación de propionato y otras oxidan ácidos grasos que tienen de 4 a 8 átomos de carbono, convierten el propiónico, butírico y algunos alcoholes en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, el cual se utiliza en la metanogénesis.

El grupo de las bacterias metanogénicas en este reactor no se presentó debido a que tienen tasas de crecimiento muy lentas, crecen en un intervalo de pH de 6,7 y 7,4, además, la presencia de compuestos tóxicos como el cianuro inhiben las reacciones biológicas.



#### 4.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO

La reducción en términos logarítmicos del reactor en cuanto a coliformes totales es de 1.14 unidades y coliformes fecales de 1.55 unidades, los cuales se encuentran en un rango aceptable, sin embargo, se debería realizar un control más estricto de la calidad microbiológica y así aumentar la remoción de microorganismos patógenos para su uso en la actividad agrícola.

Los mohos y levaduras desempeñaron un papel importante durante todo el proceso de remoción de materia orgánica en el reactor, puesto que crecieron sobre la materia en suspensión de tipo orgánico y mineral, modificando su tamaño y forma, influyendo en la formación de sedimentos en el agua residual.

Las condiciones bajo las cuales trabajó el reactor, permitieron el crecimiento de bacterias mesófilicas, las cuales son los organismos más importantes en la descomposición y estabilización de la materia orgánica.

A pesar de que no se utilizó un antimicótico, al realizar el aislamiento de las colonias mesófilicas, no hubo presencia de levaduras, indicando que hay predominio de bacterias.

Entre las bacterias que forman parte del sistema anaeróbico del Reactor 3 se pudo encontrar anaerobias estrictas y facultativas, tanto Gram negativas, como Gram positivas.



## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Un inóculo compuesto por el Estiércol proveniente de cerdos alimentados con mancha y el Efluente de un Biodigestor que opere con agua residual de un sedimentador de almidón de yuca en una proporción volumétrica 75/25 respectivamente, permiten a través de un proceso anaeróbico el desarrollo de una microflora capaz de disminuir la carga contaminante del efluente de un sedimentador de almidón de yuca.

El inóculo así preparado produce grupos de microorganismos como coliformes, mesófilos, mohos y levaduras, los cuales son encargados de llevar a cabo el proceso de digestión anaeróbica y modificar las características de sedimentabilidad del sólido en el efluente del reactor, permitiendo de esta forma alcanzar una buena eficiencia de remoción en el sistema.

### 5.2 RECOMENDACIONES

Para futuros estudios se recomienda llevar a cabo un aislamiento de bacterias heterotróficas en medios de cultivo específico como el medio Waksman de sales minerales complementado con mancha esterilizada y otro compuesto solamente con mancha esterilizada debido a que su composición es rica en nutrientes y carbohidratos; de esta forma observar si los microorganismos aislados en este estudio son capaces de crecer en estos medios y posteriormente caracterizarlos para determinar cuales son los que específicamente degradan mancha y así mejorar la eficiencia de los sistemas anaeróbicos en el tratamiento de efluentes de la sedimentación de almidón de yuca.

Se recomienda emplear un reactor batch con un sistema de agitación que permita una mezcla homogénea que posibilite el contacto óptimo entre el sustrato y el inóculo, lo cual redundaría en unas condiciones más favorables para cumplir con la totalidad de las condiciones de un proceso tipo batch. Además, se recomienda evaluar la unidad experimental en un reactor con flujos, tanto de entrada como de salida. Otra alternativa podría emplear un reactor con lecho empacado, de esta forma, se podrían simular las condiciones de un proceso real.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ALARCÓN M, Fredy y DUFOURT, Dominique. Almidón agrario de yuca en Colombia: Producción y recomendaciones. Cali, 2000, v.1. Centro internacional de agricultura tropical, CIAT.
2. ALTAMIRANO, Claudia Patricia. Biodegradabilidad anaerobia del material en suspensión de las aguas residuales del proceso de obtención de almidón de yuca. Cali, 1995, 100 p. Trabajo de grado (Ingeniera Sanitaria). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Área de Ingeniería sanitaria y ambiental.
3. ARROYAVE, Gustavo. Factibilidad de depuración de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, utilizando un sistema de digestión anaerobia de fases separadas. Cali, 1996, 120 p. Trabajo de grado (Ingeniero Sanitario). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Área de Ingeniería sanitaria y ambiental.
4. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Waste water. American public health association. 20 ed. USA: APHA, 1998.
5. BERNAL, Elizabeth. Contribución al conocimiento del efecto del cianuro sobre los microorganismos que intervienen en el proceso anaerobio de degradación del almidón de yuca. Cali, 1996, 61 p. Trabajo de grado (Ingeniero Sanitario). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Área de Ingeniería sanitaria y ambiental.
6. CAJIGAS, Álvaro; PEREZ, Andrea y TORRES, Patricia. Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. Cali, 2002. Trabajo de grado (Ingeniero Sanitario). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Área de Ingeniería sanitaria y ambiental.

7. CARRILLO, Leonor. Microbiología agrícola.2003. Universidad Nacional de Salta. ISBN 987-9381-16-5. Disponible en: [www.unsa.edu.ar/matbib](http://www.unsa.edu.ar/matbib).
8. CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA. Manual "Rallandero Limpio": sobre el control de contaminación y producción más limpia en las rallanderías de almidón de yuca en el Departamento del Cauca. Popayán: CRC, 2005. 23 p
9. CORREAL, R. Tratamiento internacional sobre tratamiento de aguas residuales y biosólidos. Tunja: Uniboyacá, 2002.
10. CHAUX, Cesar y VERGARA, Uriel. Optimización de la sedimentación del subproducto "mancha" en el proceso de extracción de almidón agrio de yuca. Popayán, 2005, 150 p. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental). Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Programa de Ingeniería Ambiental.
11. HERNANDEZ, Aurelio. Depuración de aguas residuales. España, 927 p. Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid.
12. MINISTERIO DE SALUD PÚBLICA. Decreto 1594 de 1984, junio 26 de 1984.
13. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tesis y otros trabajos de grado. Bogotá: ICONTEC, 2007. 23 p.
14. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Protocolos para análisis de agua: Toma y preservación de muestras. Bogotá: IDEAM, 2000.
15. MANRIQUE, Javier. Evaluación del desempeño de dos biodigestores en el tratamiento de las aguas residuales en el proceso de extracción de yuca. Cali, 1999, 104 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Área de Ingeniería Química.





