

**Análisis comparativo de las lagunas de
estabilización de la EAP, bajo condiciones
anaerobias con fines energéticos**

Marcela Raquel Martínez Meyer

Zamorano, Honduras

Diciembre, 2008

ZAMORANO
CARRERA DE DESARROLLO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTE

Análisis comparativo de las lagunas de estabilización de la EAP, bajo condiciones anaerobias con fines energéticos

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniera en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente
en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por:

Marcela Raquel Martínez Meyer

Zamorano, Honduras
Diciembre, 2008

Análisis comparativo de las lagunas de estabilización de la EAP, bajo condiciones anaerobias con fines energéticos

Presentado por:

Marcela Raquel Martínez Meyer

Aprobado:

Carlos Enrique Quiroz, M.Sc.
Asesor Principal

Arie Sanders, M.Sc.
Director
Carrera Desarrollo
Socioeconómico y Ambiente

Erika Tenorio, M.Sc.
Asesora

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.
Rector

RESUMEN

Martínez, M. 2007. Análisis Comparativo de las lagunas de estabilización de la EAP, bajo condiciones anaerobias con fines energéticos. Proyecto de graduación del programa de Ingeniería en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras.70p.

Las lagunas de estabilización de la EAP se encuentran bajo un sistema facultativo que genera gases de efecto invernadero, que podrían ser aprovechados. Actualmente la eficiencia de remoción del sistema es del 97% DBO y 82% DQO. El objetivo general es evaluar de manera comparativa la producción de biogás y eficiencia de remoción de materia orgánica: DBO y DQO bajo un sistema anaerobio. Se utilizó la ecuación de desechos líquidos industriales del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, para estimar generación de biogás y un modelo físico para evaluar la eficiencia de remoción de los parámetros de materia orgánica bajo DBO y DQO. Se midió el caudal promedio de las lagunas y las cargas orgánicas del mismo. Se obtuvo un caudal promedio de 603.6 m³/día, con cargas promedios de 508.7 mg/L en cuanto a DBO y 750.4 mg/L DQO. A partir de esto se procedió a estimar la producción de biogás bajo ambos parámetros. Con relación a DBO, se estimó una producción neta de 387.0 Mwh/año y bajo DQO de 173.0 Mwh/año. La producción bajo el sistema anaerobio es mayor que bajo las condiciones actuales en que no se aprovecha el gas. En el modelo físico se evaluaron distintos escenarios, 15 días, 30 días, 40 días y 50 días. Se presentó la mejor eficiencia en cuanto a remoción de materia orgánica expresada como DBO y DQO en el día 40. Al extrapolar el comportamiento de los datos históricos de las lagunas, asumiendo las mismas entradas y la misma eficiencia de remoción de la laguna No. 2. Bajo DBO el peor escenario fue el del día 50, ya que el sistema se encontraba saturado y bajo DQO el peor escenario fue el del día 15, ya que esta materia orgánica es más difícil de degradar por lo cual requiere mayor tiempo de reposo para degradarse.

Palabras clave: ingeniería ambiental, aguas residuales, lagunas de estabilización, oxidación anaerobia, DBO, DQO.

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Gráficas, Figuras, Cuadros y Anexos.....	v
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
5 CONCLUSIONES	65
6 RECOMENDACIONES.....	66
7 BIBLIOGRAFÍA.....	67
8 ANEXOS.....	68

ÍNDICE DE GRÁFICAS, FIGURAS, CUADROS Y ANEXOS

Gráfica	Página
1. Sólidos Totales. Fuente: Metcalf & Eddy (1996), adaptado por la autora.....	5
2. Oxidación Aerobia Fuente: Romero (1999) adaptado por la autora.	9
3. Etapas de la Oxidación Anaerobia.Fuente: Metcalf & Eddy (2003) adaptado por la autora.	10
4. Funcionamiento de Lagunas de Estabilización. Fuente: Oakley (2005).....	11
Figura	Página
1. Caudal semanal de las lagunas de estabilización durante la época seca.....	19
2. Caudal de la época seca día lunes.....	20
3. Caudal de época seca día martes.....	21
4. Caudal de época seca día miércoles.....	22
5. Caudal de época seca día jueves.....	22
6. Caudal de época seca día viernes.....	23
7. Caudal de época seca día sábado.....	23
8. Caudal de época seca día domingo.....	24
9. Caudal semanal de las lagunas de estabilización durante época lluviosa.....	24
10. Caudal de época lluviosa del día lunes.....	25
11. Caudal de época lluviosa del día martes.....	26
12. Caudal de época lluviosa del día miércoles.....	26
13. Caudal de época lluviosa del día jueves.....	27
14. Caudal de época lluviosa del día viernes.....	27
15. Caudal de época lluviosa del día sábado.....	28
16. Caudal de época lluviosa del día domingo.....	28
17. Caudal lagunas de estabilización, durante la época seca y lluviosa.....	29
18. Caudal diario, comparación diaria entre la época seca y lluviosa.....	29

19.	Promedio anual de carga orgánica de las aguas residuales, bajo dos parámetros: DBO y DQO.....	32
20.	Eficiencia en remoción de parámetros de DBO y DQO bajo los diferentes escenarios.....	43
21.	Escenario 1 (15 días) Salida 2 (S2).....	44
22.	Escenario 1 (15 días) Salida 4 (S4).....	45
23.	Escenario 1(15 días) Salida 5 (S5).....	46
24.	Escenario 2(30 días) Salida 2 (S2).....	47
25.	Escenario 2 (30 días) Salida 4 (S4).....	47
26.	Escenario 2 (30 días) Salida 5 (S5).....	48
27.	Escenario 3(40 días) Salida 2 (S2).....	49
28.	Escenario 3(40 días) Salida 4 (S4).....	50
29.	Escenario 3(40 días) Salida 5 (S5).....	50
30.	Escenario 4(50 días) Salida 2 (S2).....	52
31.	Escenario 4(50 días) Salida 4 (S4).....	53
32.	Escenario 4(50 días) Salida 5 (S5).....	53
33.	Escenario 1(15 días) Salida 2 (S2).....	55
34.	Escenario 1 (15 días) Salida 4 (S4).....	55
35.	Escenario 1 (15 días) Salida 5 (S5).....	56
36.	Escenario 2 (30 días) Salida 2 (S2).....	58
37.	Escenario 2 (30 días) Salida 4 (S4).....	58
38.	Escenario 2 (30 días) Salida 5 (S5).....	59
39.	Escenario 3(40 días) Salida 2 (S2).....	60
40.	Escenario 3 (40 días) Salida 4 (S4).....	60
41.	Escenario 3 (40 días) Salida 5 (S5).....	61
42.	Escenario 4 (50 días) Salida 2 (S2).....	63
43.	Escenario 4 (50 días) Salida 4 (S4).....	63
44.	Escenario 4 (50 días) Salida 5 (S5).....	64

Cuadro	Página	
1.	Caudal época seca.....	20
2.	Caudal época lluviosa.....	25
3.	Análisis de laboratorio de muestras compuestas de la época seca y lluviosa.....	31
4.	Producción de biogás época seca considerando DBO.....	33
5.	Producción de biogás época lluviosa considerando DBO.....	33

6.	Estimaciones de biogás, tomando un promedio de las posibles producciones bajo la Metodología del IPCC bajo el parámetro de DBO.	34
7.	Estimaciones de biogás, considerando posibles pérdidas del sistema.	34
8.	Producción de biogás época seca considerando DQO.	35
9.	Producción de biogás época lluviosa considerando DQO.	35
10.	Estimaciones de biogás, tomando un promedio de las posibles producciones bajo la metodología del IPCC.	36
11.	Estimaciones de biogás, considerando posibles pérdidas del sistema.	36
12.	Producción de CH ₄ bajo el parámetro de DBO, para ambos sistemas: facultativo y anaerobio.	37
13.	Producción de CH ₄ bajo el parámetro de DQO, para ambos sistemas: facultativo y anaerobio.	37
14.	Volumen promedio de gas a partir de DBO.	38
15.	Volumen promedio de gas a partir de DQO.	38
16.	Tiempo de retención hidráulica de las lagunas No 1 y No 2 durante la época seca.	39
17.	Tiempo de retención hidráulica de las lagunas No 1 y No 2 durante la época lluviosa.	39
18.	Simulación de flujo de agua de las lagunas en el modelo físico/época seca.	40
19.	Simulación de flujo de agua de las lagunas en el modelo físico/época lluviosa.	40
20.	Entradas y salidas modelo físico en distintos escenarios.	41
21.	Eficiencia de remoción de NMP coliformes totales.	41
22.	Eficiencia de remoción de DBO.	42
23.	Eficiencia de remoción de DQO.	42
24.	Eficiencia de remoción NTK.	43
25.	Escenario 1 (15 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).	44
26.	Escenario 2 (30 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).	46
27.	Escenario 3 (40 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).	49
28.	Escenario 4 (50 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).	51
29.	Escenario 1 (15 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).	54
30.	Escenario 2 (30 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).	57

31. Escenario 3 (40 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).....	59
32. Escenario 4 (50 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).....	62

Anexo	Página
1. Análisis de laboratorio de las muestras compuestas durante época seca y lluviosa....	68
2. Producción de biogás considerando pérdida de metano bajo parámetro de DBO.	69
3. Producción de biogás considerando pérdida de metano bajo parámetro de DQO.	70

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La explosión demográfica de los últimos años ha causado una mayor presión sobre los recursos naturales, las metrópolis han crecido a un ritmo acelerado que muchas veces no va acompañado por una adopción de nuevas tecnologías, en cuanto al manejo de los desechos sólidos urbanos y el manejo de aguas residuales. Se agrava la situación con la dependencia de petróleo de muchos países, por ello se están llevando a cabo intensas investigaciones en la búsqueda de nuevas alternativas energéticas.

El tema de manejo de aguas residuales es un tema de gran importancia para las grandes ciudades en vías de desarrollo. El tratamiento de aguas residuales urbanas con lagunas de estabilización, es un método muy usado en los países del trópico debido a las condiciones favorables que estos presentan, debido a las temperaturas altas y la intensidad solar. Según Peña (2003), el tratamiento de aguas residuales más costo-efectivo para la remoción de microorganismos patógenos por medios de una desinfección natural, son las lagunas de estabilización. Las lagunas de estabilización son una alternativa, que bajo condiciones anaerobias produce metano que puede ser aprovechado como biogás, éste es producido por la descomposición de materia orgánica en la ausencia de oxígeno y puede ser usado como una alternativa de combustible a bajo costo para los países en vías de desarrollo.

En países desarrollados como los EE.UU. “la producción del gas por manejo de aguas residuales es menor al 10% del total generado por desechos” (Solórzano, 2001). Los países en vías de desarrollo lamentablemente no cuentan siempre con la información pertinente para evaluar las alternativas de aprovechamiento de biogás. Los beneficios de un aprovechamiento de biogás son muchos, ya que ésta es una alternativa sostenible de energía y a la vez disminuye las emisiones a la atmósfera que contribuyen al calentamiento global. Este biogás puede ser aprovechado al contar con lagunas de estabilización.

En el caso de Honduras se ha observado un aumento en la producción de metano por parte de los residuos líquidos, específicamente proveniente de lagunas de estabilización que ha aumentado de 0.38% de la producción total en el 2000, a 2.59% en el 2005 (Quiroz, 2007).

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El incremento de la temperatura global es un suceso que ha venido aconteciendo desde el siglo XIX, un acontecimiento visible por ser el ser humano y que está ejerciendo un gran impacto en el mundo por el aumento de temperaturas. Según Solórzano (2001), el incremento de temperatura se debe a los llamados gases de efecto invernadero, del cual se le atribuye a emisiones de origen antropogénico el 50%. Estos incluyen: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6). “Aunque el principal contribuyente individual es el CO_2 , se ha encontrado que el CH_4 puede ser 21 veces más potente que el CO_2 como atrapador de calor” (Solórzano, 2001).

Zamorano es una institución de enseñanza superior sin fines de lucro que constantemente busca un aprovechamiento sostenible de sus recursos. La institución comenzó como una escuela agrícola en el año 1946 y luego fue reconocida como universidad, actualmente se alberga alrededor de 1,050 estudiantes, adicionalmente existe un campus residencial para docentes, oficinas administrativas, plantas de producción agroindustrial, servicios, un centro de convenciones, cultivos y áreas de uso recreacional. Como toda actividad humana la universidad demanda recursos hídricos para su operación y subsistencia de la comunidad que en consecuencia genera aguas de desecho. Durante la década de los 80's, la responsabilidad ambiental que ha caracterizado a Zamorano la orientó a implementar una alternativa viable para el tratamiento de las aguas residuales producidas por la institución, conformando cinco lagunas de estabilización y humedales, de las cuales las dos primeras operan en paralelo y las otras tres operan en serie. Estas fueron construidas en un área alejada del campus central.

Las aguas residuales drenan hacia estas lagunas de estabilización con Demandas Bioquímicas de Oxígeno (DBO) y Demandas Químicas de Oxígeno (DQO) de 508.73mg/L y 750.45 mg/L respectivamente, destinando en su estado final de depuración para el riego de cultivos experimentales y vertido al río Yeguaré, esto bajo valores normales y una eficiencia de remoción en el sistema del 97% de la DBO y del 82% de la DQO. Bajo las condiciones actuales se generan gases de efecto invernadero como el CO_2 y el CH_4 en menor proporción, sin embargo se pretende evaluar el incremento del CH_4 y la eficiencia de remoción de la DBO y DQO a través de un tratamiento anaeróbico para el aprovechamiento del biogás con fines energéticos.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Se pretende desarrollar un análisis comparativo de la producción de biogás y eficiencia en remoción de DBO y DQO por parte de las lagunas de estabilización de Zamorano en condiciones anaerobias, para conocer la eficiencia en relación a las condiciones actuales bajo un metabolismo facultativo. Actualmente se está haciendo un inventario de gases de efecto invernadero procedentes de las lagunas de estabilización. Sin embargo, se desconoce el comportamiento que éstas tendrían bajo un metabolismo anaerobio con fines energéticos.

Conocer la posible eficiencia de las lagunas de estabilización bajo condiciones anaerobias es de gran utilidad para Zamorano. La universidad es reconocida por mantener a la vanguardia las tecnologías en temas agrícolas y de igual forma aspira a sistemas más eficientes que integren la reducción de gases de efecto invernadero en el manejo de aguas residuales. El manejo de desechos sólidos y depuración de aguas residuales en Zamorano es un tema primordial para la institución de acuerdo a los impactos en su entorno ambiental y la formación académica de sus estudiantes, actualmente éste manejo es coordinado por el Programa de Manejo Ambiental (Eco-Zamorano) en la Dirección de Planta Física.

No se cuenta con información local sobre las cantidades emitidas de CH_4 por parte del manejo de aguas de Zamorano. Contar con esta información es de gran valor para una determinación del manejo y aprovechamiento que se podría hacer del biogás para su uso directo como gas natural o su combustión para fines energéticos en la institución.

1.4 LÍMITES DEL ESTUDIO

Debido a la escasa disponibilidad de presupuesto y tiempo se realizó sólo un modelo físico para simular las condiciones anaerobias de la laguna No 2. Aún con estas limitantes, de contar con sólo un modelo físico para una laguna, se puede hacer proyecciones sobre el comportamiento de ambas lagunas durante ambas épocas del año (época seca y época lluviosa).

1.5 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.5.1 General

Analizar de forma comparativa la producción de biogás y la eficiencia en remoción de la carga orgánica, identificada a través de la DBO y DQO por parte de las lagunas de estabilización de Zamorano en condiciones anaerobias.

1.5.2 Específicos

- Evaluar el caudal y carga orgánica en el afluente de las lagunas de estabilización.
- Proveer información sobre la generación de biogás, aplicando un tratamiento anaerobio.
- Comparar el metabolismo facultativo y anaerobio en la producción de biogás.
- Evaluar la eficiencia de las lagunas de estabilización a través de un modelo físico en cuanto a la remoción de materia orgánica bajo parámetros de DBO y DQO bajo condiciones anaerobias.
- Simular el comportamiento histórico de las lagunas bajo condiciones facultativas y comparar este con las nuevas condiciones anaerobias.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Para dicho estudio se hizo énfasis en aquellas características de relevancia en cuanto al tema de investigación.

Las características de las aguas residuales dependieron en gran medida de la procedencia de las mismas.

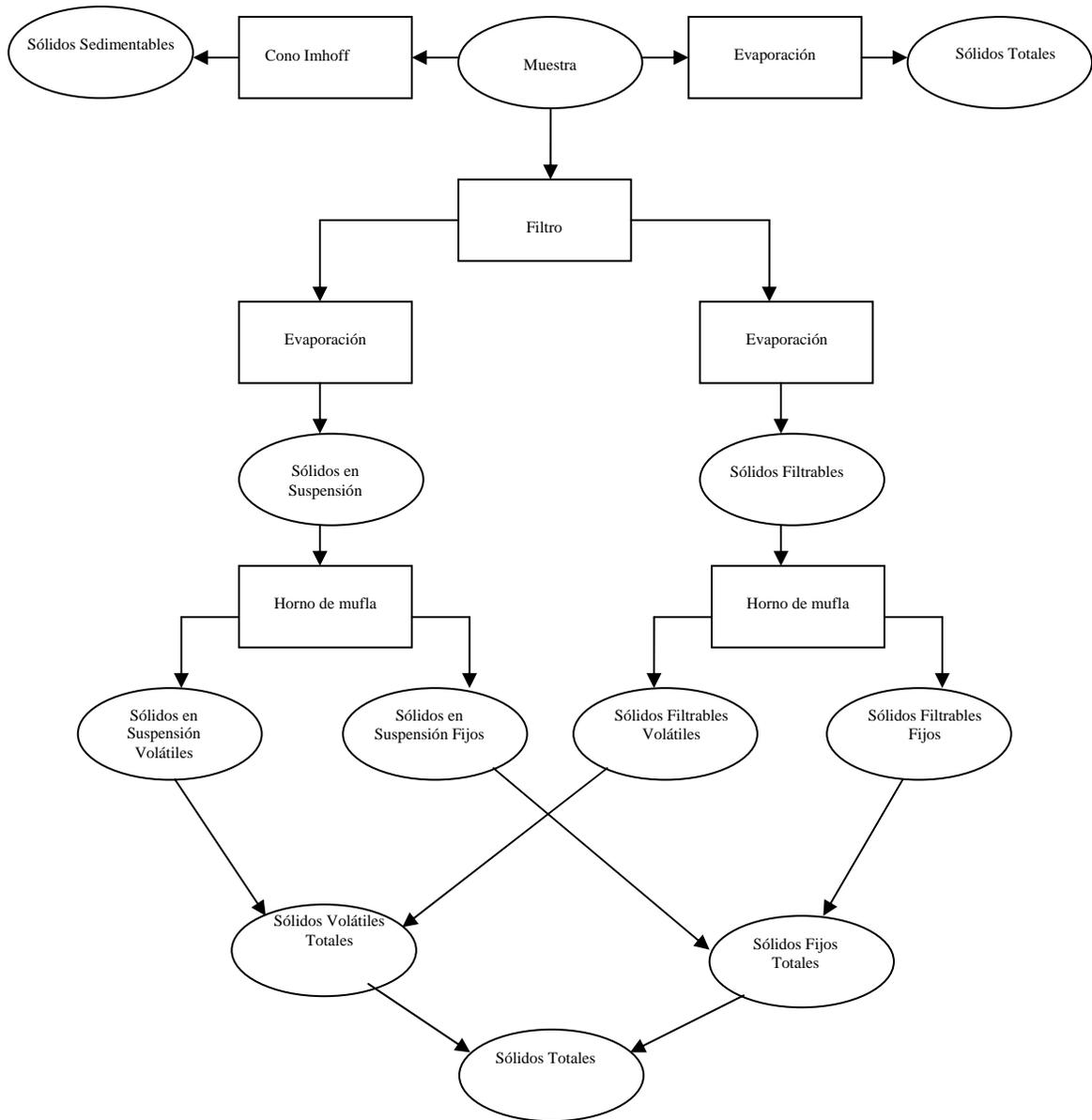
2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

2.2.1 Sólidos

Los sólidos totales son la materia que se obtiene como residuo después de someter el agua a un proceso de evaporación entre 103-105°C (Metcalf, 1996).

Entre ellos se encuentran los sólidos sedimentables que son aquellos que se sedimentan en el fondo de un recipiente (Cono de Imhoff) de forma cónica en el transcurso de un tiempo de 60 minutos.

Al pasar un volumen de un líquido por un filtro, los sólidos retenidos en estos son los sólidos en suspensión. Dentro de estos se encuentran los sólidos en suspensión fijos y los sólidos en suspensión volátiles, estos últimos son componentes orgánicos e inorgánicos de los sólidos en suspensión que a altas temperaturas se oxidará y desaparecerá en forma de gas. Ya que el estudio se centra en la producción de metano y dióxido de carbono, que ambos son gases, estos sólidos volátiles son de gran importancia.



Gráfica 1. Sólidos Totales. Fuente: Metcalf & Eddy (1996), adaptado por la autora.

2.2.2 Olores

Los olores producidos durante el tratamiento de las aguas residuales, se deben a los gases liberados durante el proceso de degradación de materia orgánica.

Según Metcalf (1996), los olores más predominantes se deben a la liberación de (H₂S), Sulfuro de Hidrogeno y (NH₃) Amoníaco.

2.2.3 Temperatura

La temperatura influye mucho en dos aspectos primordiales del tratamiento: en la velocidad de las reacciones químicas y la cantidad de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua.