16. MONTGOMERY, Douglas C. Diseño de análisis de experimentos. 2ed. México D.F: Editorial Limusa, 2002. 686 p. ISBN 968-18-6156-6.
17. MORAES, M. Curso: Tratamiento de efluente de curtiembre y Tecnología limpia, Tratamiento Biológico. En memorias XI Encuentro Nacional de Químicos y Técnicos de la Industria de Cuero. Rionegro-Antioquia. 2004. 165 p.
18. OVIEDO, Odoná Omaira. Biodegradabilidad anaerobia del material soluble de las aguas residuales del proceso de obtención de almidón de yuca. Cali, 1995, 98 p. Trabajo de grado (Ingeniera Sanitaria). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Área de Ingeniería sanitaria y ambiental.
19. PACHECO, J; MAGAÑA, A, FIUADY. Arranque de un reactor anaerobio. 2003. <[http://209.85.165.104/search?q=cache:5Gcjsxg8G0J:www.uady.mx/sitios/ingenier/revista/volumen7/arranque.pdf+reactores+anaerobios+%2B+DQO&hl=es&ct=clnk&cd=1&gl=co&lr=lang\\_es](http://209.85.165.104/search?q=cache:5Gcjsxg8G0J:www.uady.mx/sitios/ingenier/revista/volumen7/arranque.pdf+reactores+anaerobios+%2B+DQO&hl=es&ct=clnk&cd=1&gl=co&lr=lang_es)>
20. PAZ, Julián Camilo y PIAMBA Anderson Hair. Evaluación de los parámetros de operación para la generación de biogás en un filtro anaerobio, proceso de almidón agrio de yuca. Popayán, 2005, 94 p. Trabajo de grado (Ingeniero Ambiental). Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Programa de Ingeniería Ambiental.
21. RHEINHEIMER, Gerhard. Microbiología de las Aguas. Zaragoza: Instituto de Oceanografía de la Universidad de Kiel. 1987. 299 p. ISBN 84-200-0614-9.
22. RIVERA, Alejandro; GUERRERO, Barbarita y NIEVES, Gertrudis. Tratamiento de efluentes de la producción de leche de soya en un filtro anaerobio a flujo pistón. México, 2004. En: Revista internacional de contaminación ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.
23. RODRIGUEZ, Jenny Alexandra. Arranque y operación de reactores anaerobios. Cali, 2001, 14 p. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería.



24. RODRIGUEZ, Jenny Alexandra; TORRES, Patricia y URIBE, Iris Eugenia. Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. En: *Scientia et Técnica: Universidad Tecnológica de Pereira*. No 23, (dic. 2003): p. 75-80. ISSN 0122-1701.
25. RODRIGUEZ, Jenny Alexandra; PEÑA Miguel y MANZI Verónica. Aplicación de una metodología innovadora para optimizar el arranque de reactores UASB que tratan aguas residuales domésticas. Cali, 2002, 20 p. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. CINARA.
26. ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. 3 ed. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000. 1238 p. ISBN 958-8060-13-3.
27. RITTMAN, Bruce. Biotecnología del medio ambiente. 1 ed. Bogotá: Mc. Graw Hill, 2001, 745 p. ISBN 84-481-3280-7.
28. SANDOVAL, Noris Viviana. Sistema agroalimentario localizado de producción de almidón agro de yuca en el Departamento del Cauca-Colombia. CIAT. Cali, Colombia.
29. TCHOBANOGLIOUS, G. CRITES, R (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. McGraw-Hill. Santa Fé de Bogotá, Colombia.
30. UNIVERSIDAD DEL VALLE, CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA. Depuración anaerobia a escala piloto de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en la región del Departamento del Cauca. Popayán: CRC, 2001.
31. VALENCIA, Marvin y VARGAS, Harold. Desempeño de un filtro anaerobio de flujo horizontal con guadua como medio de soporte en la depuración de los efluentes provenientes del proceso de extracción de almidón de yuca. Cali, 2004, 110 p. Trabajo de grado (Ingeniero Sanitaria). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Área de Ingeniería sanitaria y ambiental.



## APÉNDICES

## Apéndice 2. Gráficas de pruebas piloto

Figura 17. Variación de la DQO en la prueba piloto 1

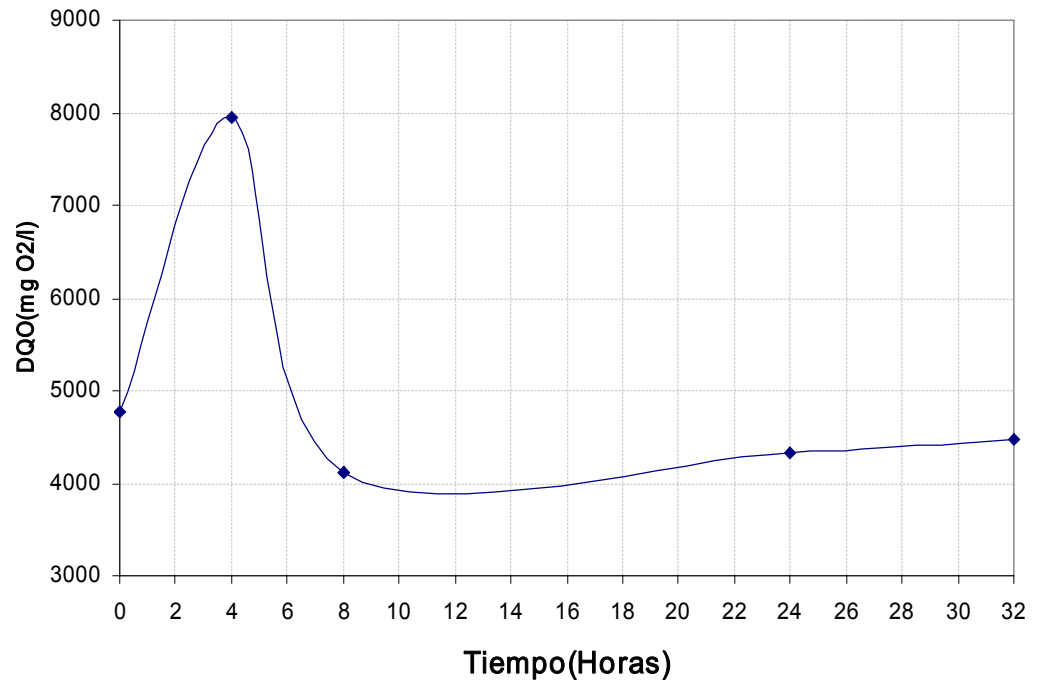
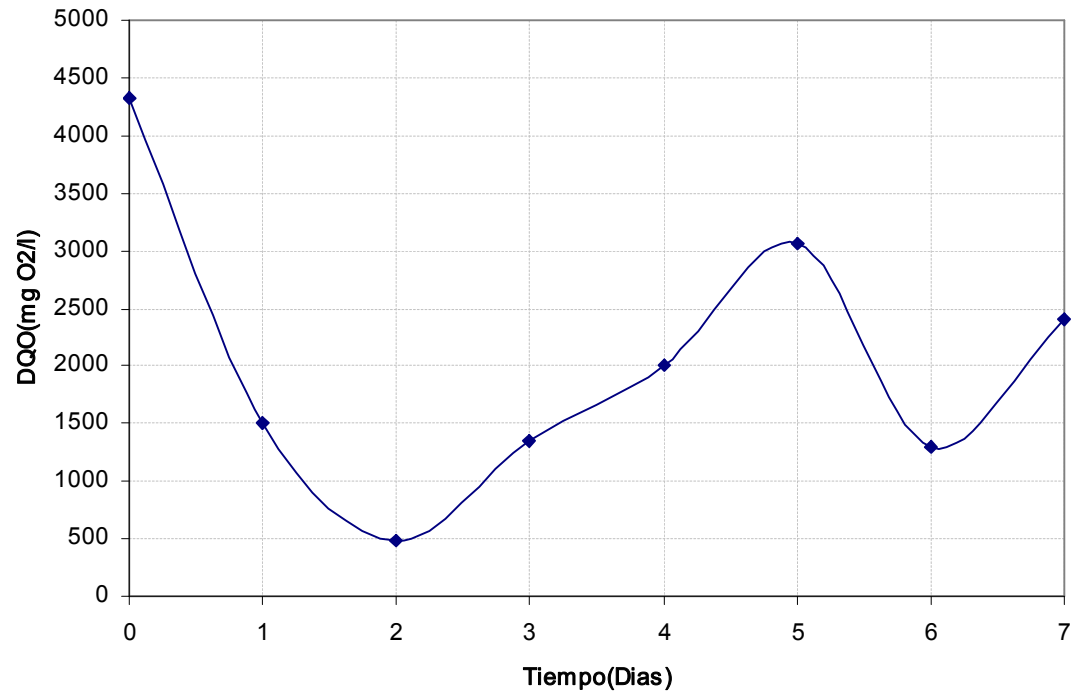


Figura 18. Variación de la DQO en la prueba piloto 2





## Apéndice 3. Datos de laboratorio

Tabla 19. Datos obtenidos para Potencial de Hidrógeno, pH

Tiempo (Días)	N° Corrida	Reactor			
		1	2	3	4
0	1	4,77	5,06	5,00	5,17
	2	4,58	4,02	-	-
	3	5,32	4,99	4,36	4,36
	4	5,57	5,38	5,17	4,77
	Promedio	5,06	4,86	4,84	4,77
	Desviación estándar (s)	0,46	0,59	0,43	0,41
	Intervalo de confianza	0,74	0,93	1,06	1,01
	Máximo	5,80	5,80	5,90	5,77
	Mínimo	4,32	3,93	3,78	3,76
1	1	-	5,00	5,00	5,02
	2	-	-	-	-
	3	4,64	3,81	3,89	3,95
	4	5,32	4,63	4,77	4,74
	Promedio	4,98	4,50	4,60	4,57
	Desviación estándar (s)	0,48	0,64	0,65	0,55
	Intervalo de confianza	1,19	1,59	1,61	1,38
	Máximo	6,17	6,09	6,21	5,95
	Mínimo	3,79	2,91	3,00	3,19
2	1	5,11	5,00	5,00	4,65
	2	-	-	3,77	3,87
	3	4,15	4,15	4,17	4,26
	4	4,89	4,74	4,72	4,95
	Promedio	4,72	4,60	4,42	4,43
	Desviación estándar (s)	0,50	0,40	0,56	0,47
	Intervalo de confianza	1,25	1,00	0,89	0,75
	Máximo	5,97	5,60	5,31	5,18
	Mínimo	3,47	3,60	3,53	3,69
3	1	5,37	5,00	5,00	5,18
	2	4,00	3,78	3,81	4,01
	3	4,48	4,05	4,39	4,66
	4	4,88	4,85	4,91	4,67
	Promedio	4,68	4,32	4,57	4,63
	Desviación estándar (s)	0,58	0,49	0,59	0,48
	Intervalo de confianza	0,93	0,78	0,95	0,76
	Máximo	5,61	5,10	5,51	5,39
	Mínimo	3,76	3,54	3,62	3,87
4	1	5,6	5,09	5,00	5,44
	2	4,14	3,78	3,78	3,91
	3	4,60	4,15	4,65	4,57
	4	5,00	4,93	4,95	-
	Promedio	4,8	4,49	4,61	4,64
	Desviación estándar (s)	0,62	0,63	0,58	0,77
	Intervalo de confianza	0,98	0,99	0,92	1,91
	Máximo	5,82	5,48	5,53	6,55
	Mínimo	3,85	3,49	3,69	2,73



Nota: Los datos que no se registraron en los diferentes parámetros fisicoquímicos fueron rechazados por la prueba Q y/o no se tomaron por dificultades técnicas en el laboratorio.

Tabla 20. Datos obtenidos para la Demanda Bioquímica de Oxígeno

Tiempo (Días)	N° Corrida	N° Reactor			
		1	2	3	4
0	1	1470,00	2352,00	1372,00	1960,00
	2	392,00	2842,00	1862,00	2450,00
	3	882,00	1862,00	1666,00	1960,00
	4	1470,00	1666,00	1470,00	1568,00
	Promedio	1053,50	2180,50	1592,50	1984,50
	Desviación estándar (s)	520,88	526,99	217,30	361,18
	Intervalo de confianza	828,19	837,91	345,51	574,28
	Máximo	1881,69	3018,41	1938,01	2558,78
	Mínimo	225,31	1342,59	1246,99	1410,22
2	1	882,00	1568,00	2058,00	1623,00
	2	1274,00	1470,00	1470,00	2548,00
	3	588,00	1568,00	1470,00	294,00
	4	1176,00	588,00	1274,00	1764,00
	Promedio	980,00	1298,50	1568,00	1557,25
	Desviación estándar (s)	309,90	475,91	339,48	935,32
	Intervalo de confianza	492,75	756,70	539,78	1487,15
	Máximo	1472,75	2055,20	2107,78	3044,40
	Mínimo	487,25	541,80	1028,22	70,10
4	1	1176,00	1666,00	588,00	1956,00
	2	1274,00	1078,00	1372,00	2646,00
	3	-	490,00	392,00	196,00
	4	1372,00	1372,00	784,00	1862,00
	Promedio	1274,00	1151,50	784,00	1665,00
	Desviación estándar (s)	98,00	502,10	423,41	1039,84
	Intervalo de confianza	243,47	798,34	673,22	1653,35
	Máximo	1517,47	1949,84	1457,22	3318,35
	Mínimo	1030,53	353,16	110,78	11,65