Debido a las descargas industriales, se logran observar elevadas temperaturas en los caudales. Según Metcalf (1996) la temperatura óptima para la actividad bacteriana está en un intervalo de 25-35°C. A temperaturas bajas, 15°C las bacterias metanogénicas paran sus procesos.

El proceso de digestión aerobia para a los 50°C ya que disminuye significativamente la cantidad de oxígeno disuelto en el cuerpo de agua.

2.2.4 Densidad

Se define la densidad de un agua residual como su masa por unidad de volumen, expresada en Kg/m³ (Metcalf, 1996). Dicho parámetro es susceptible a la temperatura y la concentración total de sólidos.

2.2.5 Color

El color del agua residual determina el tiempo de descarga del agua y tiene una estrecha relación con la turbidez de la misma.

2.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

2.3.1 Materia orgánica

Según Metcalf (1996), materia orgánica son sólidos que provienen de las actividades humanas con la síntesis de compuestos relacionados a orgánicos, así como sólidos provenientes del reino animal y vegetal. Dichos compuestos resultan de una combinación de carbono (C₁₂), hidrógeno (H) y oxígeno (O₂).

2.3.2 Principales grupos de sustancias

Los tres grupos de sustancias principales en las aguas residuales son: las proteínas, los hidratos de carbono y las grasas.

- Proteínas: Principal componente del organismo animal “composición química muy compleja e inestable (Metcalf, 1996)”. La proteína junto con la urea son los principales responsables de la presencia de nitrógeno en aguas residuales.

- Hidratos de carbono: Incluye azúcares que son solubles en agua, almidón insoluble en agua y celulosa.
- Grasas: Incluye grasas animales, aceites y cera. Grasas son alcohol o glicerol más ácidos grasos. Dichas pueden estar presentes de manera sólida o líquida. Este grupo tiene alta estabilidad y una descomposición difícil. Uno de los problemas más serios que pueden ocasionar es crear películas de grasa y acumulación de materia flotante en las aguas residuales.

2.3.3 Agentes Tensoactivos

Según Metcalf (1996) son moléculas grandes, ligeramente solubles en agua. El ejemplo más común de estas son los detergentes.

2.3.4 Compuestos orgánicos volátiles

Compuestos orgánicos que tienen su punto de ebullición por debajo de los 100°C.

2.3.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno

“Cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias” (Romero, 1999). Ésta es directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica.

2.3.6 Demanda Química de Oxígeno

“Cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica químicamente” (Romero, 1999). Es un parámetro de concentración orgánica en aguas residuales industriales.

2.3.7 Materia Inorgánica

- pH. Es la concentración de ión hidrógeno, de gran importancia debido a que puede afectar la producción de las bacterias.
- Alcalinidad. Producida por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos del calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco. Según Metcalf (1996) ésta ayuda a regular los cambios del pH ocasionado por la adición de ácidos.
- Nitrógeno. Elemento esencial para la síntesis de proteínas, a la vez que es un bioestimulador. De gran importancia para el tratamiento de aguas residuales.

2.3.8 Gases

Los gases comunes son nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂). Aquellos gases producidos por la descomposición de la materia orgánica: sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco (NH₃) y metano (CH₄).

Según Metcalf (1996) el sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, inflamable que produce un olor a huevo podrido.

El metano es el principal subproducto de la descomposición anaerobia. Siendo un hidrocarburo combustible de alto valor energético, incoloro e inodoro.

2.3.9 Oxígeno Disuelto

Gas necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, de gran importancia en las lagunas aerobias.

2.4 LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

También conocidas como lagunas artificiales de aguas residuales. Según Netto (1970), las lagunas son obras destinadas a la depuración de residuos líquidos de naturaleza orgánica mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

- Procesos físicos: Incluye precipitación, mezcla, dispersión y aeración
- Procesos químicos: Precipitación de material coloidal y algunas sustancias disueltas
- Procesos biológicos: Descomposición de materia orgánica por la acción de bacterias y otros microorganismos

Se emplean como un tratamiento primario de aguas residuales, en los países del trópico debido a las ventajas del sistema. No depende de energía eléctrica, gran flexibilidad, costo inicial bajo y alta eficiencia.

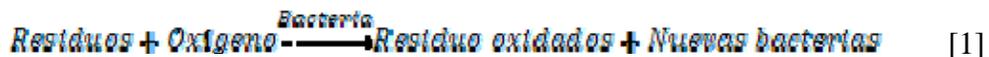
Hay 3 tipos de lagunas de estabilización:

- Lagunas aerobias o aeróbicas
- Lagunas facultativas
- Lagunas anaerobias o anaeróbicas

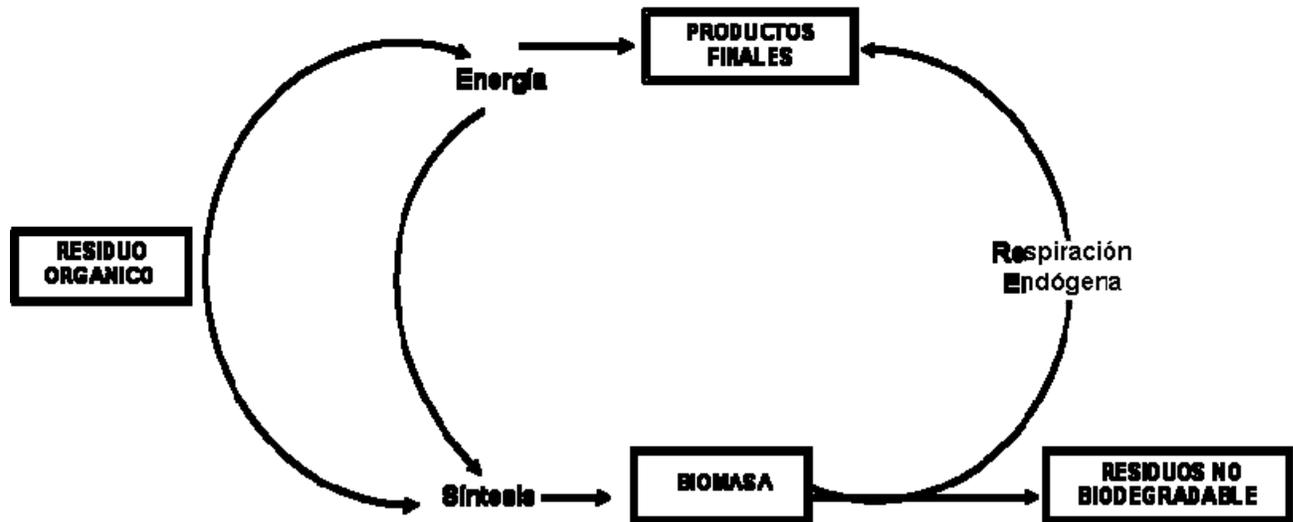
Se llevan a cabo dos tipos de actividad biológica ejecutada por microorganismos: oxidación aerobia y oxidación anaerobia.

2.4.1 Lagunas aeróbicas

Son lagunas en las cuales sucede un proceso de oxidación aerobia. Según Romero (1999) el oxígeno disuelto es el aceptador final de electrones para el funcionamiento de las bacterias.



Oxidación Aerobia



Gráfica 2. Oxidación Aerobia Fuente: Romero (1999) adaptado por la autora.

En la oxidación aerobia se llevan a cabo tres reacciones esenciales:

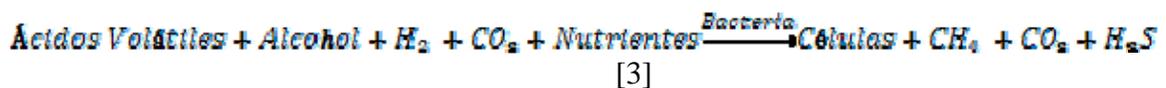
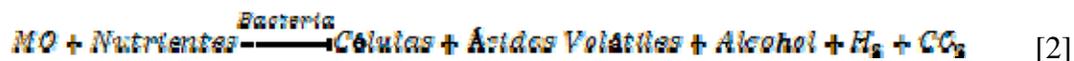
- Catabolismo: oxidación de la materia orgánica
- Anabolismo: síntesis
- Autólisis: Respiración endógena

Este tipo de lagunas son superficiales, de profundidades de entre 0.8m-1m promedio. Debido a que tienen una capacidad baja de carga orgánica.

Según Netto (1970) tienen capacidad de tratar entre 70-150kg/ha al día de materia. Para que estas lagunas trabajaran bajo un sistema anaerobio completo debería tener una profundidad de 0.60m pero por problemas sanitarios que podrían presentarse o pérdidas significativas por la evaporación son construidas con mayor profundidad.

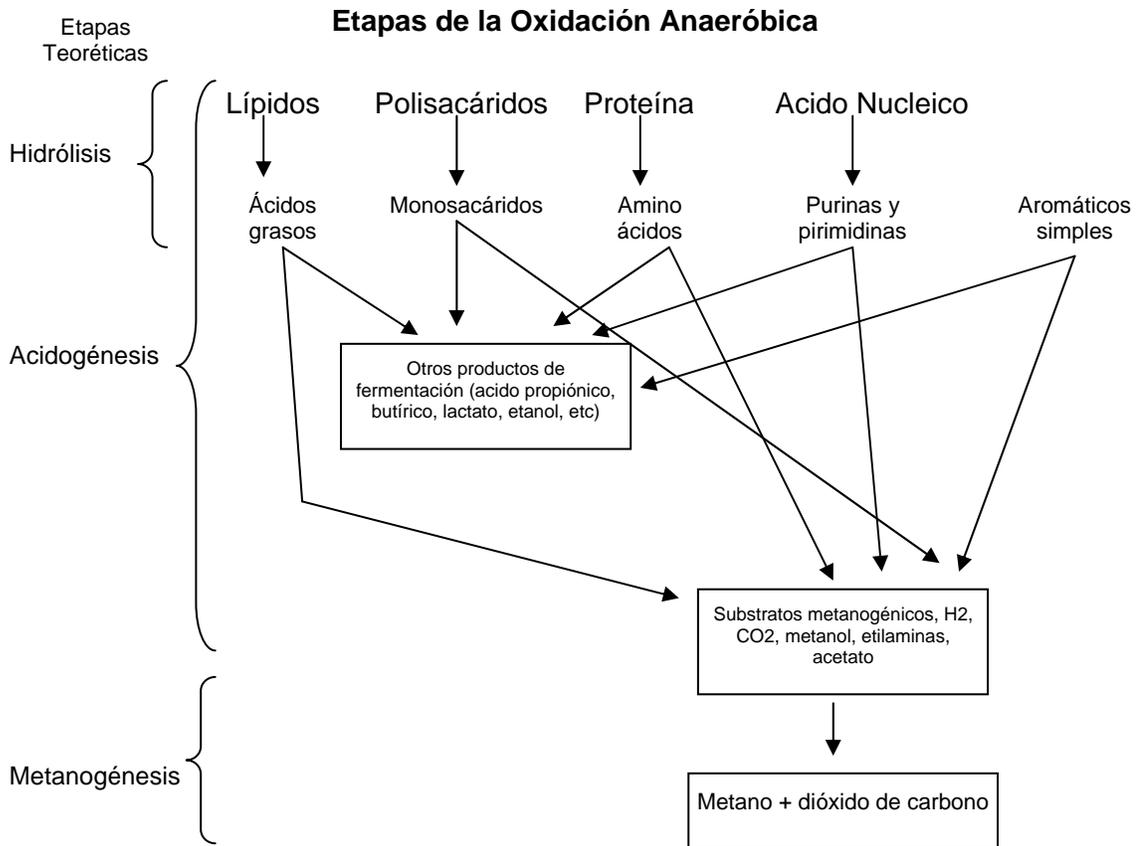
2.4.2 Lagunas anaeróbicas

En estas lagunas se da un proceso de oxidación anaerobia, por medio de la cual se degrada la materia orgánica (MO). Se usa oxígeno de compuestos orgánicos, nitratos y nitritos. Los sulfatos y el dióxido de carbono (CO₂) funcionan como los aceptadores de electrones.



Dentro de la oxidación anaerobia hay según Romero (1999) dos etapas teoréticas:

- Fermentación ácida (acidogénesis): Compuestos complejos como son: proteínas, grasas y carbohidratos son hidrolizados a través de biooxidación, a ácidos orgánicos de cadena corta. Ácido acético, propiónico y butírico.
- Fermentación metanogénica (metanogénesis): La conversión bacteriana de los productos de la fermentación ácida a productos más simples: dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4).

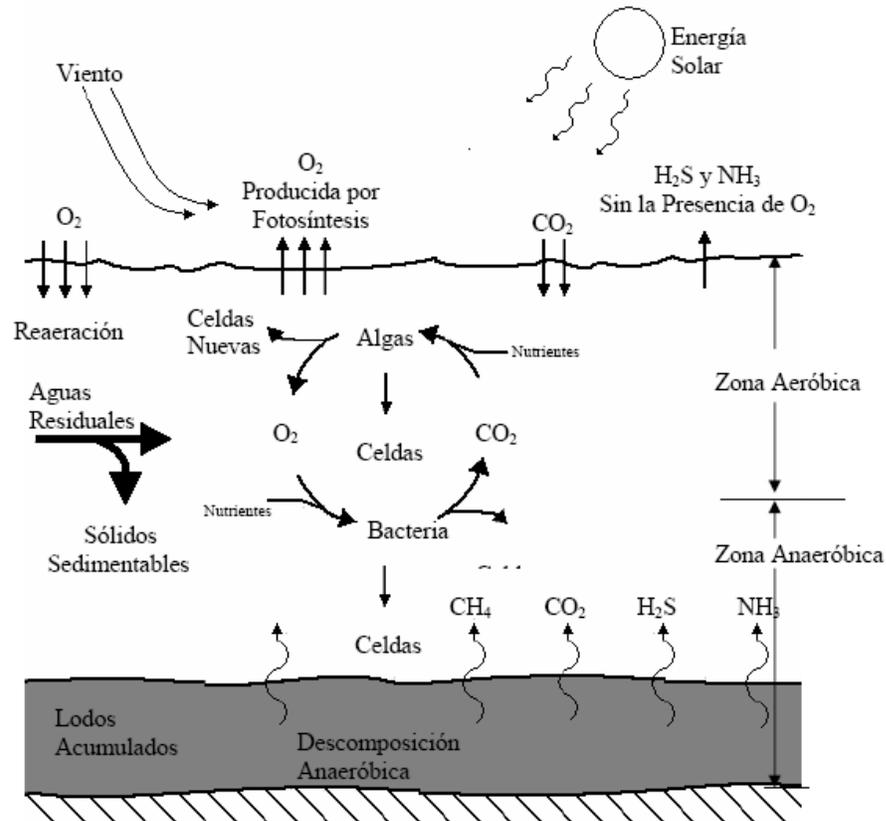


Gráfica 3. Etapas de la Oxidación Anaerobia. Fuente: Metcalf & Eddy (2003) adaptado por el autor.

En este proceso las bacterias metanogénicas logran una producción de metano. Según Romero (1999), 72% del metano generado proviene de la descomposición de acetato, 13% de ácido propiónico y un 15% de productos intermedios.

Estas lagunas tienen profundidades que oscilan dentro de 2.5-5m. Soportan una carga orgánica superior a los 450 Kg/ha-día (Netto, 1970). Son lagunas en las cuales no hay zona aerobia debido a que las bacterias metanogénicas no logran sobrevivir en la presencia de oxígeno.

2.4.3 Lagunas facultativas



Gráfica 4. Funcionamiento de Lagunas de Estabilización. Fuente: Oakley (2005)

Las lagunas facultativas son aquellas en las cuales ocurren simultáneamente ambos procesos mencionados anteriormente. Según Neto (1970), en la parte superior suceden procesos aerobios y en la parte inferior procesos anaerobios. Tienen profundidades de entre 1.5 -2 m, con carga orgánica media y una generación media de gases de efecto invernadero, entre ellos metano.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO

El presente estudio realizó en las lagunas de estabilización de Zamorano y los análisis de laboratorio se efectuaron en el laboratorio de aguas “UNILAB”.

Las lagunas de estabilización pertenecen a la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano; ubicada en el departamento de Francisco Morazán, km 30 carretera a Danlí, Honduras. Mientras que el laboratorio UNILAB pertenece a la Universidad Tecnológica Centroamericana “UNITEC”.

3.2 METODOLOGÍAS IMPLEMENTADAS

En el presente estudio se aplicó la Metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático; a través de la DBO/DQO, caudal, factores de degradación y de emisión, para la estimación de posible producción de biogás bajo un sistema anaerobio.

Para conocer la eficiencia en remoción de materia orgánica bajo parámetros de DBO y DQO se hizo uso de un modelo físico calibrado hidráulicamente, bajo condiciones similares a las de una laguna anaerobia con geomembrana. Para llevar a cabo esta simulación se debe contar con información relacionada a: caudal de entrada en las lagunas de estabilización, tiempo de retención hidráulica, carga orgánica en la entrada de las lagunas y análisis en laboratorio de las entradas y salidas en cuanto a indicadores ambientales del modelo tales como la medición de materia orgánica bajo parámetros de DBO, DQO, nitrógeno total y coliformes.

3.3 METODOLOGÍA DEL PANEL INTERGUBERNAMENTAL DE CAMBIO CLIMÁTICO

Se aplicó la fórmula del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (por sus siglas en Ingles: IPCC) correspondiente a desechos líquidos industriales, adaptada por Quiroz (2007), asumiendo que en los caudales vertidos a las lagunas de estabilización drenan líquidos provenientes de las distintas agroindustrias cuyas cargas orgánicas serán evidenciadas en la DQO, asimismo las aguas residuales de origen domiciliar se verán caracterizadas a través de la DBO.

$$WM = Q \times DQO \text{ o } DBO \times SBF \times FE \times FTA \times 365 \quad [4]$$

Donde:

WM: Emisión anual de CH₄ procedente de aguas residuales domesticas. (Kg/año)

Q: Caudal, L/día

DQO / DBO: Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno Kg/L

SBF: Fracción de DBO/DQO que sedimenta rápidamente, 0.5

FE: Factor de Emisión, 0.80 Kg de CH₄/kg de DBO, 0.25 Kg de CH₄/Kg de DQO

FTA: Fracción de DBO/DQO presente en lodos que se degradan anaeróbicamente, 1, en caso del sistema facultativo actual este seria 0.8

Los resultados obtenidos serán comparados con una tesis que se desarrolla paralelamente en cuanto al inventario de gases de efecto invernadero procedentes de las lagunas, sobre las producciones actuales bajo un sistema facultativo, considerando parámetros de DBO y DQO de manera simultánea.

3.3.1 Aforo del caudal

El aforo de caudales se desarrolló mediante el uso de un correntómetro para identificar la velocidad del fluido, paralelamente se tomarán lecturas en cuanto al nivel de la lámina de agua, finalmente se aplicó la siguiente ecuación:

$$Q \text{ (m}^3/\text{s)} = Ah \text{ (m}^2) \times V \text{ (m/s)} \quad [5]$$

$$Ah = h \times a \quad [6]$$

Donde:

Q: m³/seg

h: altura de la lámina de agua, ésta es representada en metros

a: ancho del canal, 0.225 m

Ah: área hidráulica, m²

Es preciso mencionar que el correntómetro brindará las revoluciones por minuto que el fluido ejerce, por lo cual la conversión de este dato a velocidad se desarrolló a través de la ecuación que el proveedor del equipo indica en su manual:

$$V = \left(\left(\frac{\text{Rev}}{t_{\text{min}}} \right) \times \text{factor de corrección} \right) + 0.05 \quad [7]$$

Donde:

Rev/min "C": Estas son tomadas por el correntómetro

Factor de corrección: En el caso del correntómetro (Geopacks Advanced Flowmeter), éste es 0.000854

- Puntos de muestreo: El punto de muestreo lo constituye la descarga de entrada previa a la separación de los caudales de las lagunas de estabilización No.1 y 2, considerando que estas presentan un funcionamiento hidráulico en paralelo.
- Frecuencia de muestreo: Los datos se tomaron en intervalos de una hora por 24 horas consecutivas, los siete días de la semana. Este procedimiento se realizó durante la época seca y época lluviosa. Con esto se logró medir las variaciones estacionales de los parámetros considerados y que incluye las estaciones lluviosas y secas, épocas de vientos fuertes y débiles, cambios de temperatura y de radiación, así como la ausencia de estudiantes de cuarto año durante el primer trimestre académico.

3.3.2 Muestras compuestas

Se tomaron muestras compuestas del agua residual con intervalos de 24 horas. Estas mismas fueron tomadas en el mismo punto de muestreo y la misma frecuencia que el aforo de caudal.

En cada intervalo de hora se tomaron muestras de 200 ml que fueron trasladadas al laboratorio de aguas. Se tomó una fracción de cada muestra de acuerdo al caudal identificado en la hora de muestreo. Por esta razón, el caudal y las muestras compuestas se tomaron al mismo tiempo, ya que era necesario conocer el caudal por hora para llevar a efecto este procedimiento.

Protocolo de muestreo:

- Lavar las manos y usar guantes estériles
- Determinar con el caudal el tamaño de la muestra
- Ambientar con agua residual el envase de plástico estéril
- Toma de muestra definitiva
- El envase es llenado a su capacidad máxima
- El envase se ingresa inmediatamente a la hielera
- Las muestras son trasladadas al laboratorio

Las muestras compuestas fueron tomadas en envases de 200 ml llenos hasta su máxima capacidad para evitar cualquier espacio de aire que pueda oxidar la materia orgánica, por esta misma razón las muestras fueron preservadas en hielo hasta su recepción en el laboratorio de aguas en Tegucigalpa.

3.3.3 Controles de calidad

Se debe monitorear algunos parámetros para asegurar la calidad de las muestras:

- Conservación de las muestras en termos o hieleras
- Traslado de las muestras en tiempos menores que seis horas
- Asegurar la calibración exacta y precisión de los equipos a utilizarse
- Una buena custodia de datos: en cuanto a fecha de toma de datos, hora y caudal. Ésta debe encontrarse en una bitácora de datos y a la vez cada muestra debe contar con su respectiva etiqueta que señale los datos mencionados anteriormente

3.3.4 Análisis de laboratorio de las muestras

Las muestras compuestas se trasladaron diariamente al laboratorio, donde se clasificaron según horario de muestreo tomando como criterio su coloración o turbidez. La primera manipulación de las muestras consiste en tomar una fracción para hacer los análisis microbiológicos, ya que el riesgo de contaminación al abrir las muestras se incrementa. Los análisis de laboratorio incluyeron:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno en cinco días de incubación (DBO₅)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Nitrógeno Total Kjeldahl
- Sólidos Volátiles
- Sólidos Totales
- Sólidos Suspendidos Volátiles
- Sólidos Suspendidos
- Grasas y aceites

Para conocer los procedimientos específicos de cada análisis se remite al Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater. 21st Edition, que es el protocolo que sigue el laboratorio de UNILAB.

3.4 METODOLOGÍA PARA UNA ESTIMACIÓN EN VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO

De acuerdo al modelo presentado por Metcalf & Eddy (2003), a continuación se describe la ecuación utilizada para convertir los kilogramos de metano a volumen, con el objetivo de definir futuras capacidades de almacenamiento:

$$V = \frac{nRT}{P} \quad [8]$$

Donde:

n: Moles CH₄

R: 0.082057atm*L/Mol*K

T: K (273.15+°C)

P: atm

V: L/día

Se aplicó esta ecuación para conocer el volumen esperado de generación de metano. Ésta se utilizó considerando los datos obtenidos a partir de la metodología de la IPCC.

3.5 METODOLOGÍA DEL MODELO FÍSICO, EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA, BAJO PARÁMETROS DE DBO Y DQO

El modelo físico simula las condiciones presentes en un sistema anaerobio, un estado de completa ausencia de oxígeno que asegura la proliferación de bacterias anaerobias facultativas o anaerobias estrictas. Y, el mismo estado hermético asegura la captura de los gases producidos por dichas bacterias, incluidos entre estos el metano y dióxido de carbono. Dicho modelo está elaborado a partir de un tanque de polietileno con las siguientes características:

- Capacidad de almacenamiento: 1,100 L
- 0.98 m de altura
- 1.15 m de ancho
- Una llave de entrada a 80cm altura, que fue calibrada al inicio, esta se encontraba conectada a un recipiente que asegura una entrada de agua constante, como es el funcionamiento normal de una laguna
- Una llave de salida a 81cm altura calibrada al inicio del funcionamiento del modelo físico y la cual era verificada día de por medio, para asegurar una salida determinada
- Una llave de escape de gas por la parte superior conectada a un neumático y una trampa de vapor de agua

Se trabajó con la siguiente ecuación para conocer el volumen del mismo.

$$V = \frac{(\text{circulo} \times 3.14159)}{(4 \times \text{altura})} \quad [9]$$

3.5.1 Tiempo de retención hidráulica

Fue necesario calcular el tiempo de retención hidráulica (TRH) de las lagunas de estabilización No.1 y No. 2 actuales, éste fue obtenido a través de la siguiente ecuación.

$$TRH = \frac{\text{Volumen}}{Q \text{ semanal de la laguna}} \quad [10]$$

Este procedimiento se realizó con los distintos caudales y volúmenes de las lagunas durante la época lluviosa y seca. En el caso de los datos de la época lluviosa, estos tuvieron un ajuste debido a la limitante en cuanto a tiempo para completar la semana de toma de datos. El respectivo ajuste es detallado con mayor precisión en los resultados obtenidos.

3.5.2 Modelación lagunas

Se realizaron conversiones del caudal de las lagunas No.1 y No.2 respectivamente, durante ambas épocas para conocer el caudal de entrada que representaría en el modelo físico.

Para fines del estudio, por limitantes de tiempo y recursos, se trabajó sólo con el tiempo de retención hidráulica de la laguna No 2.

La salida del modelo físico fue tomada a partir del tiempo de retención hidráulica de las lagunas respectivamente y el caudal posteriormente se convirtió a ml/min.

$$\text{Salida modelo físico} = \frac{\text{TRH lagunas} \times 3,600 \text{ s}}{\text{Volumen del modelo físico L}} \quad [11]$$

Se calibró la llave de salida del modelo físico para obtener el tiempo de retención hidráulica de la laguna. Se verificó la calibración de la llave de salida con intervalos de dos días, que correspondía a las visitas realizadas al modelo físico para verificar ciertos parámetros y hacer anotaciones sobre variaciones.

El modelo físico contaba con un recipiente en la llave de entrada, el cual se llenaba de agua de las descargas hacia las lagunas, esto aseguraba la entrada constante de agua al sistema. Se tomaron datos también de la cantidad de agua obtenida en una trampa de vapor de agua, lo cual brinda información sobre la cantidad de gases producidos.

El neumático al final del sistema de drenaje del biogás, provee información sobre la producción de gases y en consecuencia de sus condiciones anaerobias.

3.5.3 Muestras de agua entrada y salida del modelo físico

Se realizaron muestras de agua en la entrada y salida del modelo físico en el tiempo de retención hidráulica, así como en los días 30, 40 y 50 a partir de la implementación del modelo.

Las muestras fueron de dos litros cada una y se siguieron de nuevo todos los protocolos de muestreo mencionados anteriormente.

3.6 ANÁLISIS DE EFICIENCIA DEL SISTEMA

Como parte del estudio es de suma importancia conocer y evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica en las aguas residuales, bajo ciertos parámetros de gran interés, como son DBO, DQO y coliformes totales, bajo un modelo anaerobio. Para realizar esta comparación se tuvo que proceder a conocer los datos históricos de eficiencia de remoción del sistema bajo condiciones actuales y comparar estas con las diferentes eficiencias encontradas en el modelo físico.

3.6.1 Levantamiento de datos históricos

Se procedió a trabajar con los datos históricos de las lagunas, para conocer la eficiencia del sistema en cuanto a remoción de ciertos parámetros, como lo son: DBO, DQO, nitrógeno y coliformes totales.

3.6.2 Proyecciones asumiendo las eficiencias bajo el sistema anaerobio

Se tomaron los datos históricos y se procedió a trabajar bajo distintos escenarios. Estos escenarios fueron creados considerando eficiencia de remoción de ambos parámetros: DBO y DQO, de las distintas tomas del modelo físico (día 15, día 30, día 40 y día 50).

Se asumió que se iban a presentar las mismas eficiencias que se presentaron en el modelo físico y luego dicho porcentaje se introdujo como el porcentaje de eficiencia de remoción de la salida de la laguna No. 2. Las otras eficiencias de las demás lagunas no fueron alteradas, ya que sólo se simuló que la laguna No. 2 tuviera el mismo comportamiento que tuvo en el modelo físico acorde a los distintos días.

Con esto se logró obtener cuatro diferentes escenarios, mencionados anteriormente y se obtuvieron proyecciones asumiendo los mismos datos de entrada y asumiendo las mismas eficiencias.

3.7 Equipo e instrumentos

- Equipo:
Correntómetro para la medición de velocidad. Marca: Geopacks Flowmeter (MFP51)
- Instrumentos:
Envases plásticos transparentes de 200 ml y 2 L
Cintra métrica
Probeta de 100ml

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CAUDAL DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DURANTE LA ÉPOCA SECA

Durante los muestreos desarrollados en la época seca se logró observar una marcada época seca en la cual se logró observar la variación del flujo de acuerdo a las diversas actividades domiciliarias, administrativas y agro industriales (Figura 1). El caudal mínimo observado fue de 380.1 m³ durante el domingo y un caudal máximo de 620.0 m³ el miércoles (Cuadro 1) debido al incremento en las actividades de limpieza en dormitorios estudiantiles. De esta manera se identificó un caudal promedio durante la época seca de 486.9m³/día (Cuadro 1).

Hay que destacar que los caudales de esta época evidencian el consumo de Zamorano al carecer de los estudiantes del cuarto año, que en su mayoría no residen en la universidad durante el primer periodo académico.

Cabe recalcar que se le atribuye a las actividades domiciliarias (de residencias estudiantiles), gran parte del caudal generado por la institución por lo cual este factor de ausencia de estudiantes es de gran relevancia.

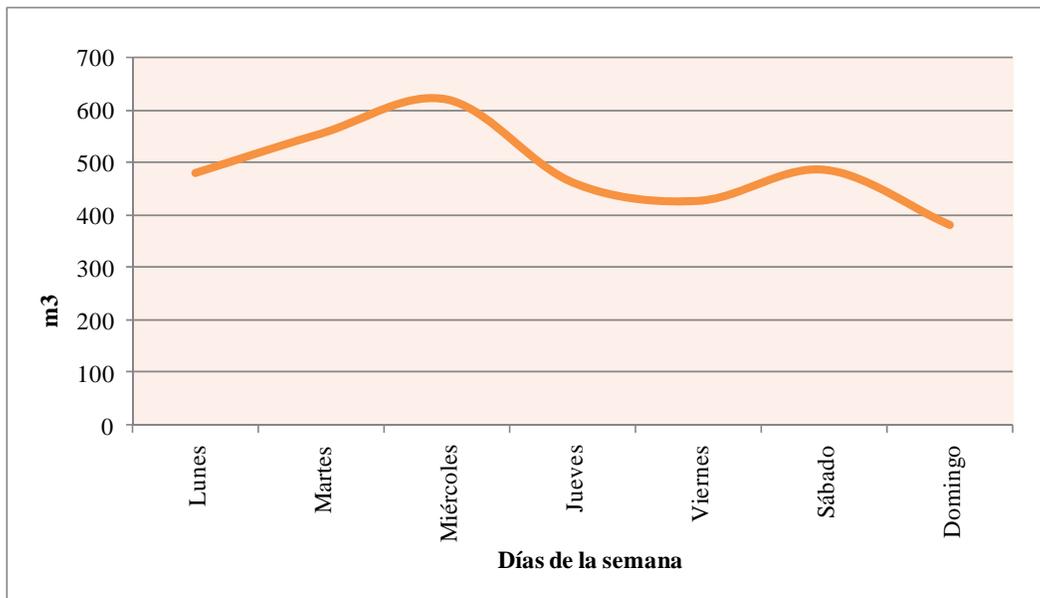


Figura 1. Caudal semanal de las lagunas de estabilización durante la época seca.

Cuadro 1. Caudal época seca.

Día	m ³ /d
Lunes	479.5
Martes	554.9
Miércoles	620.0
Jueves	461.4
Viernes	426.3
Sábado	485.8
Domingo	380.1
Caudal total	3,408.3
Caudal Promedio	486.9

Se presentaron variaciones durante la semana, las cuales se logran observar con más detenidamente al considerar los caudales de cada hora del día; éstas se pueden atribuir a distintos factores tales como, las variaciones de producción en las distintas plantas, considerando que ciertos días algunas plantas lo destinan a la elaboración de un producto en específico. Se logró también observar las horas pico de uso por parte de los estudiantes.

Se observaron algunas tendencias durante el aforo de caudales, la primera de éstas que la población estudiantil inicia sus actividades a las 5:00 a.m., donde se observó un incremento drástico del caudal durante esa hora de cada día.

En el intervalo comprendido entre las 10:00 a.m.-12:00 p.m. se observó también un elevado incremento, atribuido a la limpieza de las plantas durante su cierre por la mañana al igual que la llegada de los estudiantes provenientes de trabajos a sus dormitorios, lo cual implica un elevado consumo de agua.

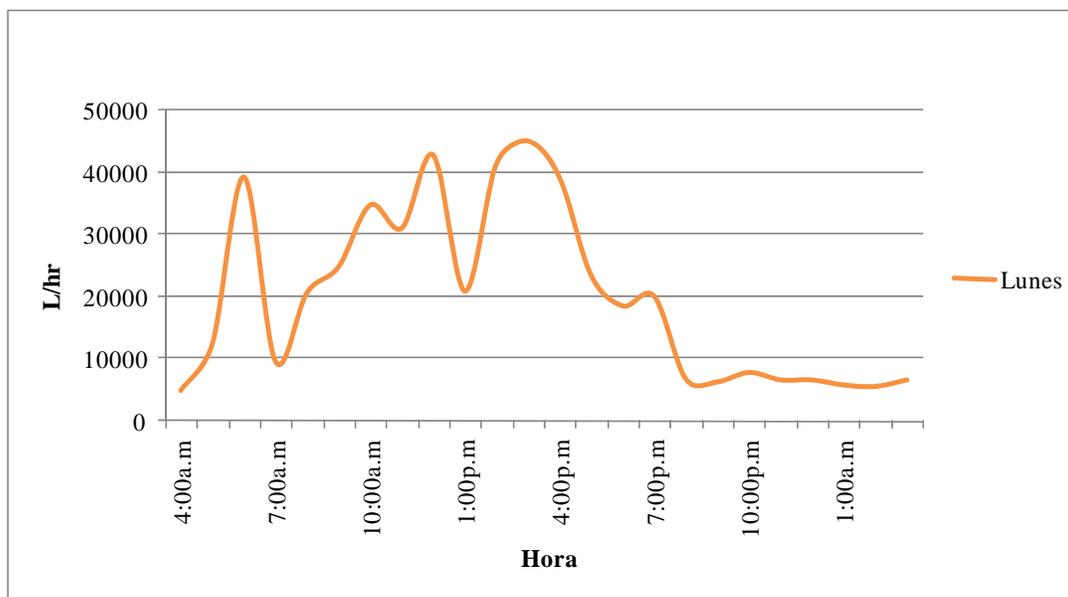


Figura 2. Caudal de la época seca lunes.

Durante ciertas horas de la madrugada se observó un caudal mínimo con leves incrementos que evidenció la presencia de fugas en el sistema (Figura 3). Se evidenció un mínimo de 455.0 L/hr, un máximo de 10,360.5 L/hr y un promedio de caudal de estas horas de la madrugada de 4,169.5L/hr.

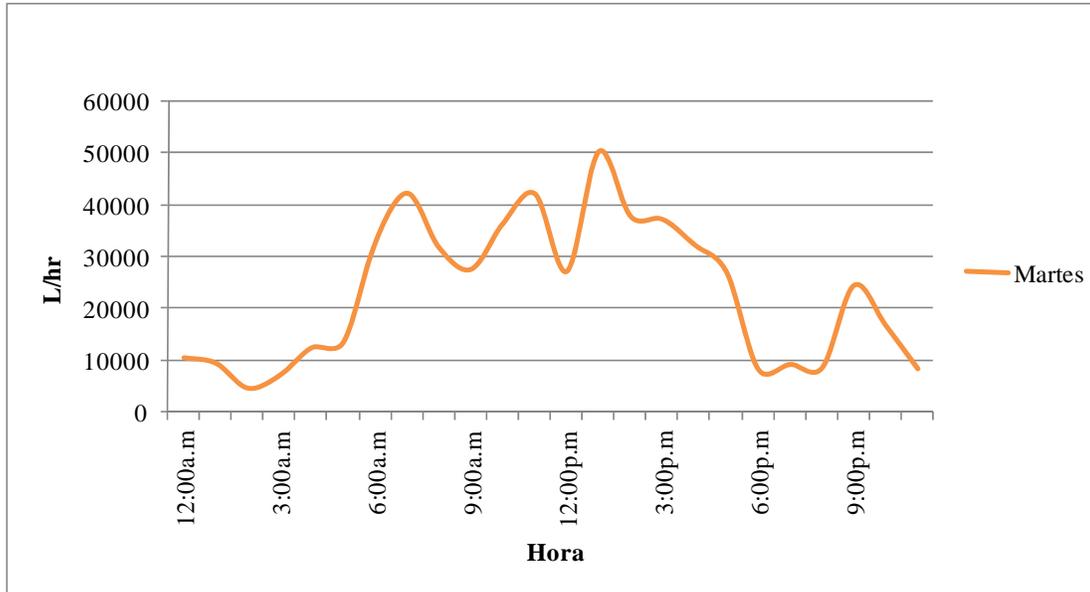


Figura 3. Caudal de época seca martes.

Estos caudales representan las actividades diarias de los estudiantes, se observó una marcada tendencia a disminuir el volumen de agua, en el intervalo de 6:00 p.m.- 8:00 p.m. (Figura 3 y Figura 4) que los estudiantes se encuentran en las horas destinadas a estudio.

El día miércoles (Figura 4) se observó una descarga elevada a las lagunas, considerando que es el día que se destina a la limpieza general de los dormitorios, sin excluir las descargas generadas normalmente por las distintas plantas de producción.

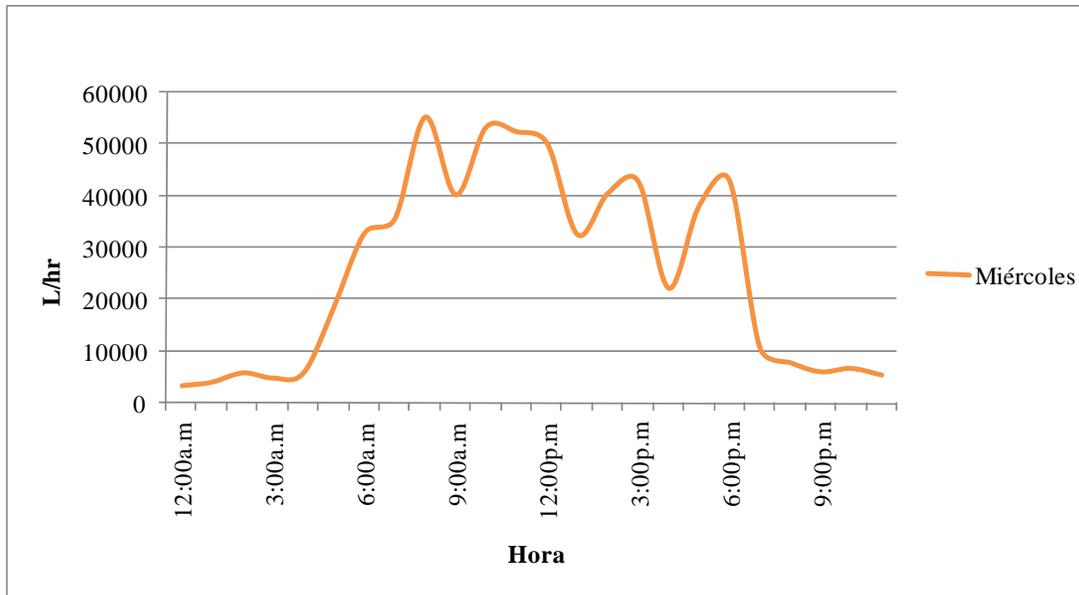


Figura 4. Caudal de época seca miércoles.

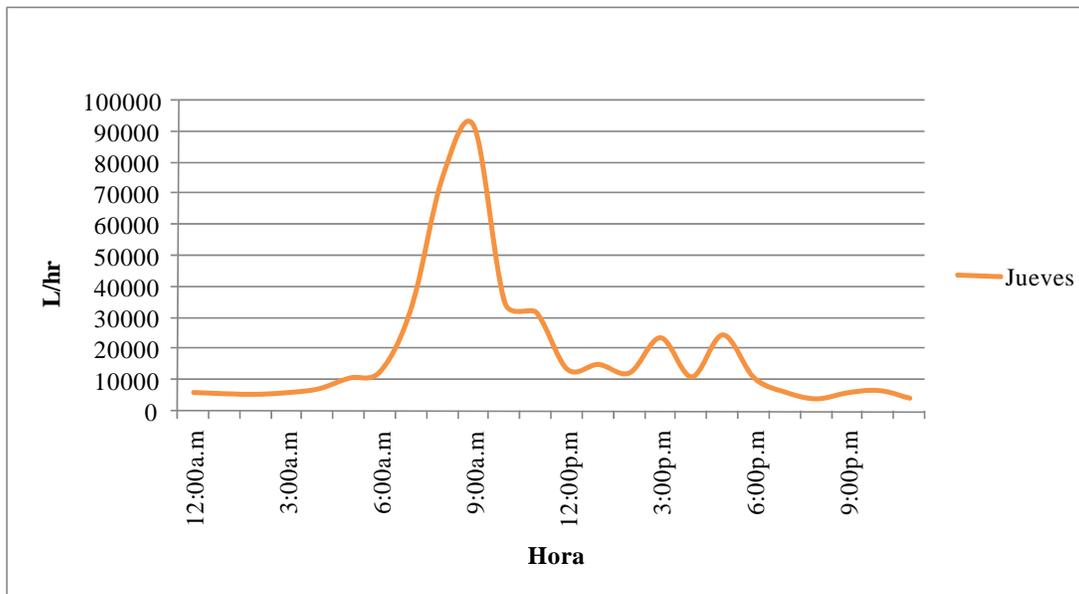


Figura 5. Caudal de época seca jueves.

En el jueves se observan los patrones de consumo normal durante el día, sólo que se evidenció un aumento sustancial iniciando a las 8:00am hasta las 11:00am (Figura 5), esto se atribuye a las plantas de producción. Debido a que las plantas agroindustriales de Zamorano cuentan con sólo tres meses de instalación de medidores de descarga, es difícil conocer con exactitud cuanto es atribuible a cada planta.