Tabla 21. Datos obtenidos para la Demanda Química de Oxígeno

Tiempo (Días)	N° Corrida	N° Reactor			
		1	2	3	4
0	1	4206,56	3450,40	3702,45	5466,83
	2	6184,86	6235,27	4722,95	9511,98
	3	2504,87	2353,64	2303,23	3008,98
	4	2908,16	7293,90	4118,02	3664,32
	Promedio	3951,11	4833,30	3711,66	5413,03
	Desviación estándar (s)	1656,73	2315,26	1028,20	2923,57
	Intervalo de confianza	2634,20	3681,26	1634,84	4648,47
	Máximo	6585,31	8514,56	5346,50	10061,50
	Mínimo	1316,91	1152,04	2076,82	764,56
1	1	1433,96	1200,25	-	3815,55
	2	5176,64	4500,32	3714,73	4420,48
	3	1950,35	1748,71	2353,64	2202,40
	4	3412,26	2605,69	2303,23	2857,75
	Promedio	2993,31	2513,74	2790,53	3324,05
	Desviación estándar (s)	1679,46	1445,16	800,78	986,45
	Intervalo de confianza	2670,35	2297,81	1989,40	1568,46
	Máximo	5663,65	4811,55	4779,93	4892,51
	Mínimo	322,96	215,93	801,13	1755,59
2	1	3664,32	2857,75	2656,10	3059,39
	2	5983,22	4370,07	3664,32	4823,77
	3	1899,94	1698,30	2051,17	2000,76
	4	2454,46	2605,69	2252,82	2807,33
	Promedio	3500,48	2882,95	2656,10	3172,81
	Desviación estándar (s)	1811,70	1109,42	717,65	1189,65
	Intervalo de confianza	2880,60	1763,98	1141,07	1891,54
	Máximo	6381,08	4646,93	3797,17	5064,36
	Mínimo	619,89	1118,97	1515,03	1281,27
3	1	2605,69	2857,75	2756,92	3513,09
	2	-	-	3714,73	4370,07
	3	1849,53	1799,12	2051,17	2151,99
	4	2706,51	2353,64	2504,87	2807,33
	Promedio	2387,24	2336,83	2756,92	3210,62
	Desviación estándar (s)	468,40	529,51	702,14	952,04
	Intervalo de confianza	1163,65	1315,49	1116,41	1513,74
	Máximo	3550,90	3652,33	3873,33	4724,37
	Mínimo	1223,59	1021,34	1640,52	1696,88
4	1	3160,21	3563,50	3160,21	3613,91
	2	3714,73	4017,20	3563,50	4823,77
	3	2000,76	1597,47	1748,71	1899,94
	4	3059,39	2202,40	2908,16	2908,16
	Promedio	2983,77	2845,14	2845,14	3311,44
	Desviación estándar (s)	715,88	1134,24	779,20	1229,31
	Intervalo de confianza	1138,25	1803,45	1238,92	1954,60
	Máximo	4122,02	4648,59	4084,07	5266,04
	Mínimo	1845,52	1041,69	1606,22	1356,84





Tabla 22. Datos obtenidos para los Sólidos Suspendedos Volátiles

Tiempo (Días)	N° Corrida	N° Reactor			
		1	2	3	4
0	1	335,00	575,00	570,00	365,00
	2	480,00	910,00	865,00	1320,00
	3	685,00	326,00	218,00	415,00
	4	383,33	520,00	312,00	811,54
	Promedio	470,83	582,75	491,25	727,88
	Desviación estándar (s)	154,98	242,91	290,22	442,41
	Intervalo de confianza	246,42	386,22	461,45	703,43
	Máximo	717,25	968,97	952,70	1431,32
	Mínimo	224,41	196,53	29,80	24,45
1	1	115,00	110,00	140,00	120,00
	2	110,00	70,00	114,00	115,00
	3	170,00	74,00	15,00	115,00
	4	162,00	140,00	145,00	212,86
	Promedio	139,25	98,50	133,00	116,67
	Desviación estándar (s)	31,13	33,00	16,64	2,89
	Intervalo de confianza	49,49	52,47	41,35	7,17
	Máximo	188,74	150,97	174,35	123,84
	Mínimo	89,76	46,03	91,65	109,50
2	1	175,00	105,00	40,00	58,00
	2	94,23	104,44	92,00	70,15
	3	110,00	26,00	113,16	50,00
	4	134,00	72,92	86,25	114,52
	Promedio	128,31	77,09	82,85	73,17
	Desviación estándar (s)	35,16	37,21	30,82	28,78
	Intervalo de confianza	55,91	59,17	49,01	45,77
	Máximo	184,21	136,26	131,86	118,93
	Mínimo	72,40	17,92	33,85	27,40
3	1	60,00	50,00	86,00	134,00
	2	245,00	98,00	96,00	122,00
	3	148,33	26,00	98,00	83,33
	4	120,00	104,76	98,89	111,94
	Promedio	143,33	69,69	97,63	112,82
	Desviación estándar (s)	77,14	37,98	1,48	21,63
	Intervalo de confianza	122,65	60,39	3,68	34,39
	Máximo	265,98	130,08	101,31	147,20
	Mínimo	20,69	9,30	93,95	78,43
4	1	80,00	120,00	284,00	166,00
	2	148,00	110,00	100,00	112,00
	3	180,00	23,00	55,71	51,67
	4	102,22	86,67	77,17	101,35
	Promedio	127,56	84,92	77,63	107,75
	Desviación estándar (s)	44,99	43,58	22,15	46,89
	Intervalo de confianza	71,53	69,29	55,02	74,56
	Máximo	199,09	154,20	132,65	182,32
	Mínimo	56,02	15,63	22,61	33,19

Tabla 23. Datos obtenidos para los DQO<sub>SV</sub>

	Tiempo (Días)	SSV(mg/l)	DQO <sub>SV</sub> (mg O <sub>2</sub> /l)
<b>R1</b>	0	2554,50	3627,39
	1	2319,50	3293,69
	2	1941,50	2756,93
	3	1740,00	2470,80
	4	1619,50	2299,69
<b>R2</b>	0	2853,25	4051,62
	1	1718,00	2439,56
	2	1806,25	2564,88
	3	1753,00	2489,26
	4	1581,00	2245,02
<b>R3</b>	0	2693,50	3824,77
	1	2000,00	2840,00
	2	1508,50	2142,07
	3	0,00	0,00
	4	1816,00	2578,72
<b>R4</b>	0	2367,00	3361,14
	1	0,00	0,00
	2	1496,00	2124,32
	3	0,00	0,00
	4	1748,33	2482,63

Nota: El factor de conversión 1,42, de SV a DQO se estimó para una composición química promedio del sólido de C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>O<sub>2n</sub>



Tabla 24. Datos obtenidos para los Ácidos Grasos Volátiles (mg HAc/l)

Tiempo (Días)	N° Corrida	N° Reactor			
		1	2	3	4
0	1	278,02			
	2	351,18			
	3	577,98			
	4	212,17			
	Promedio	354,84			
	Desviación estándar (s)	159,23			
	Intervalo de confianza	253,18			
	Máximo	608,01			
	Mínimo	101,66			
2	1	278,02	210,00	1324,24	219,49
	2	607,25	724,31	561,81	738,94
	3	336,55	336,55	321,92	431,66
	4	409,71	958,43	1309,61	1000,00
	Promedio	407,88	557,32	879,39	597,52
	Desviación estándar (s)	143,42	345,52	514,66	342,74
	Intervalo de confianza	228,03	549,37	818,31	544,95
	Máximo	635,91	1106,69	1697,70	1142,48
	Mínimo	179,85	7,95	61,09	52,57
4	1	263,39	278,02	1170,60	944,80
	2	402,39	702,36	417,03	417,03
	3	812,10	585,30	307,28	395,08
	4	1150,00	643,83	709,68	804,79
	Promedio	656,97	552,38	651,15	640,42
	Desviación estándar (s)	402,85	189,05	385,71	276,74
	Intervalo de confianza	640,53	300,58	613,28	440,02
	Máximo	1297,50	852,96	1264,42	1080,45
	Mínimo	16,44	251,79	37,87	200,40

Tabla 25. Datos obtenidos para Cianuro

Tiempo (Días)	N° Corrida	N° Reactor			
		1	2	3	4
0	1	2,80	2,80	2,80	2,80
	2	2,60	2,60	2,60	2,60
	Promedio	2,70	2,70	2,70	2,70
2	1	3,00	-	3,80	3,60
	2	5,40	5,00	4,00	5,00
	Promedio	4,20	5,00	3,90	4,30
4	1	3,60	2,40	3,60	3,20
	2	3,40	5,20	4,60	5,20
	Promedio	3,50	3,80	4,10	4,20



Tabla 26. Datos obtenidos para Temperatura

Tiempo (Días)	N° Corrida	N° Reactor			
		1	2	3	4
0	3	19,00	19,00	17,00	17,00
	4	19,00	19,00	19,00	19,00
	Promedio	19,00	19,00	18,00	18,00
	Desviación estándar (s)	0,00	0,00	1,41	1,41
	Intervalo de confianza	0,00	0,00	4,30	4,30
	Máximo	19,00	19,00	22,30	22,30
	Mínimo	19,00	19,00	13,70	13,70
1	3	20,00	20,00	22,00	23,00
	4	20,50	20,00	20,50	22,00
	Promedio	20,25	20,00	21,25	22,50
	Desviación estándar (s)	0,35	0,00	1,06	0,71
	Intervalo de confianza	1,08	0,00	3,23	2,15
	Máximo	21,33	20,00	24,48	24,65
	Mínimo	19,17	20,00	18,02	20,35
2	3	22,00	22,00	20,50	24,00
	4	21,00	22,00	20,00	23,50
	Promedio	21,50	22,00	20,25	23,75
	Desviación estándar (s)	0,71	0,00	0,35	0,35
	Intervalo de confianza	2,15	0,00	1,08	1,08
	Máximo	23,65	22,00	21,33	24,83
	Mínimo	19,35	22,00	19,17	22,67
3	3	22,00	22,00	22,00	24,00
	4	21,00	22,00	22,00	24,00
	Promedio	21,50	22,00	22,00	24,00
	Desviación estándar (s)	0,71	0,00	0,00	0,00
	Intervalo de confianza	2,15	0,00	0,00	0,00
	Máximo	23,65	22,00	22,00	24,00
	Mínimo	19,35	22,00	22,00	24,00
4	3	22,00	22,00	22,00	24,00
	4	22,00	25,00	22,00	24,00
	Promedio	22,00	23,50	22,00	24,00
	Desviación estándar (s)	0,00	2,12	0,00	0,00
	Intervalo de confianza	0,00	6,45	0,00	0,00
	Máximo	22,00	29,95	22,00	24,00
	Mínimo	22,00	17,05	22,00	24,00



Tabla 27. Datos obtenidos para la ST

Tiempo (Días)	N° Corrida	N° Reactor			
		1	2	3	4
0	1	2673,00	2710,00	2461,00	2327,00
	2	3645,00	4465,00	4487,00	4081,00
	3	2664,00	1743,00	1971,00	1904,00
	4	3066,00	4033,00	3105,00	2967,00
	Promedio	3012,00	3237,75	3006,00	2819,75
	Desviación estándar (s)	461,75	1245,17	1091,09	947,60
	Intervalo de confianza	734,18	1979,82	1734,83	1506,68
	Máximo	3746,18	5217,57	4740,83	4326,43
	Mínimo	2277,82	1257,93	1271,17	1313,07
2	1	2210,00	2240,00	2275,00	2229,00
	2	3273,00	2843,00	1773,00	1774,00
	3	1874,00	1641,00	1508,00	1769,00
	4	2375,00	2138,00	2300,00	1967,00
	Promedio	2433,00	2215,50	1964,00	1934,75
	Desviación estándar (s)	597,54	493,43	389,03	216,75
	Intervalo de confianza	950,09	784,55	618,56	344,63
	Máximo	3383,09	3000,05	2582,56	2279,38
	Mínimo	1482,91	1430,95	1345,44	1590,12
4	1	3160,21	-	2243,00	1918,00
	2	2796,00	2300,00	2428,00	2436,00
	3	1370,00	-	1375,00	1608,00
	4	1953,00	2069,00	-	-
	Promedio	2319,80	2184,50	2015,33	1987,33
	Desviación estándar (s)	810,29	163,34	562,21	418,33
	Intervalo de confianza	1288,36	1467,54	1396,71	1039,28
	Máximo	3608,17	3652,04	3412,04	3026,61
	Mínimo	1031,44	716,96	618,62	948,06