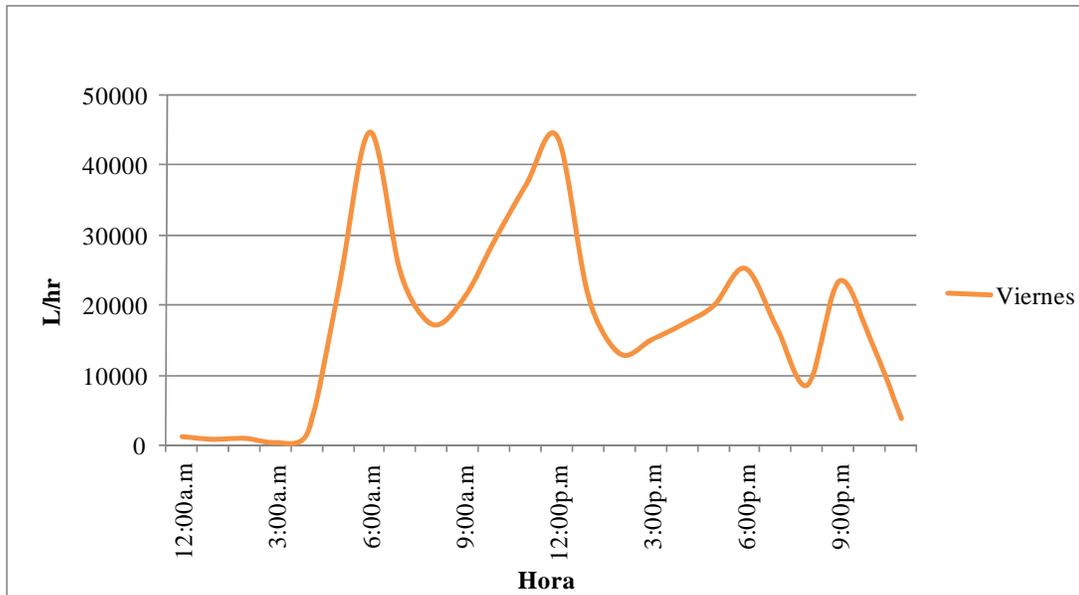


Figura 6. Caudal de época seca viernes.

Cabe mencionar que los días viernes (Figura 6) y sábados (Figura 7) se observaron patrones de caudales más elevados que lo normal entre las 4:00 p.m. - 10:00 p.m., debido a las distintas actividades realizadas por los estudiantes durante estos días, que incrementan al contar los estudiantes con mayor tiempo libre para destinar a actividades de ocio y recreación, que van acompañadas con un uso del recurso agua.

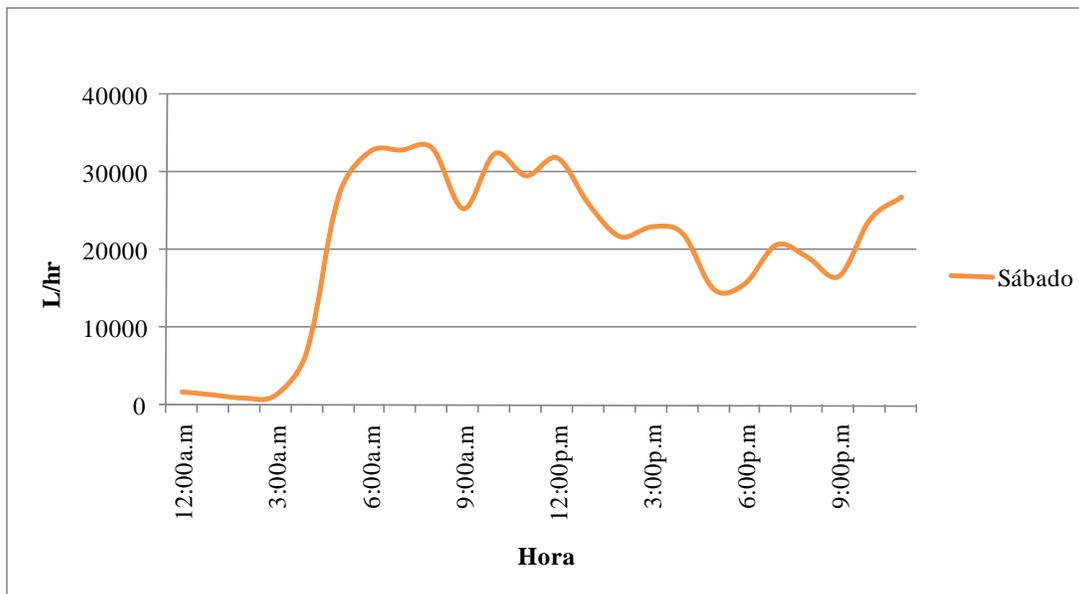


Figura 7. Caudal de época seca sábado.

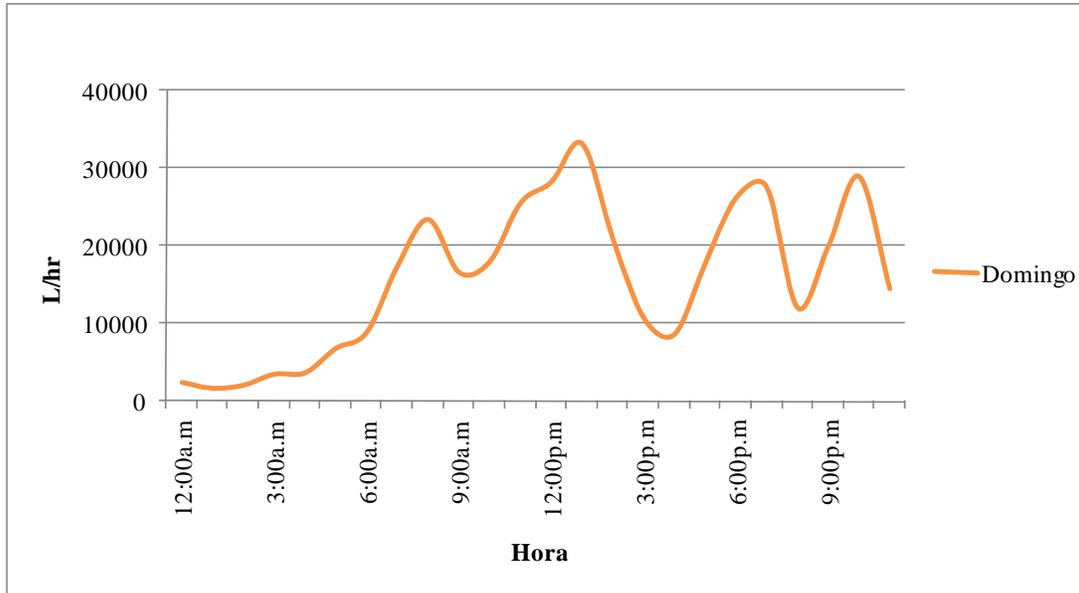


Figura 8. Caudal de época seca domingo.

El día domingo se observó una distribución mas homogénea del caudal diario, esto se debe a que los estudiantes se encontraban libren durante todo el día.

4.2 CAUDAL DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DURANTE ÉPOCA LLUVIOSA

Durante la semana de aforo de la época lluviosa no se presentaron lluvias de gran intensidad, aunque si se tomaron datos de ciertos días lluviosos (Figura 9). El caudal mínimo observado fue de 556.7m^3 durante el viernes y un caudal máximo de $1,158.6\text{m}^3$ el miércoles (Cuadro 2). De esta manera se identificó un caudal promedio durante la época lluviosa de $720.3\text{m}^3/\text{día}$ (Cuadro 2).

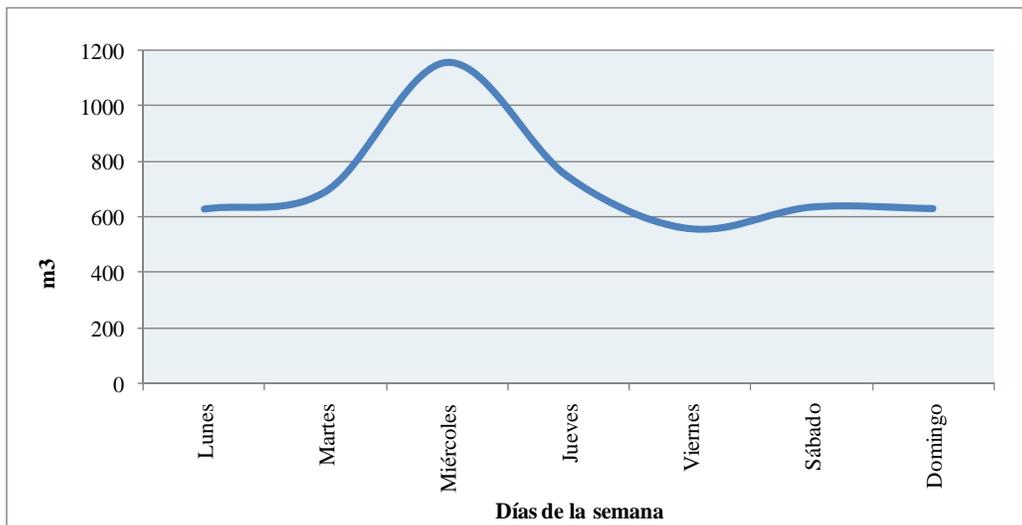


Figura 9. Caudal semanal de las lagunas de estabilización durante época lluviosa.

Cuadro 2. Caudal época lluviosa

Día	m ³ /día
Lunes	627.7
Martes	691.8
Miércoles	1,158.6
Jueves	743.1
Viernes	556.7
Sábado	634.8
Domingo	629.5
Caudal Total	5,042.4
Caudal Promedio	720.3

Las tendencias que se observaron durante la época seca, en cuanto a patrones de consumo, no variaron mucho durante esta época. sin embargo existe un incremento en relación a la época seca debido a la presencia de estudiantes de cuarto año, que aumentan drásticamente los caudales. Asimismo se le atribuyo al aumento en caudal ciertas filtraciones de aguas pluviales que entraron al sistema, que no tan solo aumentan el caudal total pero traen consigo una mayor cantidad de sedimentos y otras partículas arrastradas.

Es de gran importancia señalar que Zamorano cuenta con un sistema para agua pluviales aparte, esto es de suma importancia al trabajar con lagunas de estabilización, ya que las aguas pluviales como se menciono anteriormente aportan gran cantidad de sedimentos y otras partículas que aumentan los costos de mantenimiento y funcionamiento de las mismas.

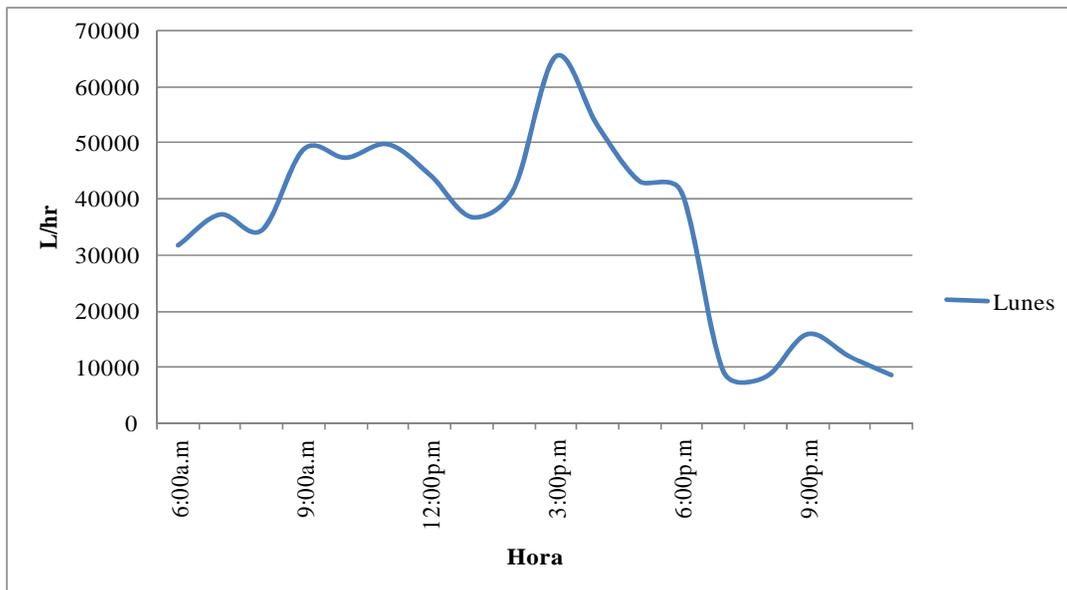


Figura 10. Caudal de época lluviosa lunes.

Cabe señalar que durante el martes (Figura 11) y el jueves (Figura 13), se observó un incremento sustancial en la carga recibida por el sistema en el período comprendido de 4:00-7:00 p.m., esto se debió a que tales días por la tarde se impartió clases de educación

física a los jóvenes de primer año, por lo cual se aseguró una posterior descarga de aguas grises.

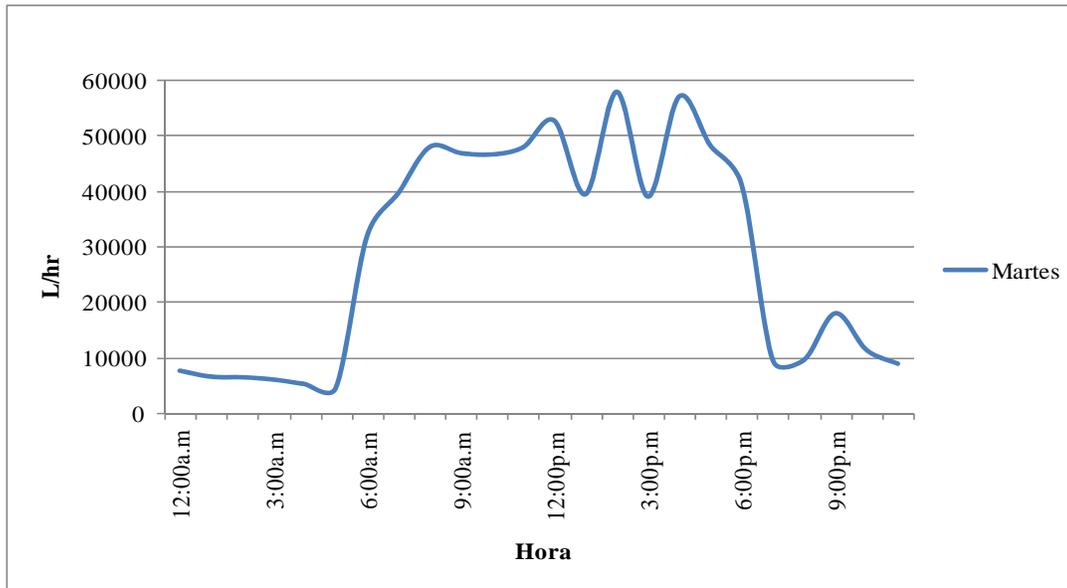


Figura 11. Caudal de época lluviosa martes.

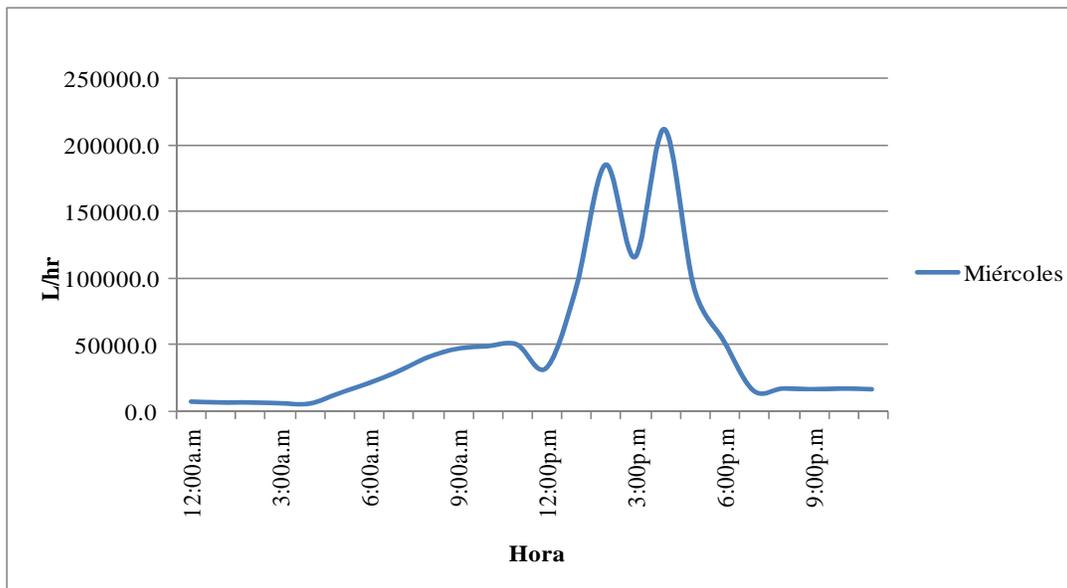


Figura 12. Caudal de época lluviosa miércoles.

El miércoles nuevamente se observó un elevado caudal durante la tarde por la limpieza de dormitorios y a su vez también se presentaron infiltraciones no controladas al sistema por parte de las aguas pluviales, ya que llovió ese día.

Durante el jueves (Figura 13) también se logró observar una descarga sobre los 10,000 L/hr durante las horas de la madrugada, en este caso representó una entrada de aguas pluviales y no una fuga en el sistema, como se presentó en la época seca.

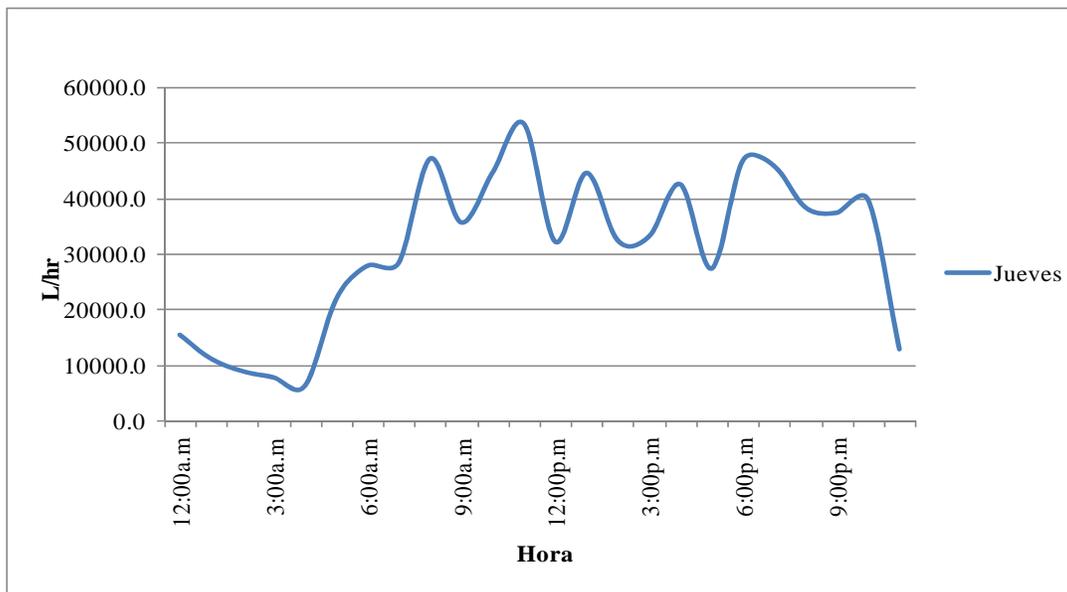


Figura 13. Caudal de época lluviosa jueves.

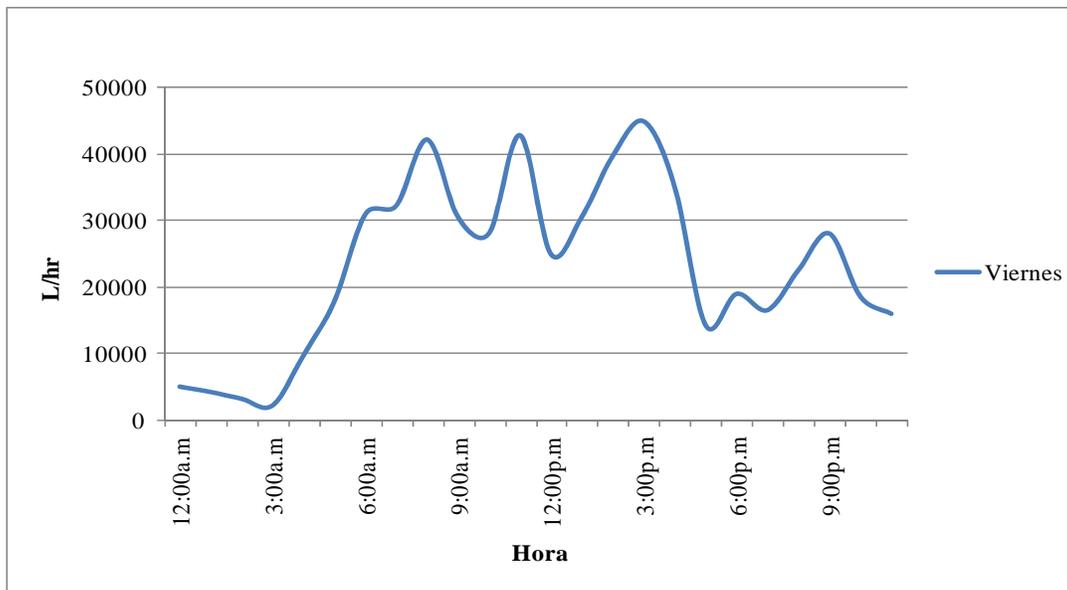


Figura 14. Caudal de época lluviosa viernes.