Tabla 28. Datos obtenidos para la SV

Tiempo (Días)	N° Corrida	N° Reactor			
		1	2	3	4
0	1	2214,00	2312,00	2542,00	1898,00
	2	3189,00	4109,00	4038,00	3604,00
	3	2218,00	1387,00	1617,00	1465,00
	4	2597,00	3605,00	2577,00	2501,00
	Promedio	2554,50	2853,25	2693,50	2367,00
	Desviación estándar (s)	459,55	1236,24	1000,51	927,67
	Intervalo de confianza	730,69	1965,62	1590,81	1474,99
	Máximo	3285,19	4818,87	4284,31	3841,99
	Mínimo	1823,81	887,63	1102,69	892,01
2	1	1798,00	1786,00	1796,00	1779,00
	2	2688,00	2399,00	1256,00	1228,00
	3	1421,00	1290,00	1136,00	
	4	1859,00	1750,00	1846,00	1481,00
	Promedio	1941,50	1806,25	1508,50	1496,00
	Desviación estándar (s)	534,04	455,13	364,73	275,81
	Intervalo de confianza	849,12	723,66	579,91	685,20
	Máximo	2790,62	2529,91	2088,41	2181,20
	Mínimo	1092,38	1082,59	928,59	810,80
4	1	0,00	0,00	1792,00	1493,00
	2	1725,00	1500,00	2025,00	1985,00
	3	0,00	0,00	-	-
	4	1514,00	1662,00	1631,00	1767,00
	Promedio	1619,50	1581,00	1816,00	1748,33
	Desviación estándar (s)	149,20	114,55	198,09	246,53
	Intervalo de confianza	1340,48	1029,19	492,13	612,47
	Máximo	2959,98	2610,19	2308,13	2360,80
	Mínimo	279,02	551,81	1323,87	1135,87

Tabla 29. Resultados para la Demanda Química de Oxígeno en la corrida final

Tiempo (días)	DQO(mg O <sub>2</sub> /l)
0	5831,99
1	5025,41
2	3412,26
3	2605,69
4	1899,94
5	4017,20
6	6033,63
7	7394,72
9	4370,07
10	4823,77
14	4722,95
15	6184,86
18	5428,70
19	5831,99
20	5126,23

## Apéndice 4. Gráficas de AGV y pH para los reactores 1 a 4

Figura 19. Comportamiento de los AGV: (A) Reactor 1, (B) Reactor 2, (C) Reactor 3, (D) Reactor 4

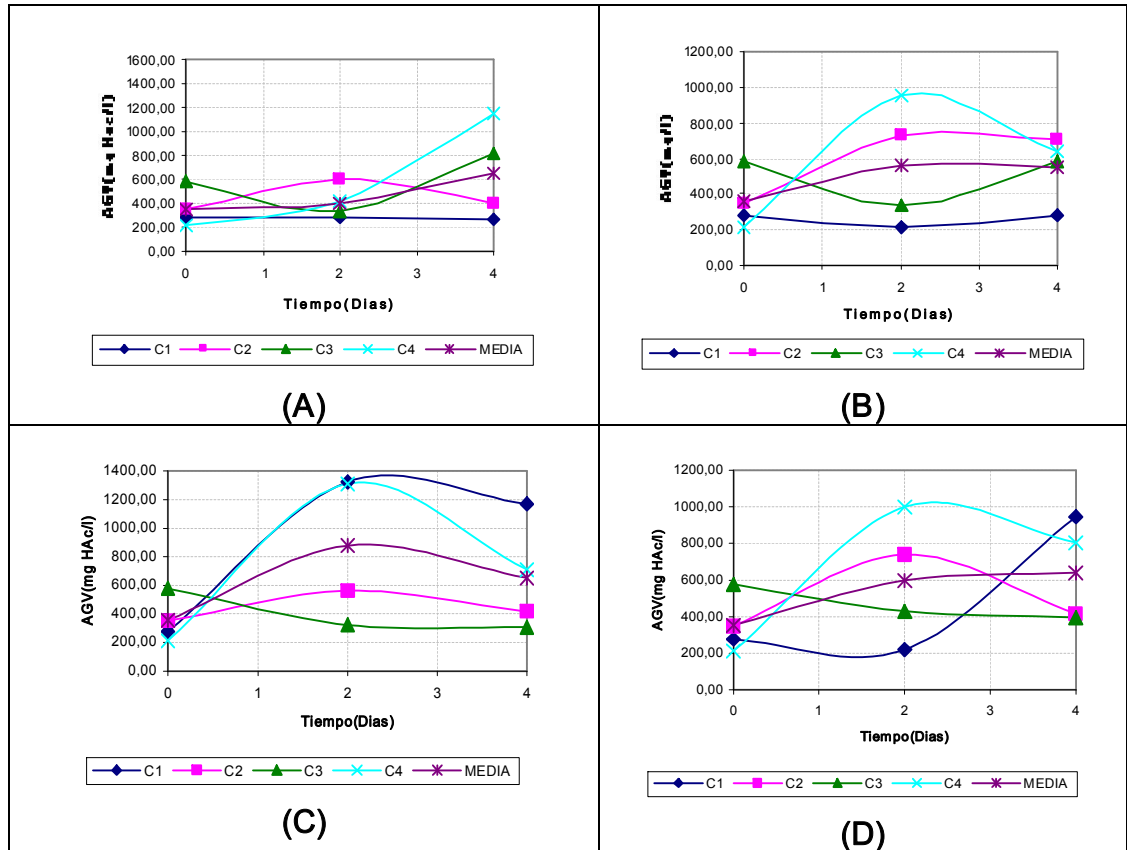




Figura 20. Comportamiento del pH: (A) Reactor 1, (B) Reactor 2, (C) Reactor 3, (D) Reactor 4