El viernes se observó un incremento desde las 9:00am en lo que fueron los caudales (Figura 14). Los patrones de consumo fueron visibles durante la época seca.

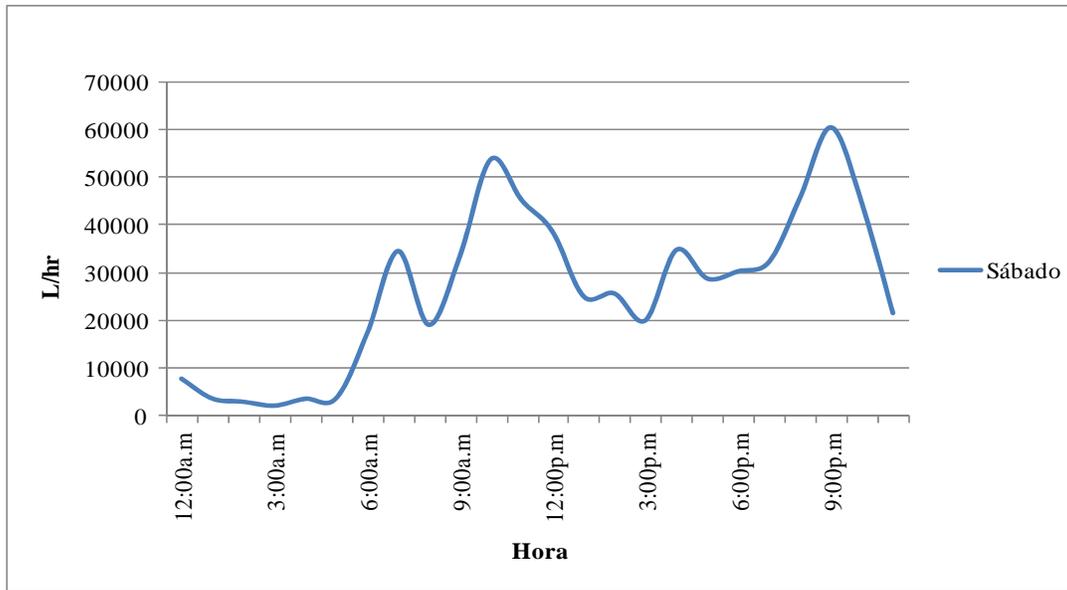


Figura 15. Caudal de época lluviosa sábado.

El sábado hubieron lluvias durante la tarde por lo cual se observó un caudal un poco elevado atribuible a fugas no controladas al sistema, también se observó un mayor consumo desde las 9:00am (Figura 15) debido a distintas actividades deportivas que se llevaron a cabo durante los fines de semana.

El domingo, los caudales fueron menores durante todo el día (Figura 16).

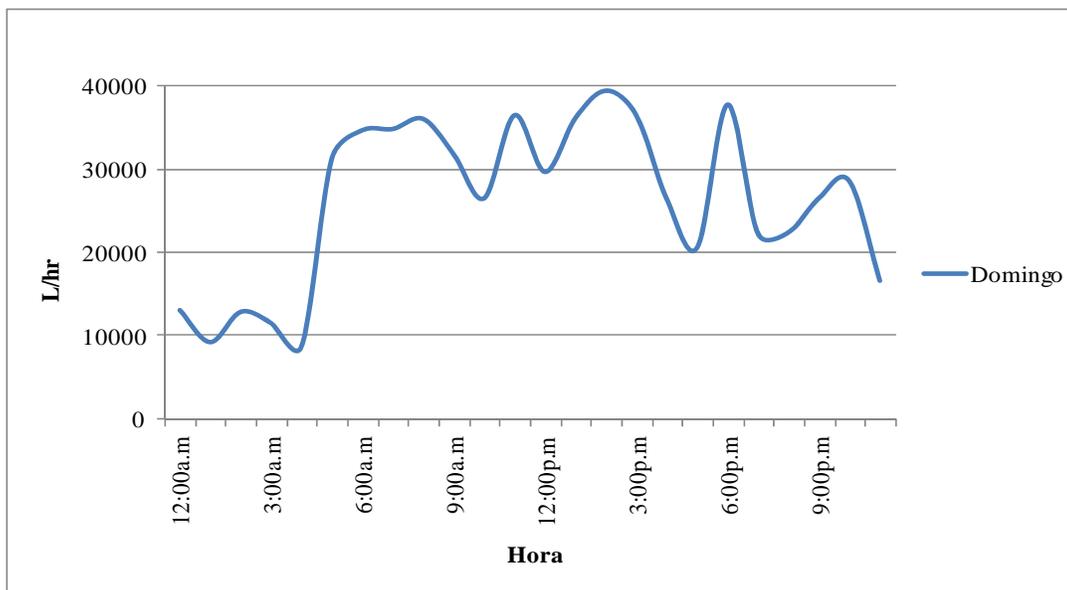


Figura 16. Caudal de época lluviosa domingo.

4.3 COMPARACIÓN DE CAUDALES DE LA ÉPOCA SECA Y LLUVIOSA

Se tomó datos de caudal de época seca y época lluviosa para conocer con exactitud las diferencias presentadas en las lagunas durante el transcurso del año, estas fluctuaciones tienen impactos directos en la capacidad de depuración de la materia orgánica considerando el tamaño de las mismas.

En consiguiente el caudal máximo de entrada en la laguna oscilo entre los $1,200 \text{ m}^3/\text{día}$ con mínimos menores que $400.0 \text{ m}^3/\text{día}$ (Figura 17). Del promedio de ambas estaciones se obtuvo un promedio anual de $603.6 \text{ m}^3/\text{día}$.

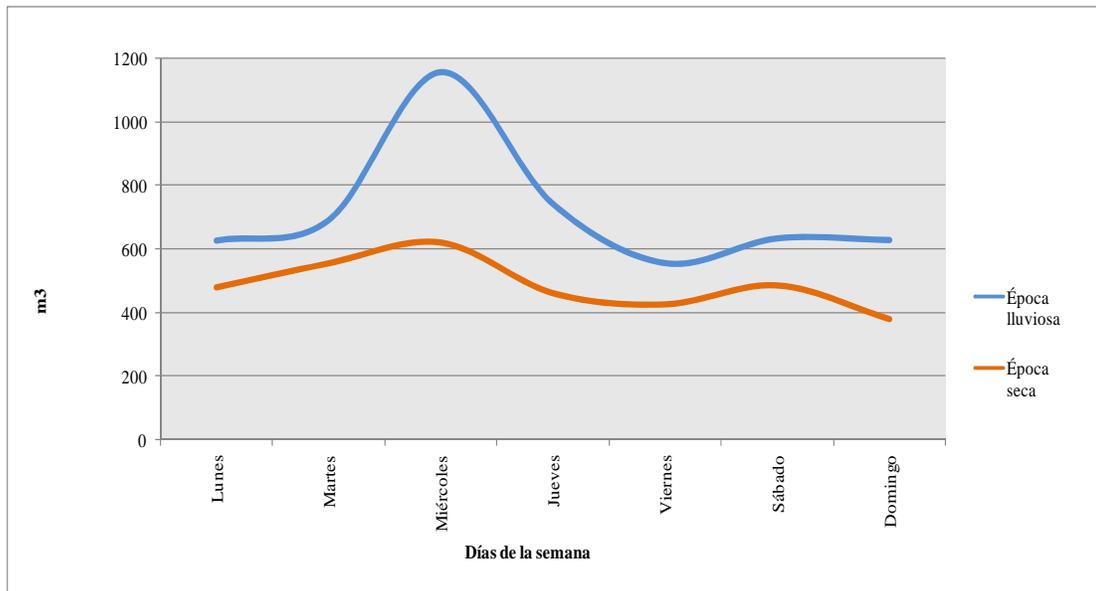


Figura 17. Caudal lagunas de estabilización, durante la época seca y lluviosa.

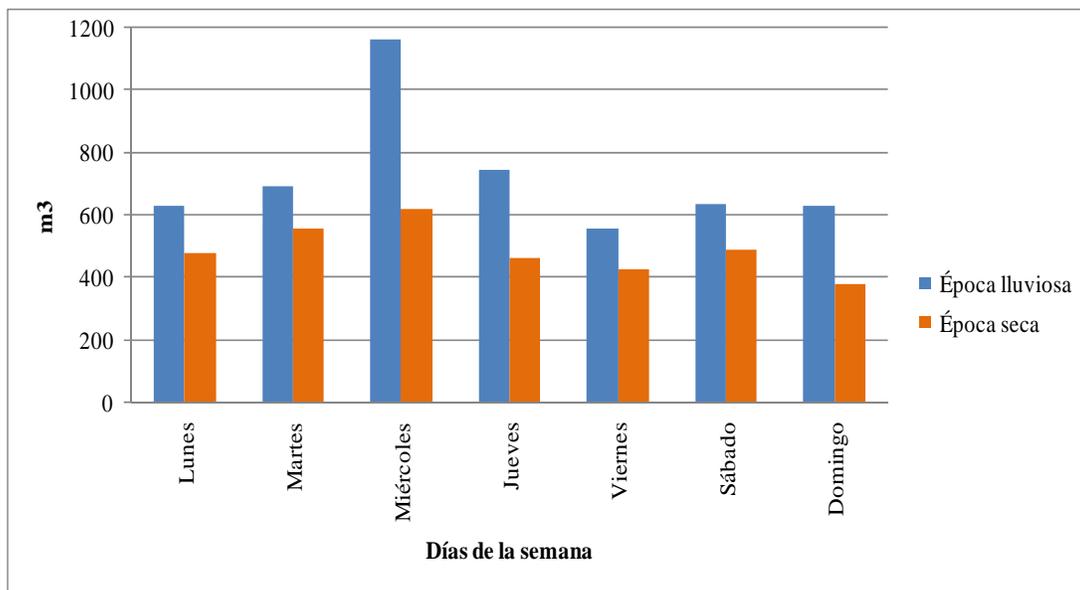


Figura 18. Caudal diario, comparación diaria entre la época seca y lluviosa.

En cuanto a los caudales diarios, se observó un patrón de consumo similar a lo largo de la semana, durante la época seca como durante la época lluviosa (Figura 18). Esto demuestra patrones ya establecidos los cuales variaron debido a la presencia de cuarto año durante la época lluviosa y también debido a entradas no controladas al sistema de aguas pluviales.

4.4 MUESTRAS COMPUESTAS

Las muestras se tomaron en intervalos de una hora para elaborar las muestras compuestas diarias durante ambas semanas de las distintas épocas. Esto fue de gran importancia para conocer la carga orgánica de las aguas vertidas a la laguna durante el año, ya que estas pueden variar a lo largo del año.

La carga de los caudales y la lista completa de análisis de laboratorio para la caracterización de las aguas de descarga se encuentra en el Anexo 1.

Se detalla a continuación los análisis de laboratorio que fueron relevantes para la estimación de biogás bajo la metodología de la IPCC (Cuadro 3).

Cuadro 3. Análisis de laboratorio de muestras compuestas de la época seca y lluviosa.

Datos de época seca					
Día	Hora	DBO5	DQO	Sólidos Totales	Sólidos Volátiles Totales
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Lunes		798.8	1689.4	851.1	460.0
Martes	0:00am-12:00pm	581.5	1000.7	645.6	460.0
	13:00pm-0:00am	464.3	751.9	628.9	362.2
Miércoles	0:00am-17:00pm	565.0	168.0	591.1	373.3
	17:00pm-0:00am	280.0	333.0	401.1	214.8
Jueves	0:00am-15:00pm	313.1	563.2	391.6	144.4
	16:00pm-0:00am	274.7	359.0	536.7	356.7
Viernes	0:00am-16:00pm	625.5	801.6	727.8	268.9
	17:00pm-0:00am	358.2	654.8	195.6	<5
Sábado			650.6	680.0	458.3
Domingo			952.9	795.0	491.7
Datos de época lluviosa					
Día	Hora	DBO5	DQO	Sólidos Totales	Sólidos Volátiles Totales
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Lunes	06:00am-16:00pm	1053.0	1780.3	1238.7	90.7
	17:00pm-22:00pm	963.0	1344.3	986.7	596.3
Martes	22:00pm-05:00am	11.5	44.3	300.0	60.0
	6:00am-16:00pm	1290.0	1967.6	5313.0	4693.3
Miércoles	17:00pm-23:00pm	200.0	331.3	437.7	226.7
	0:00am-04:00am	25.0	91.4	257.7	75.6
	05:00am-11:00am	489.0	620.1	686.7	393.3
	12:00pm-18:00pm	213.0	443.6	853.3	288.9
Jueves	19:00pm-0:00am	103.0	219.4	416.7	177.8
	0:00am-14:00pm	460.0	671.6	679.8	360.0
Viernes	15:00pm-22:00pm	277.5	771.2	493.3	253.3
	23:00pm-04:00am	71.0	107.2	286.7	148.9
Sábado	05:00am-07:00am	280.0	474.6	415.6	233.3
	08:00am-16:00pm	735.0	1184.5	808.9	515.6
	17:00pm-0:00am		328.4	466.7	266.7
Domingo	0:00am-04:00am		99.5	175.5	66.7
	05:00am-10:00am	804.0	1041.3	817.8	520.0
	11:00am-23:00pm	336.0	441.4	486.7	271.2
Domingo	0:00am-04:00am		283.6	426.7	191.2
	05:00am-18:00pm	558.0	731.5	562.2	286.7
	19:00-0:00am		298.6	455.5	193.2

Se observó variaciones en cuanto a carga orgánica bajo los criterios de DBO y DQO en las distintas muestras, cabe destacar que estas fueron agrupadas para realizar análisis de acuerdo a su turbidez que denotaban cambios en las cargas y sedimentos encontrados.

Las cargas orgánicas más bajas se presentaron durante la madrugada (Cuadro 3). La literatura nos menciona que los sólidos volátiles son directamente proporcionales a las cargas encontradas de DBO y DQO y esto se logró corroborar en los resultados (Cuadro 3) y a su vez se logró corroborar que estos constituyen una parte de los sólidos totales encontrados en cada muestra.

Se obtuvieron promedios de entradas de DBO y DQO anuales, de DBO un promedio anual de 508.7mg/L y de DQO un promedio anual de 750.4mg/L (Figura 19).

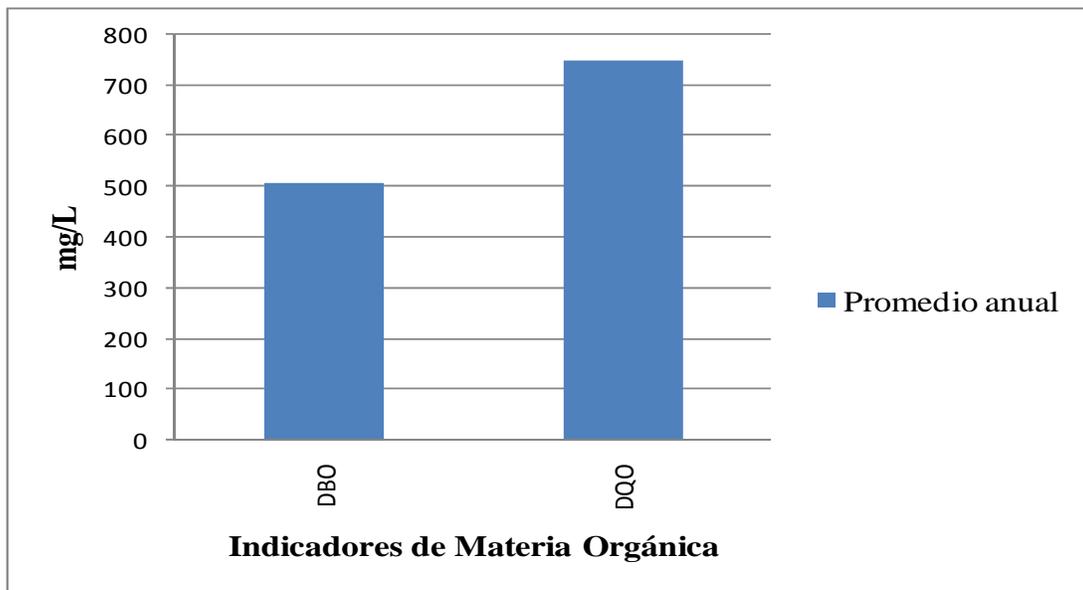


Figura 19. Promedio anual de Carga Orgánica de las aguas residuales, bajo dos parámetros: DBO y DQO.

4.5 ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS BAJO LA METODOLOGÍA DE LA IPCC/DBO

Se estimaron dos posibles producciones de biogás bajo dos parámetros; el primero a partir de la materia orgánica biodegradable identificada a través de la DBO, y el segundo a partir de toda la materia orgánica (biodegradable y no biodegradable) identificada a través de la DQO.

La DBO presenta la materia orgánica más fácil de degradar, que por siguiente produce mayor grado de emisiones de gases, ya que la degradación de materia orgánica va de la mano con el factor de emisión. Este parámetro presenta estimaciones elevadas de producción de biogás (Cuadro 4 y 5).

Cuadro 4. Producción de biogás época seca considerando DBO.

DBO								
Época seca								Kg CH ₄ /día
	Datos	Promedio	DBO (Kg/L)	Q (L/día)	SBF	FE	FTA	WM
Lunes	798.8	798.8	0.0007988	479,586	0.5	0.8	1	153.2
Martes	581.5 464.3	522.9	0.0005229	554,956	0.5	0.8	1	116.1
Miércoles	565.0 280.0	422.5	0.0004225	620,044	0.5	0.8	1	104.8
Jueves	313.1 274.7	293.9	0.0002939	461,434	0.5	0.8	1	54.2
Viernes	625.5 358.2	491.9	0.00049185	426,312	0.5	0.8	1	83.9
Sábado				485,826	0.5	0.8	1	0.0
Domingo				380,180	0.5	0.8	1	0.0
Promedio diario época seca								102.4

Cuadro 5. Producción de biogás época lluviosa considerando DBO.

Época lluviosa								Kg CH ₄ /día
	Datos	Promedio	DBO (Kg/L)	Q (L/día)	SBF	FE	FTA	WM
Lunes	1,053 963.0	1008.0	0.001008	627,784	0.5	0.8	1	253.1
Martes	11.5 1,290 200.0	500.5	0.0005005	691,803	0.5	0.8	1	138.5
Miércoles	25.0 489.0 213.0 103.0	207.5	0.0002075	1158,597	0.5	0.8	1	96.2
Jueves	460.0 277.5	368.8	0.00036875	743,171	0.5	0.8	1	109.6
Viernes	71.0 280.0 735.0	362.0	0.000362	556,730	0.5	0.8	1	80.6
Sábado	804.0 336.0	570.0	0.00057	634,825	0.5	0.8	1	144.7
Domingo	558.0	558.0	0.000558	629,545	0.5	0.8	1	140.5
Promedio diario época lluviosa								137.6

Se promedió los dos promedios de los datos obtenidos durante la época lluviosa y la época seca, debido a la escasas lluvias durante el muestreo de la época lluviosa, determinando un promedio de 120.03 Kg de CH₄ / día, lo cual equivale a una producción anual de 40,209.03 Kg de CH₄ (Cuadro 6).

Cuadro 6. Estimaciones de biogás, tomando un promedio de las posibles producciones bajo la Metodología del IPCC bajo el parámetro de DBO.

DBO	
Promedio de Kg CH ₄ / día	120.0
CH ₄ Kg/año	40,209.0
Kwh - año	614,304.7
Mwh - año	614.3

Ya que se contempló en laboratorio evaluar los sólidos volátiles totales, se logró conocer a través del modelo físico la pérdida de sólidos volátiles del sistema, que no lograron capturarse de acuerdo al tiempo de retención hidráulica de la laguna, lo cual se traduce a pérdida de gases y potencial energético, entre los cuales se incluye el metano. Por lo anterior se consideró un escenario donde se incluyeron estas pérdidas para contar con datos más precisos (Cuadro 7).

La tabla con la información completa sobre la estimación de pérdidas se encuentra en Anexos 2.

Cuadro 7. Estimaciones de biogás, considerando posibles pérdidas del sistema.

DBO	
Promedio de Kg CH ₄ / día	120.0
CH ₄ Kg/año	40,209.0
Kwh - año	614,304.7
Mwh - año	614.3

Los posibles resultados de biogás, considerando pérdidas son estimaciones más conservadoras, pero datos obtenidos a través del modelo físico indican que las producciones podrían ser mayores, estos datos serán discutidos más adelante.

4.6 ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS BAJO LA METODOLOGÍA DE LA IPCC/DQO

La DQO representa la materia orgánica fácil de degradar y la más compleja de degradar, por lo cual brindó un escenario aun más crítico sobre la posible producción de biogás.

Al comparar los datos obtenidos bajo los criterios de DBO, se observó que la producción de biogás disminuyó bajo el parámetro de DQO (Cuadro 9). Las diferencias son significativas por lo cual la estimación de posible producción anual disminuyó (Cuadro 10).

Cuadro 8. Producción de biogás época seca considerando DQO.