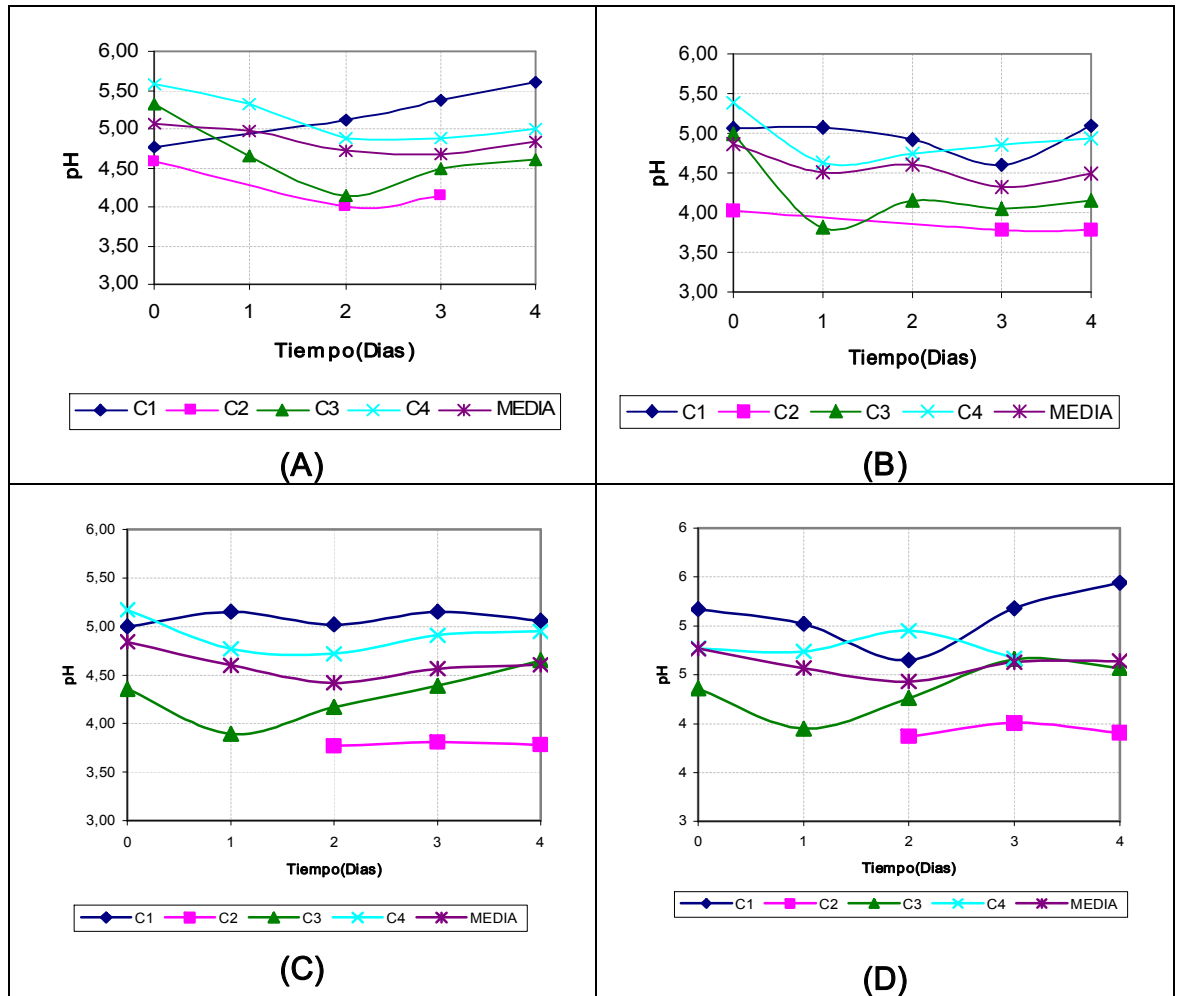
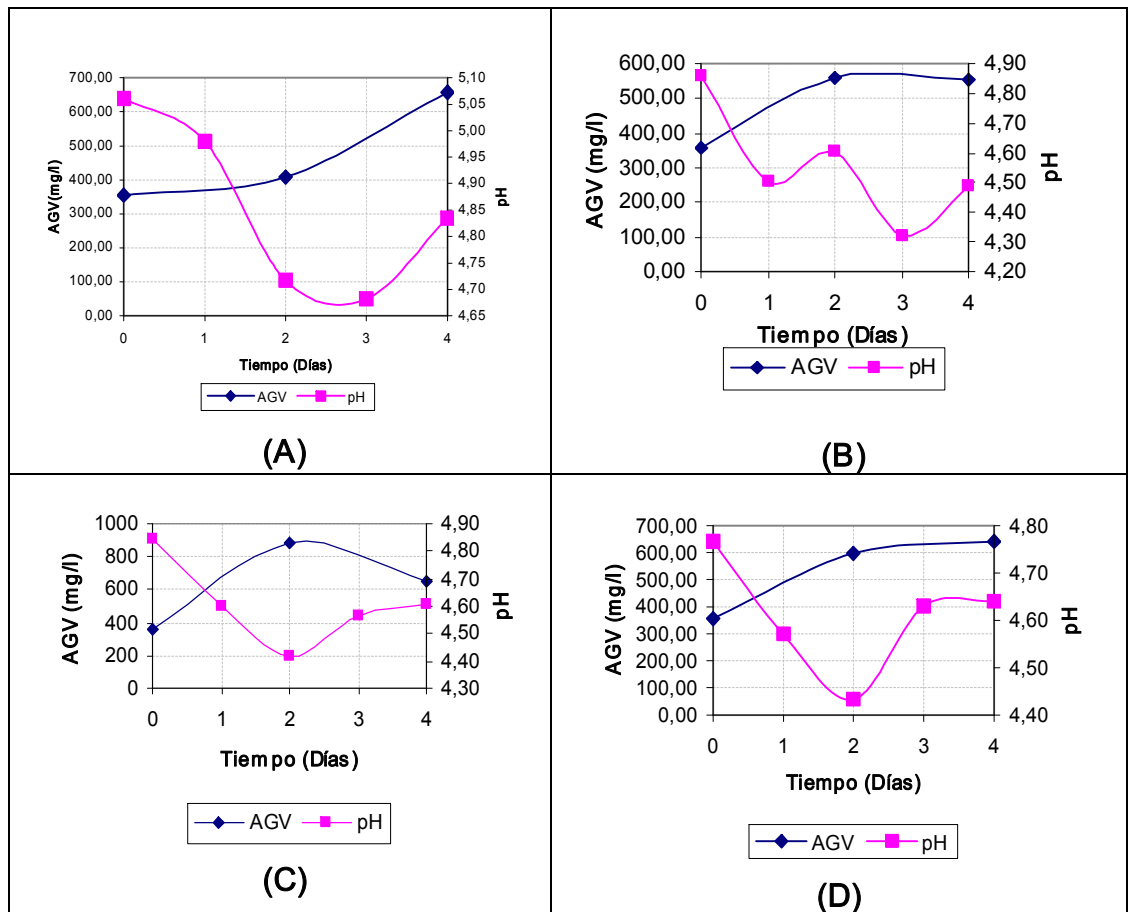






Figura 21. Relación entre AGV y pH: (A) Reactor 1, (B) Reactor 2, (C) Reactor 3, (D) Reactor 4





## Apéndice 5. Métodos de análisis fisicoquímico

- **Sólidos suspendidos totales**

La determinación de los sólidos suspendidos totales se realizó de acuerdo con el método 2540 D del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [4].