DQO									
Época seca									Kg CH ₄ /día
	Datos	Promedio	DQO (Kg/L)	Q (L/día)	SBF	FE	FTA	WM	
Lunes	1,689	1,689	0.0	479,586	0.5	0.25	1		101.3
Martes	1,001 751.9	876.3	0.0	554,956	0.5	0.25	1		60.8
Miércoles	168.0 333.0	250.5	0.0	620,044	0.5	0.25	1		19.4
Jueves	563.2 359.0	461.1	0.0	461,434	0.5	0.25	1		26.6
Viernes	801.6 654.8	728.2	0.0	426,312	0.5	0.25	1		38.8
Sábado	650.6	650.6	0.0	485,826	0.5	0.25	1		39.5
Domingo	952.9	952.9	0.0	380,180	0.5	0.25	1		45.3
Promedio diario época seca									47.4

Cuadro 9. Producción de biogás época lluviosa considerando DQO.

Época lluviosa									
									Kg CH ₄ /día
	Datos	Promedio	DQO (Kg/L)	Q (L/día)	SBF	FE	FTA	WM	
Lunes	1,780.3 1,344.3	1,562.3	0.001562285	627,784	0.5	0.25	1		122.6
Martes	44.3 1,967.6 331.3	781.1	0.000781053	691,803	0.5	0.25	1		67.5
Miércoles	91.4 620.1 443.6 219.4	343.6	0.000343625	1158,597	0.5	0.25	1		49.8
Jueves	671.6 771.2	721.4	0.0007214	743,171	0.5	0.25	1		67.0
Viernes	107.2 474.6 1,184.5 328.4	523.7	0.00052368	556,730	0.5	0.25	1		36.4
Sábado	99.5 1,041.3 441.4	527.4	0.00052739	634,825	0.5	0.25	1		41.9
Domingo	283.6 731.5 298.6	437.9	0.000437887	629,545	0.5	0.25	1		34.5
Promedio diario época lluviosa									60.0

Se obtuvo un promedio diario de producción de metano durante la época seca de 47.4 Kg CH₄/día (Cuadro 8) y de 60.0KgCH₄/día (Cuadro 9) durante la época lluviosa. Obteniendo un promedio anual de 53.7KgCH₄/día. Siendo esta estimación de producción menor a la estimación obtenida bajo el parámetro de DBO.

Se vuelve más crítico aún al considerar las pérdidas promedios de sólidos volátiles, que tal como se mencionó anteriormente, se traduce a un pérdida de gases, presentando una posible producción de 11,326.6 KgCH₄ al año (Cuadro 11).

Cuadro 10. Estimaciones de biogás, tomando un promedio de las posibles producciones bajo la metodología del IPCC.

DQO	
Promedio de Kg CH ₄ / día	53.7
CH ₄ Kg/año	17,978.7
Kwh - año	274,674.5
Mwh - año	274.7

En Anexos 3 se encuentra la tabla con la contabilización de pérdidas del sistema.

Cuadro 11. Estimaciones de biogás, considerando posibles pérdidas del sistema.

** Considerando pérdidas del sistema, producción neta promedio	
Promedio de Kg CH ₄ / día**	33.8
CH ₄ Kg/año**	11,326.6
Kwh - año**	173,044.9
Mwh - año**	173.0

4.7 COMPARACIÓN PRODUCCIÓN DE BIOGÁS BAJO SISTEMA ACTUAL Y BAJO SISTEMA ANAEROBIO

Bajo el parámetro de DBO, se pudo observar que al final la producción bajo el sistema anaerobio aumentó, aunque al incluir pérdidas del sistema la cantidad producida neta disminuyó comparando este dato con la producción bajo el sistema facultativo (Cuadro 12). Cabe recalcar que actualmente las lagunas No. 1 y 2 se encuentran emitiendo a la atmosfera un promedio de 96.0Kg CH₄/día. Estas emisiones están actualmente contribuyendo al calentamiento global y representan una pérdida a Zamorano, en cuanto al posible aprovechamiento que se le podría dar a este gas como fuente alterna de energía.

Cuadro 12. Producción de CH₄ bajo el parámetro de DBO, para ambos sistemas: facultativo y anaerobio.

Bajo un sistema Facultativo	
DBO	
Promedio de Kg CH ₄ / día	96.0
CH ₄ Kg/año	32,167.2
Kwh - año	491,443.7
Mwh - año	491.4
Bajo un sistema Anaerobio	
DBO	
Promedio de Kg CH ₄ / día	120.0
CH ₄ Kg/año	40,209.0
Kwh - año	614,304.7
Mwh - año	614.3
** Considerando pérdidas del sistema, producción neta promedio	
Promedio de Kg CH ₄ / día**	75.6
CH ₄ Kg/año**	25,331.7
Kwh - año**	387,011.9
Mwh - año**	387.0

Bajo el parámetro de DQO, se presentó la misma tendencia en que la producción, bajo el sistema facultativo es menor que la producción bajo el sistema anaerobio, pero al incluir las pérdidas del sistema esta producción bajo el sistema anaerobio disminuyó (Cuadro 13).

Cuadro 13. Producción de CH₄ bajo el parámetro de DQO, para ambos sistemas: facultativo y anaerobio.

Bajo un sistema Facultativo	
DQO	
Promedio de Kg CH ₄ / día	42.9
CH ₄ Kg/año	14,383.0
Kwh - año	219,739.6
Mwh - año	219.7
Bajo un sistema Anaerobio	
DQO	
Promedio de Kg CH ₄ / día	53.7
CH ₄ Kg/año	17,978.7
Kwh - año	274,674.5
Mwh - año	274.7
**Considerando pérdidas del sistema, producción neta promedio	
Promedio de Kg CH ₄ / día**	33.8
CH ₄ Kg/año**	11,326.6
Kwh - año**	173,044.9
Mwh - año**	173.0

Cabe recalcar nuevamente que no se debe olvidar que las cantidades producidas bajo el sistema facultativo bajo ambos parámetros, son pérdidas completas.

De manera general se puede concluir que el sistema anaerobio produce una mayor cantidad de metano, debido a la digestión anaerobia. Aunque el sistema cuenta con pérdidas, gran parte del metano y dióxido de carbono es capturado para su futuro aprovechamiento. La cantidad de energía producida con la cantidad producida de metano bajo el sistema anaerobio, podría equivaler a hasta un 8.5% de la demanda anual energética de Zamorano, partiendo de una demanda para el 2007 de 4,529 Mwh año, tomando la estimación más óptima.

Considerando una producción más conservadora, bajo el parámetro de DQO, llegaría a ser del 3.8% de la demanda anual de la institución, aunque la eficiencia del sistema podría ser mayor pero es recomendable considerar estimaciones más conservadoras.

4.8 VOLUMEN DE GAS PRODUCIDO

Haciendo uso de los promedios de Kg de CH₄ / año se logró estimar el volumen del biogás.

Cuadro 14. Volumen promedio de gas a partir de DBO.

DBO	
Promedio L CH ₄ /día	11,613.3
CH ₄ L/año	3890,439.1
CH ₄ M ₃ /año	3,890.4

Cuadro 15. Volumen promedio de gas a partir de DQO.

DQO	
Promedio L CH ₄ /día	5,068.9
CH ₄ L/año	1698,075.2
CH ₄ M ₃ /año	1,698.1

El volumen de gas generado está estrechamente relacionado a los promedios obtenidos bajo los distintos parámetros señalados anteriormente, en unidades de Kg CH₄/año.

Este dato es de gran importancia para conocer las futuras posibilidades de almacenamiento del biogás en caso se llegara a producir. Este dato fue un hallazgo extra para brindar un dato de gran utilidad para la institución.

4.9 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA DE LAS LAGUNAS

El tiempo de retención hidráulica varía según la laguna y la época. Esto se debe a que las entradas de aguas residuales en ambas épocas fueron distintas, por lo cual variaba el

tiempo que permanencia el agua residual en cada una, que depende a su vez del volumen total de capacidad que tiene cada una.

Cuadro 16. Tiempo de retención hidráulica de las lagunas No 1 y No 2 durante la época seca.

Laguna No 1				Laguna No 2			
Área	2361.78	m ²		Área	3057.43	m ²	
Profundidad	1.8	m		Profundidad	1.8	m	
Volumen	4251	m ³		Volumen	5503	m ³	
Tiempo de Retención Hidráulica	2.49	Semanas	3.43	Tiempo de Retención Hidráulica	3.23	Semanas	1.61
			10.43 días				22.61 días
			10.32 horas				14.64 horas
			10 días 10 horas 30 minutos				22 días 14 horas

Cuadro 17. Tiempo de retención hidráulica de las lagunas No 1 y No 2 durante la época lluviosa.

Laguna No 1				Laguna No 2			
Área	2361.78	m ²		Área	3057.43	m ²	
Profundidad	1.8	m		Profundidad	1.8	m	
Volumen	4251	m ³		Volumen	5503	m ³	
Tiempo de Retención Hidráulica	1.69	Semanas		Tiempo de Retención Hidráulica	2.18	Semanas	
Ajuste TRH (1 Semana = 6.75 días)	11.38			Ajuste TRH (1 Semana = 6.75 días)	14.73		
			11.80 días				15.28 días
			9.12 horas				17.52 horas
			11 días 9 horas				14 días 18 horas

La diferencia significativa más importante se observó en la laguna No 2, ya que durante la época seca (Cuadro 16) el agua residual presentó un tiempo de retención de casi 8 días de diferencia a comparación del tiempo de retención de la misma durante la época lluviosa (Cuadro 17).

Estas condiciones son normales ya que un menor caudal de entrada, con lleva a un mayor tiempo para recorrer toda la laguna, considerando que la laguna No 2 es mayor en área que la laguna No 1 .

Para el modelo físico desarrollado se consideró el tiempo de retención hidráulica de la laguna No 2 en época lluviosa, equivalente a 14 días 18 horas (Cuadro17). Se eligió este modelo por encontrarse en el punto medio en cuanto al tiempo de retención hidráulica de las otras lagunas durante ambas épocas.

4.10 SIMULACIÓN FLUJO DE AGUA EN LAS LAGUNAS

Cuadro 18. Simulación de flujo de agua de las lagunas en el modelo físico/época seca.

Laguna No 1	240 horas	Laguna No 2	528 horas
	10 horas		14 horas
	250 horas		542 horas
	15030 minutos		32584 minutos
	901800 segundos		1955040 segundos
	0.000982 l/s		4.527E-04 l/s
	0.0588917 l/min		2.716E-02 l/min
	58.89 ml/min		27.16 ml/min

Cuadro 19. Simulación de flujo de agua de las lagunas en el modelo físico/época lluviosa.

Laguna No 1	264 horas	Laguna No 2	336 horas
	9 horas		18 horas
	273 horas		354 horas
	16380 minutos		21240 minutos
	982800 segundos		1274400 segundos
	0.000901 l/s		0.000695 l/s
	0.054038 l/min		0.041673 l/min
	54.04 ml/min		41.67 ml/min

Conociendo ya el caudal de las lagunas y el tiempo de retención hidráulica de las mismas, se necesitaba conocer el volumen del modelo físico (en este caso 0.8851m^3), con este dato se calcularon las entradas y salidas de agua que debía tener el modelo para simular el flujo constante de volumen de agua que recibe la laguna No 2 en este caso. Siendo este una versión a pequeña escala de la laguna No. 2.

El modelo físico inició su operación con las válvulas de entrada y salida calibradas a 41.67ml/min (Cuadro 19). Este representó el flujo de la laguna No. 2 con su establecido tiempo de retención hidráulica.

Estas válvulas fueron calibradas con intervalos de dos días, luego del inicio de su operación para asegurar su flujo constante.

4.11 MUESTRAS DE AGUA DEL MODELO FÍSICO PARA CONOCER EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA BAJO PARÁMETROS DE DBO Y DQO

Se realizaron diversas muestras de agua residual del modelo físico para conocer la eficiencia del mismo en cuanto a la remoción de materia orgánica, como DBO y DQO, al igual que otros parámetros de interés en el manejo de aguas residuales como son Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y NMP coliformes fecales totales.

Cuadro 20. Entradas y salidas modelo físico en distintos escenarios.

Ensayo	Entrada Modelo Físico 01/08/2008 3487	Salida TRH 15/08/08 3516	Salida Día 30 30/08/08 3618	Salida Día 40 09/09/08 3658	Salida Día 50 19/09/08 3693
NMP Coliformes					
Fecales	240,000,000/100mL	4,300/100mL	43 000 /100mL	9 000 /100mL	40,000 /100mL
DBO	1 218,0 mg/L	515,40 mg/L	439,2 mg/L	366,5 mg/L	658 mg/L
DQO	1 441,73 mg/L	780,48 mg/L	697,4 mg/L	651,5 mg/L	761 mg/L
NTK	52,04 mg/L	44,17 mg/L	47,5 mg/L	45,9 mg/L	48.82 mg/L

Se tomaron muestras de la entrada y salida del día 15 (equivalente al tiempo de retención hidráulica de la laguna No 2), día 30, día 40 y día 50, ya que la literatura menciona que la mayor eficiencia en cuanto a producción de gas bajo digestión anaerobia es alcanzada alrededor del día 30.

Se trabajó con la entrada del modelo físico correspondiente al 01/08/2008 (Cuadro 20) ya que fue la muestra más representativa de las condiciones reales de la laguna, las entradas subsiguientes no eran representativas en relación a la salida. Esto se vio influenciado por el hecho de que las tomas de muestras fueron realizadas a las 9:00 a.m. en las fechas mencionadas en el cuadro anterior. La posible concentración de carga de las aguas residuales en su entrada varía considerablemente a lo largo del día, tal como confirmo los resultados de las muestras compuestas que mostraban variaciones significativas a lo largo del día en las cargas de DBO y DQO.

Cuadro 21. Eficiencia de remoción de NMP coliformes totales.

Día 15	99.9982%
Día 30	99.9821%
Día 40	99.9963%
Día 50	99.9833%
Promedio	99.9900%

La remoción de NMP coliformes totales, es un factor muy importante en las lagunas de estabilización, ya que se pretende destinar estas aguas para riego de cultivos experimentales a la salida de la laguna No. 4 y una disposición final al Río Yeguaré con las aguas de la laguna No.5, por lo cual dicho factor es muy relevante y se le debe brindar un seguimiento adecuado.

Como logró observarse en el (Cuadro 21) la eficiencia de remoción de NMP coliformes totales en el modelo bajo un sistema anaerobio, fue muy eficiente alcanzando un promedio de 99.99% (Cuadro 21). La eficiencia del mismo sistema anaerobio, permitió que en tan sólo 15 días se logaran eficiencias de alrededor del 100%, esto se debe a que los sistemas anaerobios en su mayoría soportan altas cargas orgánicas y debido a la profundidad de dichas lagunas, se logran sedimentar mayor cantidad de sólidos conteniendo coliformes totales y las bacterias anaerobias son las responsables de disminuir estos.

En los coliformes totales se encuentran las bacterias facultativas y estrictas anaerobias, ambas fueron las responsables del proceso de descomposición de la materia orgánica en el modelo físico. La presencia de ambas bacterias fue necesaria para eliminar otros microorganismos patógenos y ayudar a la depuración del agua, ya que ambas pueden vivir en ausencia de oxígeno.

Cuadro 22. Eficiencia de remoción de DBO.

Día 15	58%
Día 30	64%
Día 40	70%
Día 50	46%
Promedio	59%

La eficiencia de remoción de DBO también nos brindó datos de interés significativo, ya que se logró observar claramente (Cuadro 22) un incremento gradual en la eficiencia de remoción hasta el día 50 del biodigestor. Este incremento se debe probablemente a que el modelo por su pequeña escala llegó a su punto de saturación, considerando su altura y gran acumulación de lodo por parte de las aguas residuales. En este día se observó una mayor cantidad de sólidos suspendidos, lo cual indica la disminución en la eficiencia de remoción (la tabla con los análisis completos de laboratorio se encuentra en Anexo 1).

Cuadro 23. Eficiencia de remoción de DQO.

Día 15	46%
Día 30	52%
Día 40	55%
Día 50	47%
Promedio	50%

En cuanto a eficiencias de remoción de DQO los datos fueron más bajos, pero se observó (Cuadro 23) una tendencia muy similar presentada en la DBO de un incremento gradual de eficiencia hasta el día 40, llegando en este día a su mayor eficiencia con un 55% de remoción. Posteriormente en el día 50, se observó nuevamente una reducción en la eficiencia de remoción, atribuido a la saturación del modelo físico.

Como fue mencionado anteriormente fue en el día 50 en el que ambos parámetros de materia orgánica (tanto DBO como DQO) mostraron las mejores eficiencias de remoción (Figura 20). Se observó un incremento gradual de la eficiencia a medida que aumentó la cantidad de días que las aguas permanecen en el sistema, esto se presentó ya que en su mayoría las lagunas de estabilización anaerobias cuentan siempre con un mayor tiempo de retención hidráulica, es decir que las aguas permanecen más tiempo en el sistema.

Se debe permitir suficiente tiempo para la sedimentación de materiales suspendidos en las aguas y a su vez permitir que las bacterias metanogénicas proliferen en el sistema.

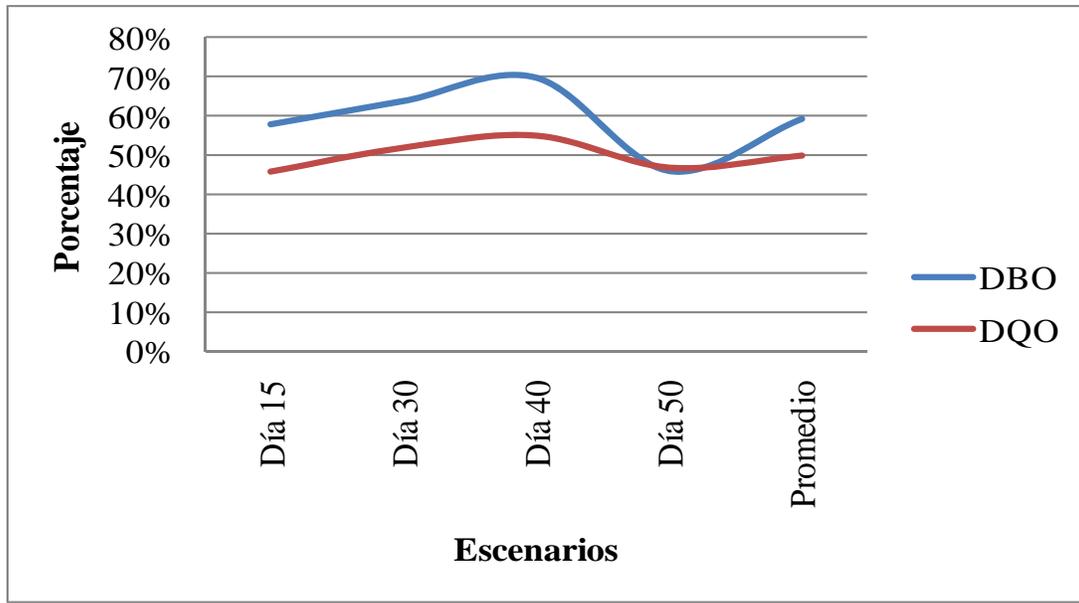


Figura 20. Eficiencia en remoción de parámetros de DBO y DQO bajo los diferentes escenarios.

Cuadro 24. Eficiencia de remoción NTK.

Día 15	15%
Día 30	9%
Día 40	12%
Día 50	6%
Promedio	10%

El nitrógeno es uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de algas y también para la síntesis de proteína. Este parámetro no debe superar los 30mg/L. Este parámetro debe ser supervisado constantemente. Bajo el sistema se logró una eficiencia de remoción aceptable para el día 40 (Cuadro 24).

4.12 MODELACIÓN DE EFICIENCIA DE LAS LAGUNAS CON LOS DATOS HISTÓRICOS DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA BAJO EL PARÁMETRO DE DBO

4.12.1 Escenario 1 (15 días de operación del Modelo Físico) S2, S4 Y S5

Cabe señalar que durante la modelación se hizo énfasis en las salidas 2 (las salidas de la laguna No. 2), de la salida 4 (salida de la laguna No. 4) y de la salida 5 (salida de la laguna No.5).

En el escenario 1, en cuanto a la salida de la laguna No. 2 (S2) se obtuvieron 9 salidas que se encontraban por debajo de los datos históricos (Cuadro 25).

Cuadro 25. Escenario 1 (15 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).

Escenario 1 S2			Escenario 1 S4				Escenario 1 S5			
DBO	15	DH	DBO	15	DH		DBO	15	DH	
	S2	S2		S4	S4	Norma		S5	S5	Norma
Mar-05	156.2	117.0	Mar-05	105.5	79.0	50	Mar-05	20.7	15.5	50
Ago-05	70.6	232.0	Ago-05	12.4	40.8	50	Ago-05	4.7	15.6	50
Sep-05	226.0	216.3	Sep-05	78.2	74.9	50	Sep-05	40.4	38.7	50
Nov-05	55.4	176.3	Nov-05	8.8	28.1	50	Nov-05	3.0	9.4	50
May-06	515.0	388.6	May-06	39.5	29.8	50	May-06	32.5	24.5	50
Ago-06	140.7	172.0	Ago-06	30.2	36.9	50	Ago-06	9.2	11.3	50
Sep-06	128.0	236.9	Sep-06	38.1	70.6	50	Sep-06	13.8	25.6	50
Nov-06	142.8	260.0	Nov-06	30.7	55.8	50	Nov-06	6.1	11.1	50
Dic-06	589.2	162.8	Dic-06	126.7	35.0	50	Dic-06	49.9	13.8	50
Ene-07	350.3	359.0	Ene-07	19.6	20.1	50	Ene-07	6.7	6.9	50
May-07	196.1	205.0	May-07	40.3	42.1	50	May-07	21.6	22.6	50
Jun-07	401.9	154.0	Jun-07	174.9	67.0	50	Jun-07	24.8	9.5	50
Jul-07	301.6	81.0	Jul-07	202.9	54.5	50	Jul-07	48.0	12.9	50
Ago-07	232.3	267.0	Ago-07	47.0	54.0	50	Ago-07	9.4	10.8	50
Sep-07	174.6	140.9	Sep-07	40.8	32.9	50	Sep-07	11.9	9.6	50
Oct-07	407.8	93.0	Oct-07	285.0	65.0	50	Oct-07	96.5	22.0	50
Nov-07	271.3	225.5	Nov-07	44.4	36.9	50	Nov-07	18.9	15.7	50
Ene-08	418.0	218.6	Ene-08	128.7	67.3	50	Ene-08	26.0	13.6	50
Feb-08	162.0	163.0	Feb-08	49.7	50.0	50	Feb-08	7.0	7.0	50

El dato máximo modelado de la salida de la laguna No. 2 (S2) fue en diciembre 2006 (589.22 mg/L) y como dato mínimo bajo el escenario 1, fue de 70.6 mg/L en agosto 2005 (Figura 21). El dato máximo alcanzando en los datos históricos fue de 388.6 mg/L en mayo 2006 (Figura 21). Siempre se observaron algunas salidas que sobrepasaron los datos históricos, pero eso se debió a que el sistema se estaba estabilizando.

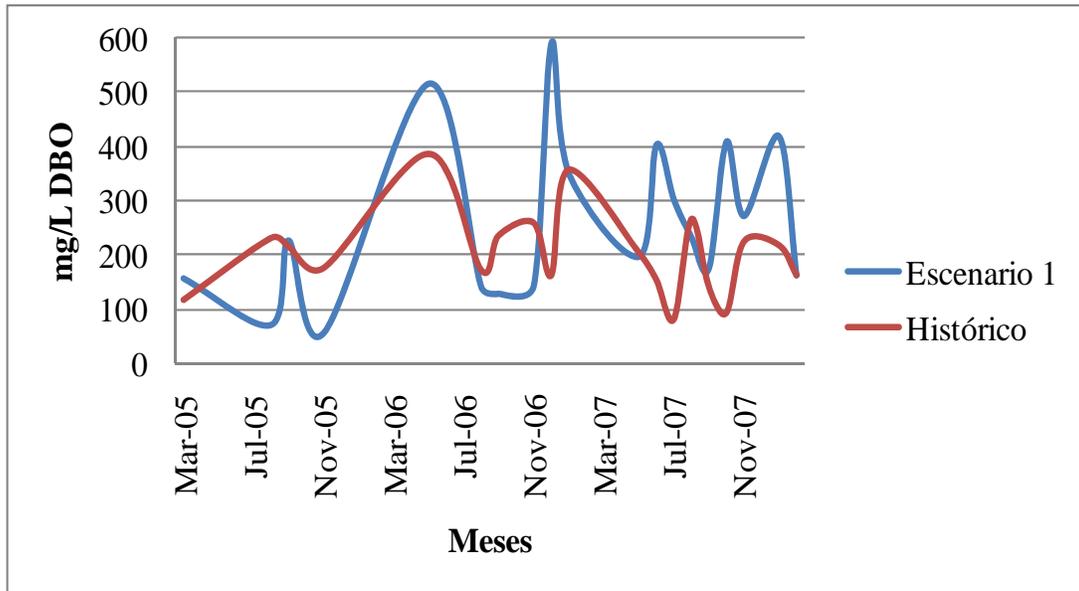


Figura 21. Escenario 1 (15 días) Salida 2 (S2).

Es preciso mencionar que la proliferación de las bacterias de interés requiere de un tiempo determinado, en este caso la proliferación de bacterias anaerobias facultativas y anaerobias estrictas, las cuales logran sobrevivir bajo condiciones anaerobias y fueron las que degradaron la materia orgánica.

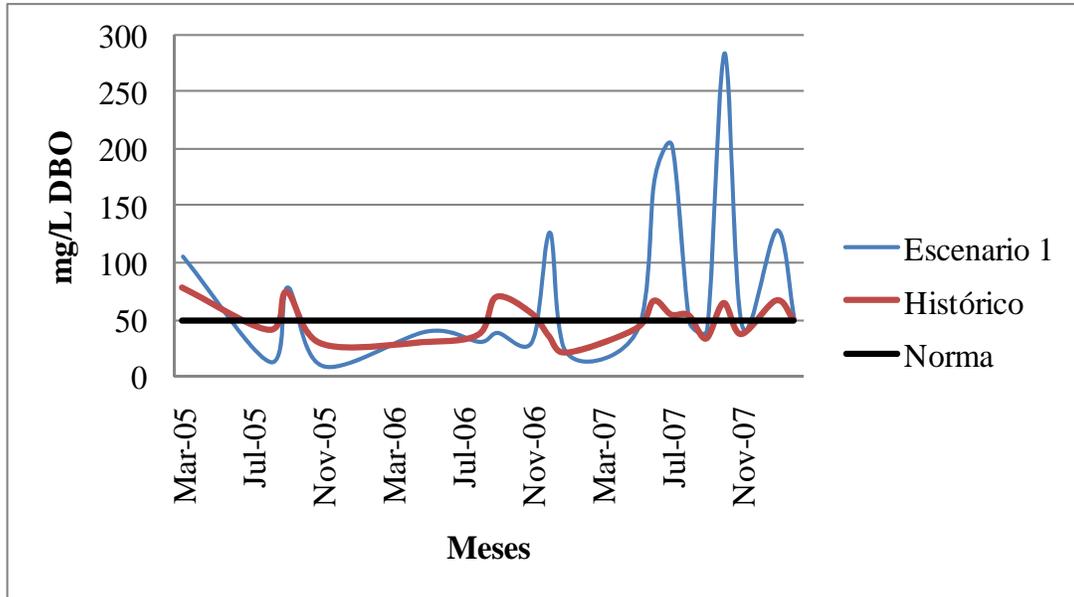


Figura 22. Escenario 1 (15 días) Salida 4 (S4).

La salida de la laguna No. 4 (S4) es de gran importancia para este sistema en específico, ya que sus aguas son utilizadas para el riego de cultivos experimentales, por lo cual deben cumplir ciertas normas ya establecidas como valores menores a 50 mg/L de DBO.

Los datos históricos revelaron que dicha salida presentó nueve datos que sobrepasaron la norma, bajo la simulación del escenario 1 de un sistema anaerobio las salidas sobre la norma disminuyen a siete (Figura 22). Diez salidas se encuentran por debajo de los datos históricos lo cual demostró un mejor funcionamiento.

En cuanto a la salida de la laguna No 5 (S5), ésta es de gran importancia ya que las aguas de esta laguna son vertidas al río Yeguaré por lo cual su carga de DBO tampoco debe sobrepasar la norma de 50 mg/L. Bajo la simulación del escenario 1 (15 días de funcionamiento del sistema anaerobio) se evidenció salidas bien bajas en el sistema, sólo una salida sobrepasó la norma, que fue la salida de octubre 2007, con 96.5 mg/L de DBO (Figura 23).

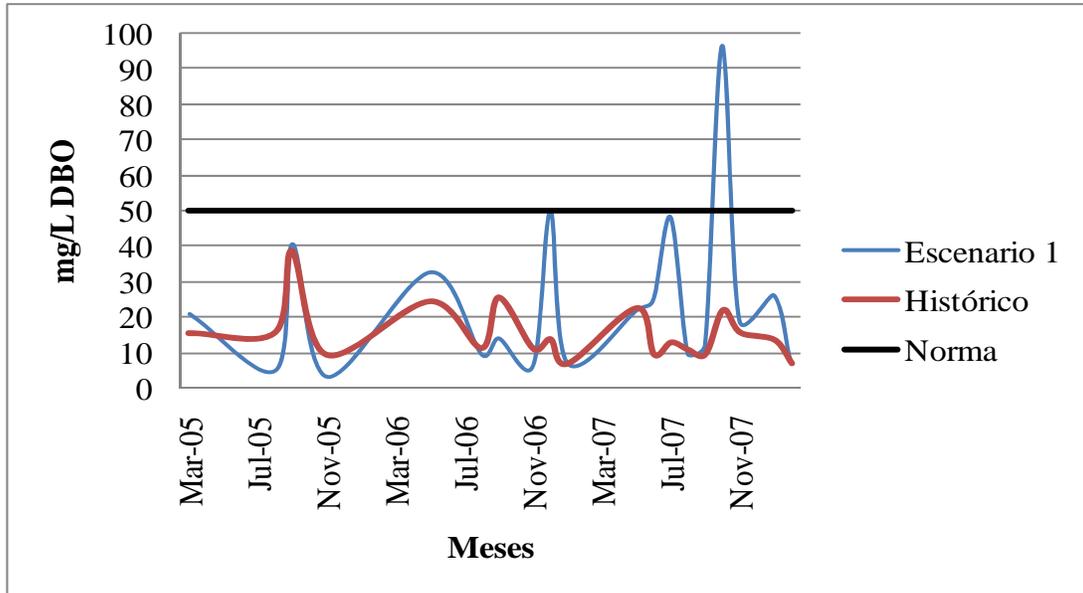


Figura 23. Escenario 1(15 días) Salida 5 (S5).

Se evidenció nueve salidas por debajo de los datos históricos y diez salidas bajo la norma pero aún con datos más elevados que los históricos, lo cual indicó que el funcionamiento de dicho sistema bajo este escenario (15 días) no fue el más eficiente.

4.12.2 Escenario 2 (30 días) S2, S4 y S5

Cuadro 26. Escenario 2 (30 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).

	Escenario 2 S2			Escenario 2 S4			Escenario 2 S5				
	DBO	30	DH	DBO	30	DH	DBO	30	DH		
	S2	S2		S4	S4	Norma	S5	S5	Norma		
Mar-05	133.9	117.0		Mar-05	90.4	79.0	50	Mar-05	12.0	15.5	50
Ago-05	60.5	232.0		Ago-05	10.6	40.8	50	Ago-05	0.7	15.6	50
Sep-05	193.7	216.3		Sep-05	67.1	74.9	50	Sep-05	12.0	38.7	50
Nov-05	47.5	176.3		Nov-05	7.6	28.1	50	Nov-05	0.4	9.4	50
May-06	441.4	388.6		May-06	33.9	29.8	50	May-06	2.1	24.5	50
Ago-06	120.6	172.0		Ago-06	25.9	36.9	50	Ago-06	1.7	11.3	50
Sep-06	109.7	236.9		Sep-06	32.7	70.6	50	Sep-06	3.5	25.6	50
Nov-06	122.4	260.0		Nov-06	26.3	55.8	50	Nov-06	1.1	11.1	50
Dic-06	505.0	162.8		Dic-06	108.6	35.0	50	Dic-06	9.2	13.8	50
Ene-07	300.2	359.0		Ene-07	16.8	20.1	50	Ene-07	0.3	6.9	50
May-07	168.1	205.0		May-07	34.5	42.1	50	May-07	3.8	22.6	50
Jun-07	344.5	154.0		Jun-07	149.9	67.0	50	Jun-07	9.2	9.5	50
Jul-07	258.5	81.0		Jul-07	173.9	54.5	50	Jul-07	27.7	12.9	50
Ago-07	199.1	267.0		Ago-07	40.3	54.0	50	Ago-07	1.6	10.8	50
Sep-07	149.7	140.9		Sep-07	35.0	32.9	50	Sep-07	2.4	9.6	50
Oct-07	349.6	93.0		Oct-07	244.3	65.0	50	Oct-07	57.8	22.0	50
Nov-07	232.6	225.5		Nov-07	38.1	36.9	50	Nov-07	2.6	15.7	50
Ene-08	358.3	218.6		Ene-08	110.3	67.3	50	Ene-08	6.9	13.6	50
Feb-08	138.9	163.0		Feb-08	42.6	50.0	50	Feb-08	1.8	7.0	50

Se observó una tendencia de mejora en el sistema bajo el escenario 2 (30 días de operación del modelo físico), en el cual se observó un aumento en el número de salidas de la laguna No.2 más bajas que los datos históricos, de nueve salidas presentes en el escenario 1, se aumentó a diez salidas bajo el escenario 2 (Cuadro 26).

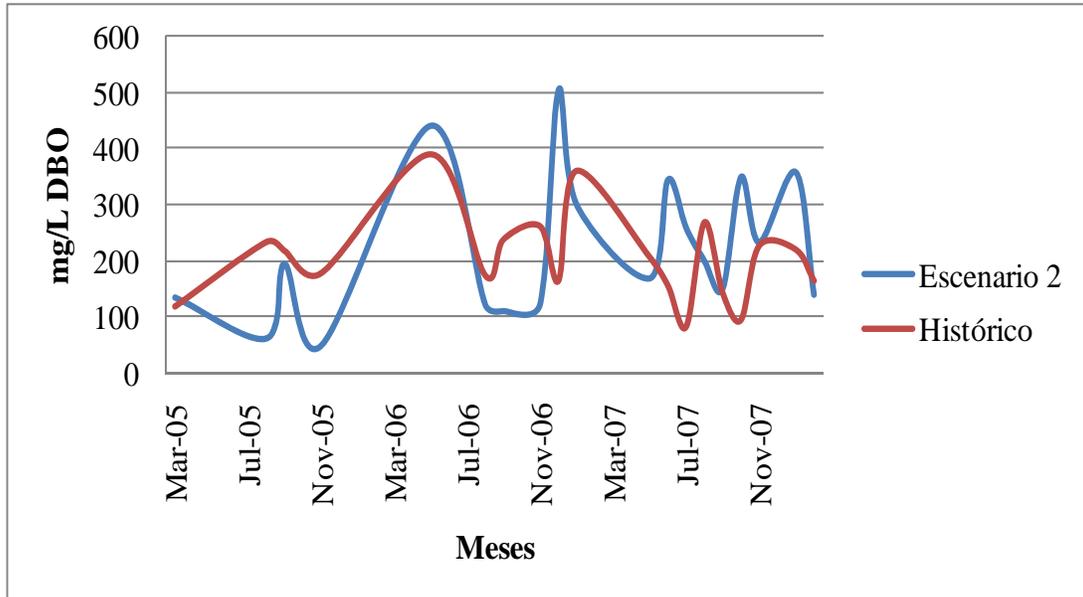


Figura 24. Escenario 2(30 días) Salida 2 (S2).

La salida de la laguna No. 2 (S2) máxima bajo dicho escenario fue de 505.0 mg/L en diciembre 2006 y la salida máxima histórica de 359 mg/L en enero 2007 (Figura 24). Se observó que esta salida bajo el escenario 2 fue mayor que la salida máxima histórica, pero este tipo de flujo bajo y alto en lagunas de estabilización es normal. La salida de la laguna No. 2 (S2) mínima bajo dicho escenario fue de 60.5 mg/L en agosto 2005.

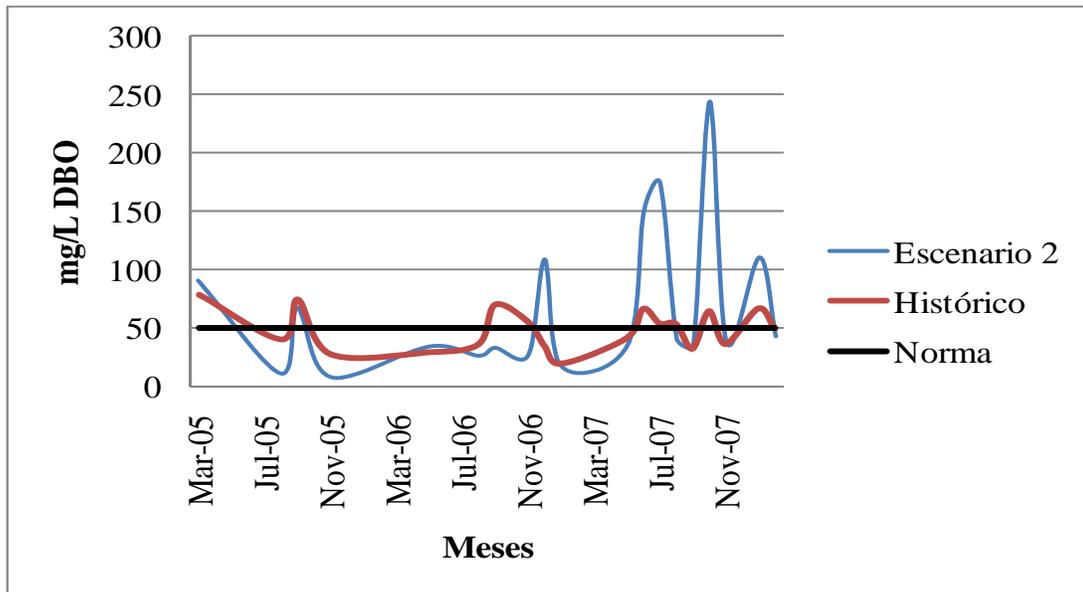


Figura 25. Escenario 2 (30 días) Salida 4 (S4).

En la salida de la laguna No. 4 (S4), se evidenció la misma cantidad de salidas más altas bajo el escenario 1, con la única diferencia que éstas se encontraron más altas que los datos históricos pero más bajas que las salidas de la laguna No.4 (S4), bajo el escenario 1. Corroborando la afirmación que las salidas de la laguna No.4 y 5 se vieron fuertemente influenciadas por las salidas de la laguna No. 2. A medida que mejora la eficiencia de remoción en la laguna No.2, todo el sistema se ve influenciado de manera positiva.

En la salida de la laguna No. 5 (S5), se evidenció una transición de nueve salidas más bajas que las salidas históricas bajo el escenario 1, a 17 salidas por debajo de los datos históricos en el escenario 2 (Figura 26), corroborando la suposición de una mejora gradual en el sistema y que dicho sistema está llegando a un punto de estabilización, es decir a un punto óptimo.

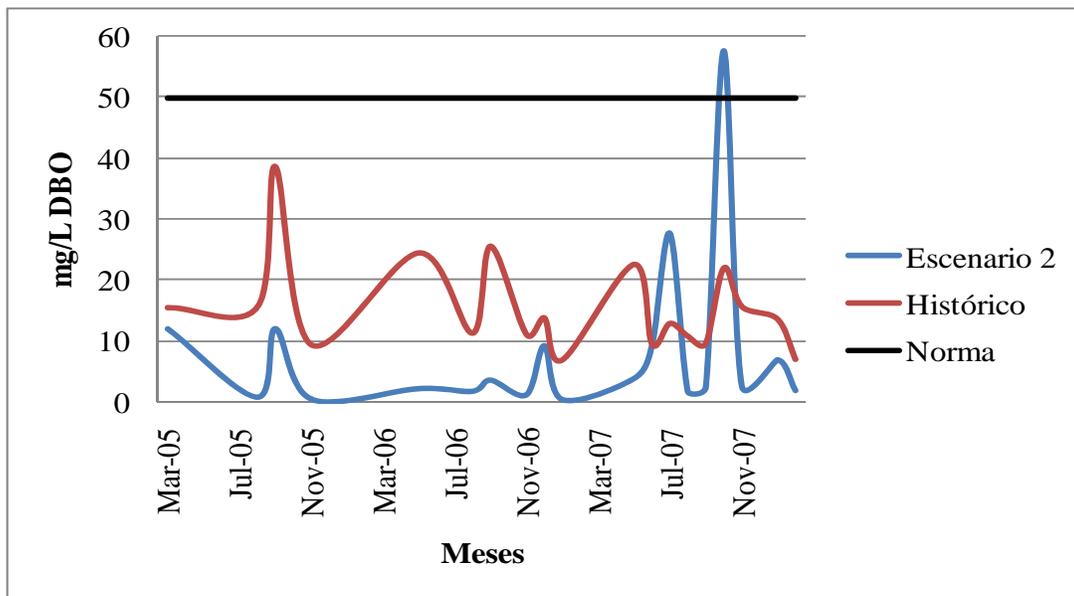


Figura 26. Escenario 2 (30 días) Salida 5 (S5).

4.12.3 Escenario 3 (40 días) S2, S4 y S5

El escenario 3 demostró un sistema más estable en el cual se llegó a una eficiencia del sistema significativa. Se observó una mejora en la salida de la laguna No. 2 (S2), que en dicho escenario logró 14 salidas que se encontraron por debajo de los datos históricos (Cuadro 27). Indicando una mejora en cuanto al funcionamiento del sistema en su totalidad.

Cuadro 27. Escenario 3 (40 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).