- **Sólidos Totales**

Una muestra bien mezclada es evaporada en una cápsula tarada y secada a peso constante en un horno a 103-105°C. El incremento de peso sobre la cápsula vacía representa el residuo total o sólidos totales. Para el cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{mg /L de sólidos totales} = \frac{A - B}{C} \times 1000 \quad [3]$$

Donde,

- A** = Peso de la cápsula más sólidos (mg)
- B** = Peso de la cápsula vacía (mg)
- C** = Volumen de muestra evaporada (ml).

- **Sólidos Suspendidos**

Se filtra un volumen de agua seleccionado de acuerdo a la turbiedad a través de un filtro de fibra de vidrio de tamaño de poro de 1.2  $\mu$ m y el peso del material retenido por el filtro se determina por diferencia de peso.

- **Sólidos Volátiles**

Se basa en la calcinación de los sólidos totales presentes en una muestra a 550  $\pm$  50°C durante 1 hora. La diferencia entre el peso de los sólidos totales y el peso del residuo después de la calcinación da como resultado los sólidos volátiles. Para el cálculo se utiliza la siguiente expresión:



$$\text{mg /L de sólidos volátiles} = \frac{A-B}{C} * 1000 \quad [4]$$

Donde,

- A = Peso en mg de los sólidos totales
- B = Peso en mg de los sólidos fijos
- C = Volumen de muestra (ml).

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La DQO fue realizada por digestión ácida de las muestras y lectura de absorbancia en el espectrofotómetro. Se usó una curva de calibración según el rango de las muestras, en términos de concentración de carga orgánica para la lectura de la DQO en mg O<sub>2</sub>/L. La determinación de la DQO se realizó con la siguiente expresión:

$$Y = 3.9674E-4 * X + 1.3109E-3 \quad [5]$$

Donde Y es el valor reportado como absorbancia a 600 nm para la muestra digerida, y X es el valor de la DQO en mg/l. Las muestras muy concentradas que superan el rango de lectura de la curva de calibración, fueron diluidas y el factor de dilución se multiplicó por el valor de lectura obtenido con la fórmula matemática.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

La prueba de la DBO se realizó por el procedimiento 5210 B del Standard Methods [4], prueba biológica por incubación de las muestras 5 días. Para el cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{mg/L de DBO5} = \frac{(V_{IT} - V_{FT}) * \text{factor T} * 300}{0.1ml} \quad [6]$$

Donde,

- V<sub>IT</sub> = Volumen inicial de tiosulfato
- V<sub>FT</sub> = Volumen final de tiosulfato
- Factor T = Normalidad del tiosulfato

- **pH**

Este parámetro se midió directamente en el punto de muestreo y en las muestras que se extraían de cada reactor para el estudio. Las medidas se



tomaron con un electrodo Handylab y las calibraciones se realizaron con disoluciones tampón estándar de pH 7.00 y 4.00 a 20 °C. la resolución de la lectura es 0.01 unidades de pH y la precisión de  $\pm 0.01$ .

- **Ácidos Grasos Volátiles**

La determinación de ácidos grasos volátiles (AGV) se realizó por destilación, según lo especificado en el Standard Methods [4], procedimiento 5560 C. El método fue implementado en el laboratorio adaptándolo al material disponible. El método de destilación es empírico y da una recuperación incompleta y en cierto modo variable. Para el cálculo se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{mg de ácidos volátiles como ácido acético/L} = \frac{\text{ml NaOH} * \text{N} * 60000}{\text{ml de la muestra} * f} \quad [7]$$

Donde,

**N** = normalidad del NaOH, y

**f** = factor de recuperación

- **Cianuro**

La determinación de cianuro ( $\text{CN}^-$ ) se realizó por destilación de acuerdo al procedimiento 4500 C del Standard Methods [4]. Para el cálculo se utilizó la siguiente expresión:

$$\text{mg CN}^- /\text{L} = \frac{(A-B)*1000}{\text{ml muestra}} \quad [8]$$

Donde:

A = ml de titulante utilizados en la muestra

B = ml de titulante utilizados en el blanco



## Apéndice 6. Métodos de análisis Microbiológico

- **COLIFORMES TOTALES**

La determinación de coliformes totales se realizó por el método de filtración por membrana, según lo especificado en el Standard Methods [4], procedimiento 9222 B. El medio de cultivo empleado en la prueba fue Lauril Sulfato. Para determinar el número de unidades formadoras de colonias, se realizó el recuento de las colonias aparecidas, cuyo número debía encontrarse entre 30 y 300 para la validez del resultado. Este número fue expresado en UFC por 100 ml y se calculó con la expresión:

$$UFC/100ml = \frac{N^{\circ} Colonias}{Dilución * Vol.muestra} * 100 \quad [9]$$

- **COLIFORMES FECALES**

La determinación de coliformes fecales se realizó por el método de filtración por membrana, según lo especificado en el Standard Methods [4], procedimiento 9222 D. El medio de cultivo empleado en la prueba fue Lauril Sulfato. El número de unidades formadoras de colonias se determinó de la misma forma que para las coliformes totales y el cálculo se realizó con la ecuación [9].

- **BACTERIAS HETEROTRÓFICAS Ó MESÓFILOS**

Las bacterias heterotróficas fueron determinadas según lo especificado en el Standard Methods [4], procedimiento 9215 B. el medio de cultivo empleado fue agar cuentagérmenes. Se realizó el recuento de las colonias para cada una de las diluciones realizadas y los datos se tomaron de aquellas diluciones que tuvieron entre 30 y 300 UFC. El cálculo de las UFC fue realizado con la ecuación [9].

- **HONGOS Y LEVADURAS**

La determinación de hongos y levaduras se realizó según lo especificado en el Standard Methods [4], procedimiento 9610 B. El medio de cultivo empleado fue PDA y la incubación se realizó por 7 días a temperatura ambiente. Los resultados se calcularon de la misma forma que para las anteriores mediciones.



- **TINCION DE GRAM**

La tinción de Gram se desarrolló según lo especificado en el Standard Methods [4], procedimiento 9221 B.