Escenario 3 S2			Escenario 3 S4			Escenario 3 S5				
DBO	40	DH	DBO	40	DH	DBO	40	DH		
	S2	S2	S4	S4	Norma	S5	S5	Norma		
Mar-05	111.6	117.0	Mar-05	75.4	79.0	50	Mar-05	10.0	15.5	50
Ago-05	50.4	232.0	Ago-05	8.9	40.8	50	Ago-05	0.6	15.6	50
Sep-05	161.4	216.3	Sep-05	55.9	74.9	50	Sep-05	10.0	38.7	50
Nov-05	39.6	176.3	Nov-05	6.3	28.1	50	Nov-05	0.3	9.4	50
May-06	367.9	388.6	May-06	28.2	29.8	50	May-06	1.8	24.5	50
Ago-06	100.5	172.0	Ago-06	21.6	36.9	50	Ago-06	1.4	11.3	50
Sep-06	91.4	236.9	Sep-06	27.2	70.6	50	Sep-06	2.9	25.6	50
Nov-06	102.0	260.0	Nov-06	21.9	55.8	50	Nov-06	0.9	11.1	50
Dic-06	420.9	162.8	Dic-06	90.5	35.0	50	Dic-06	7.7	13.8	50
Ene-07	250.2	359.0	Ene-07	14.0	20.1	50	Ene-07	0.3	6.9	50
May-07	140.1	205.0	May-07	28.8	42.1	50	May-07	3.2	22.6	50
Jun-07	287.1	154.0	Jun-07	124.9	67.0	50	Jun-07	7.7	9.5	50
Jul-07	215.4	81.0	Jul-07	144.9	54.5	50	Jul-07	23.1	12.9	50
Ago-07	165.9	267.0	Ago-07	33.6	54.0	50	Ago-07	1.4	10.8	50
Sep-07	124.7	140.9	Sep-07	29.1	32.9	50	Sep-07	2.0	9.6	50
Oct-07	291.3	93.0	Oct-07	203.6	65.0	50	Oct-07	48.2	22.0	50
Nov-07	193.8	225.5	Nov-07	31.7	36.9	50	Nov-07	2.2	15.7	50
Ene-08	298.6	218.6	Ene-08	91.9	67.3	50	Ene-08	5.7	13.6	50
Feb-08	115.7	163.0	Feb-08	35.5	50.0	50	Feb-08	1.5	7.0	50

La salida máxima de la laguna No. 2, bajo el escenario 3 llegó a ser de 420.9 mg/L en diciembre 2006, comparado a una máxima de los datos históricos de 388.6 mg/L en mayo de ese mismo año (Figura 26). Nuevamente se observó un dato mayor a los históricos pero este dato no es suficiente para confirmar el funcionamiento del sistema como un todo ya que como se mencionó anteriormente es común observar fluctuaciones en cuánto a remoción en sistemas de tratamiento de aguas primarias, lagunas de estabilización en este caso.

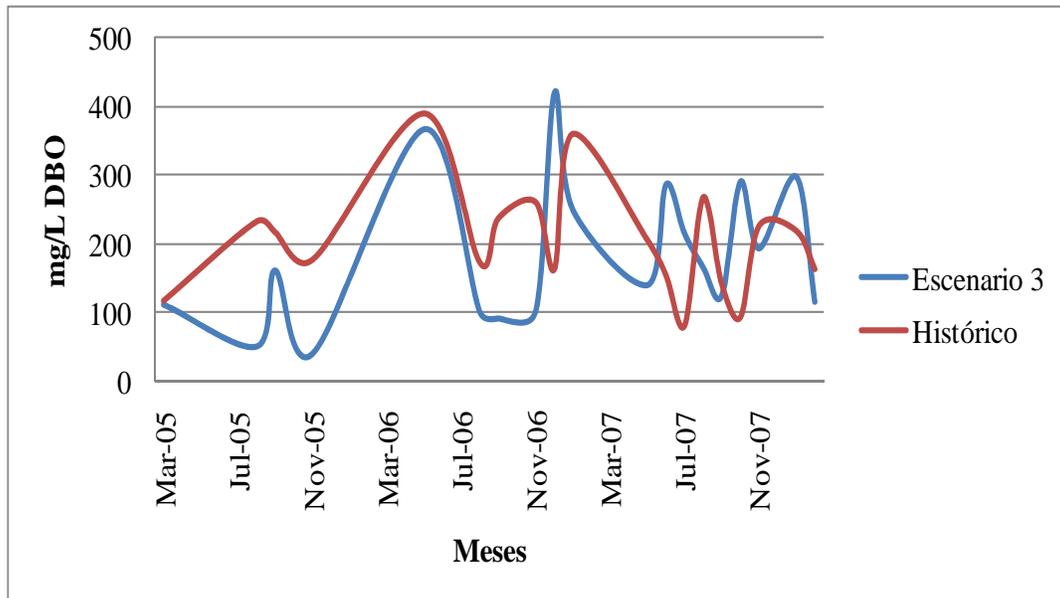


Figura 27. Escenario 3(40 días) Salida 2 (S2).

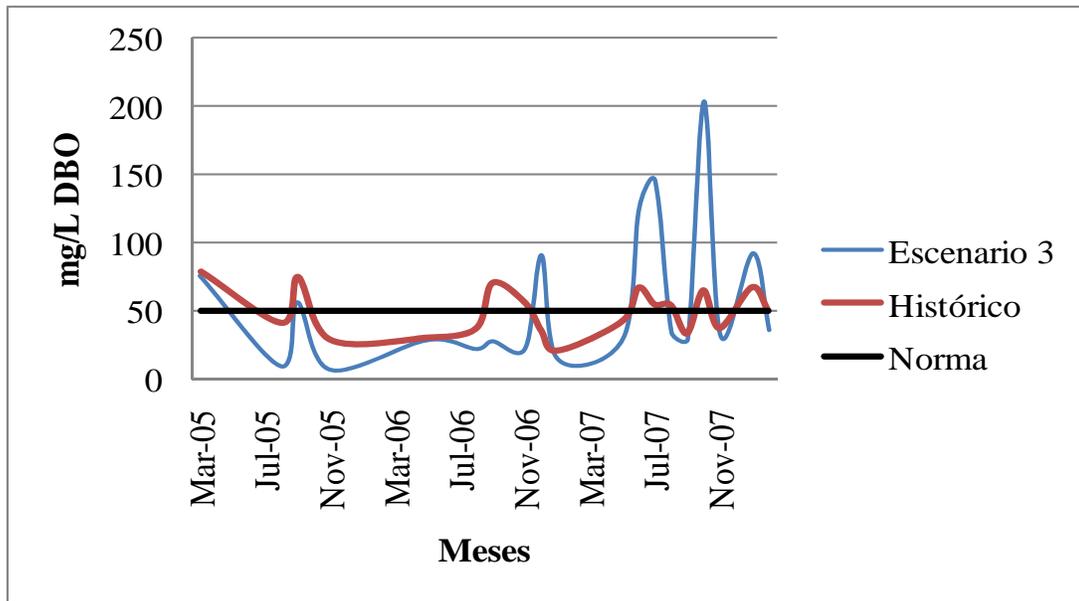


Figura 28. Escenario 3(40 días) Salida 4 (S4).

En la salida de la laguna No. 4 (S4), se observó también la misma tendencia de mejora en la cual aumento el número de salidas por debajo de los datos históricos, de 10 salidas en el escenario pasado a 14 salidas por debajo de los datos históricos (Cuadro 27). Nueve salidas de la salida de la laguna No 4 (S4) históricamente se habían encontrado sobre la norma y bajo el escenario 3, esto logró disminuir a seis salidas (Figura 28). La salida máxima de la laguna No. 4 (S4), bajo este escenario fue de 203.6 mg/L DBO en octubre 2007 (Figura 28).

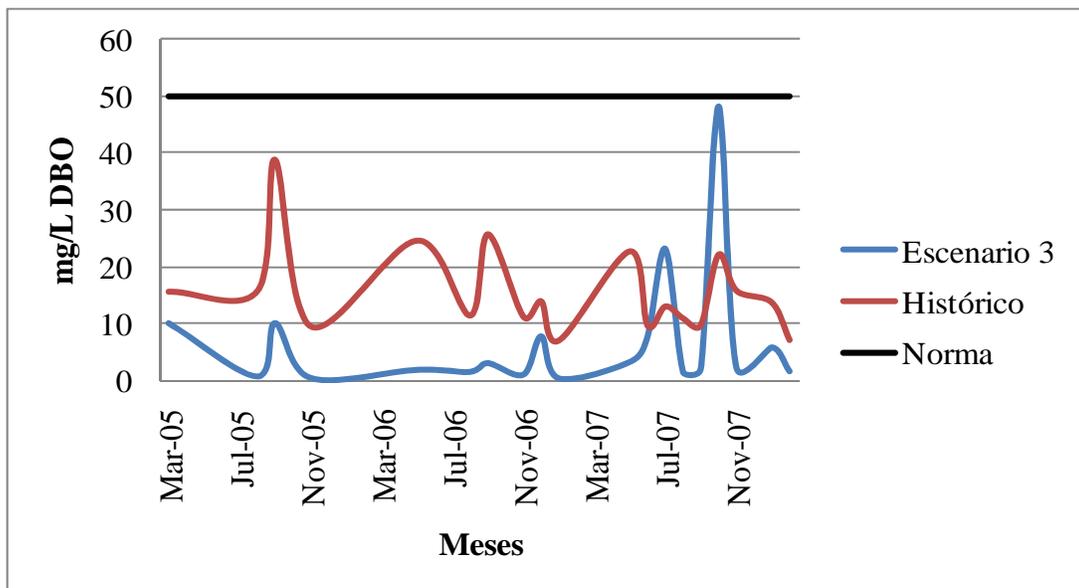


Figura 29. Escenario 3(40 días) Salida 5 (S5).

La situación mejoró en la salida de la laguna No. 5 (S5), ya que 17 salidas se encontraron por debajo de los datos históricos y ninguna salida pasó la norma (Figura 29). Se observó que sólo dos datos de la salida de la laguna No.5 (S5) bajo el escenario sobrepasaron los 10 mg/L de DBO, el dato de julio 2007 (23.0 mg/L DBO) y el dato de octubre 2007 (48.1mg/L DBO) (Figura 29). Estos datos son datos muy bajos que demostraron una eficiencia muy alta en cuanto a remoción al final del sistema.

Es bajo este escenario que se logró llegar a la eficiencia del sistema, que es corroborado por salidas con bajas tan significativas en cuanto a DBO.

4.12.4 Escenario 4 (50 días) S2, S4 y S5

Cuadro 28. Escenario 4 (50 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).

Escenario 4 S2			Escenario 4 S4				Escenario 4 S5			
DBO	50	DH	DBO	50	DH		DBO	50	DH	
	S2	S2		S4	S4	Norma		S5	S5	Norma
Mar-05	18.0	117.0	Mar-05	135.6	79.0	50	Mar-05	18.0	15.5	50
Ago-05	1.1	232.0	Ago-05	16.0	40.8	50	Ago-05	1.1	15.6	50
Sep-05	18.0	216.3	Sep-05	100.6	74.9	50	Sep-05	18.0	38.7	50
Nov-05	0.6	176.3	Nov-05	11.4	28.1	50	Nov-05	0.6	9.4	50
May-06	3.2	388.6	May-06	50.8	29.8	50	May-06	3.2	24.5	50
Ago-06	2.5	172.0	Ago-06	38.8	36.9	50	Ago-06	2.5	11.3	50
Sep-06	5.3	236.9	Sep-06	49.0	70.6	50	Sep-06	5.3	25.6	50
Nov-06	1.7	260.0	Nov-06	39.4	55.8	50	Nov-06	1.7	11.1	50
Dic-06	13.8	162.8	Dic-06	162.9	35.0	50	Dic-06	13.8	13.8	50
Ene-07	0.5	359.0	Ene-07	25.2	20.1	50	Ene-07	0.5	6.9	50
May-07	5.7	205.0	May-07	51.8	42.1	50	May-07	5.7	22.6	50
Jun-07	13.9	154.0	Jun-07	224.8	67.0	50	Jun-07	13.9	9.5	50
Jul-07	41.5	81.0	Jul-07	260.9	54.5	50	Jul-07	41.5	12.9	50
Ago-07	2.4	267.0	Ago-07	60.4	54.0	50	Ago-07	2.4	10.8	50
Sep-07	3.6	140.9	Sep-07	52.4	32.9	50	Sep-07	3.6	9.6	50
Oct-07	86.7	93.0	Oct-07	366.5	65.0	50	Oct-07	86.7	22.0	50
Nov-07	4.0	225.5	Nov-07	57.1	36.9	50	Nov-07	4.0	15.7	50
Ene-08	10.3	218.6	Ene-08	165.5	67.3	50	Ene-08	10.3	13.6	50
Feb-08	2.7	163.0	Feb-08	63.9	50.0	50	Feb-08	2.7	7.0	50

En el escenario 4 bajo parámetro de DBO, se encontró datos curiosos, ya que luego de una gradual mejora observada en los escenarios anteriores, en este se observó una caída completa del sistema.

Se debe aclarar este estudio se realizó bajo la hipótesis de que al llegar a 50 días el sistema podría encontrarse ya saturado. Asimismo, como las lagunas anaerobias están diseñadas para acumular una gran cantidad de lodos, tomando en cuenta el tamaño del modelo físico y las alturas de su válvula de salida, este estudio también trabajó bajo la suposición de que el modelo ya había llegado a su capacidad máxima. Al llegar a su capacidad máxima de acumulación de lodos, los sólidos suspendidos del agua residual entrante ya no son capaces de sedimentarse y el sistema ya no es capaz de depurar el agua como lo hacía anteriormente.

Se llegaron a estas dos conclusiones porque en la última muestra (día 50) se observó claramente una mayor turbidez en la misma y los análisis de laboratorio demostraron la presencia de un gran número de sólidos en suspensión.

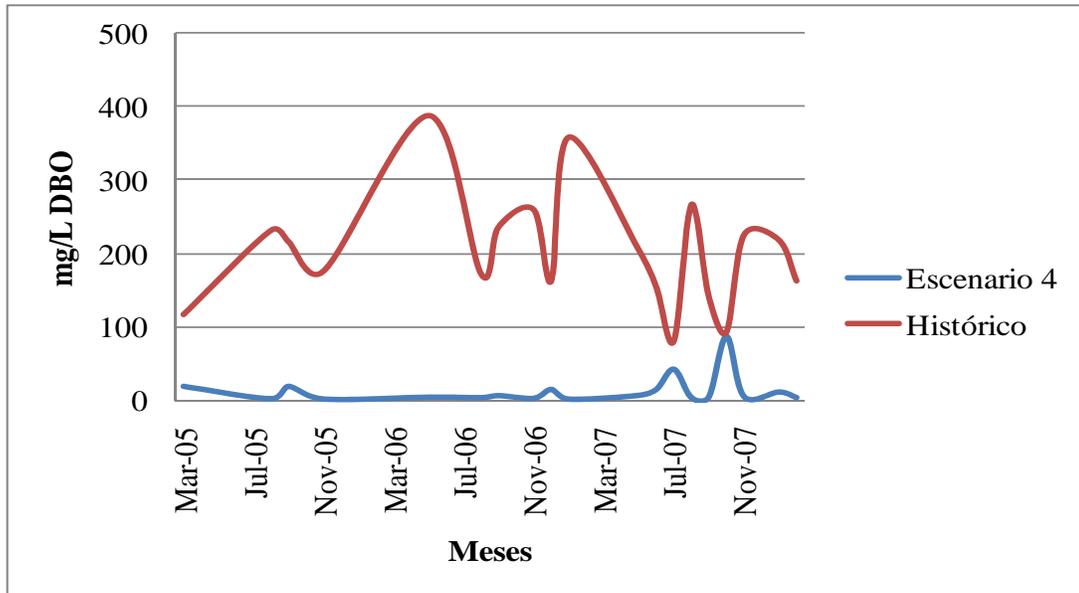


Figura 30. Escenario 4(50 días) Salida 2 (S2).

En la salida de la laguna No. 2 (S2), se observó una mejora sustancial, ya que todos los datos obtenidos se encontraron por debajo de los datos históricos (Figura 30), pero esta tendencia no se mantuvo a lo largo del sistema.

En la salida de la laguna No. 4 (S4), la situación empeoró al aumentar el número de salidas más altas que la norma, bajo este escenario dichas salidas aumentaron a 13, luego de una disminución a seis en el escenario 3 (Figura 31).

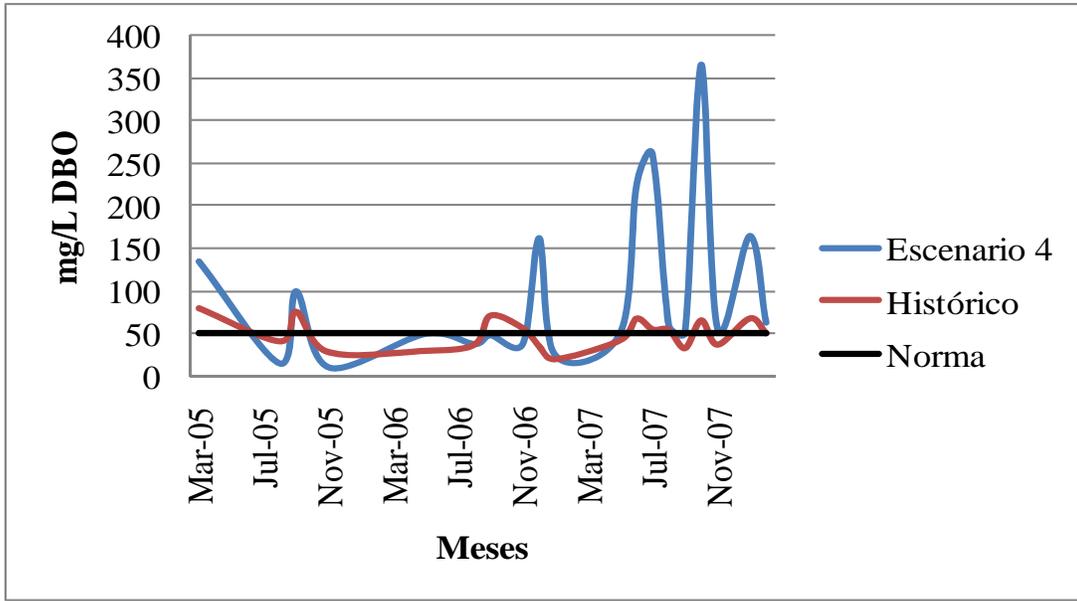


Figura 31. Escenario 4(50 días) Salida 4 (S4).

Así como aumentó el número de salidas sobre la norma, aumentaron las salidas restantes, que en algunos casos no fueron más altas que las históricas pero si se evidenció un incremento en la concentración de la carga orgánica al final del agua.

Este comportamiento en la salida de la laguna No. 4 (S4) se vio reflejado en la salida de la laguna No. 5 (S5), donde se obtiene una salida sobre la norma establecida de 86.7 mg/L para octubre 2007 (Figura 30), la misma salida que había logrado disminuirse en los escenario 2 y 3.

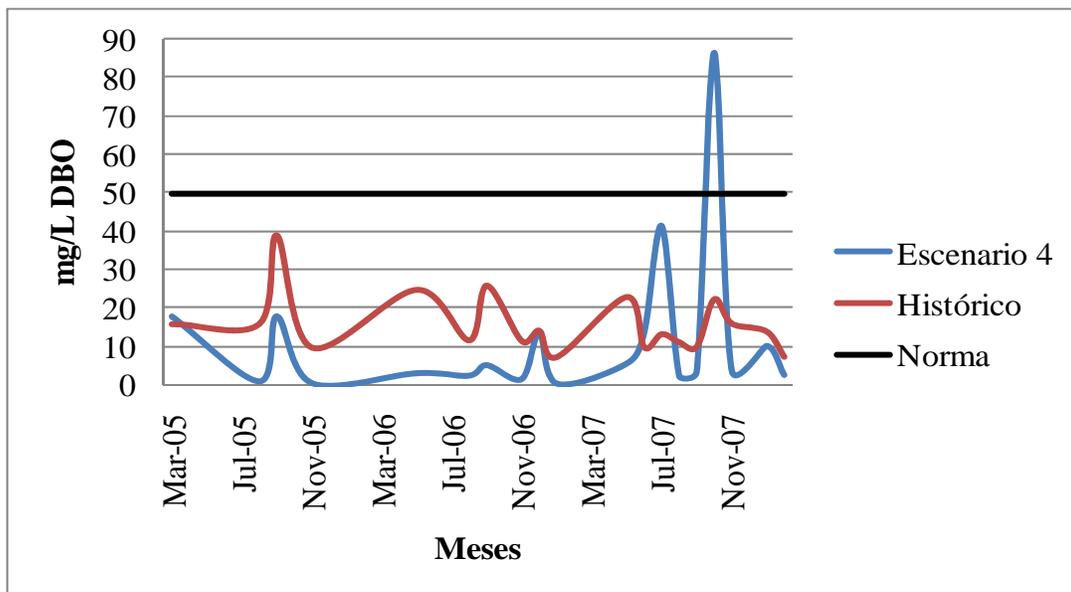


Figura 32. Escenario 4(50 días) Salida 5 (S5).

4.13 MODELACIÓN DE EFICIENCIA DE LAS LAGUNAS CON LOS DATOS HISTÓRICOS DE REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA BAJO PARÁMETRO DE DQO

4.13.1 ESCENARIO 1 (15 DÍAS) S2, S4 Y S5

Los datos obtenidos bajo el Escenario 1 bajo un parámetro de DQO, confirman que la DQO representa la materia orgánica más compleja de degradar, ésta requiere de una mayor cantidad de días para lograr observar resultados satisfactorios.

Cuadro 29. Escenario 1 (15 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).

Escenario 1 S2			Escenario 1 S4				Escenario 1 S5			
DQO	15	DH	DQO	15	DH		DQO	15	DH	
	S2	S2		S4	S4	Norma		S5	S5	Norma
Mar-05	310.1	435.6	Mar-05	192.2	270.0	150	Mar-05	39.7	90.0	150
Ago-05	140.1	664.0	Ago-05	25.8	122.1	150	Ago-05	3.6	91.6	150
Sep-05	639.9	611.8	Sep-05	128.0	122.4	150	Sep-05	13.8	65.9	150
Nov-05	74.0	332.9	Nov-05	23.0	103.5	150	Nov-05	1.3	18.8	150
Abr-06	1,078.3	714.2	Abr-06	162.3	107.5	150	Abr-06	26.2	115.2	150
May-06	952.8	1029.3	May-06	95.3	102.9	150	May-06	10.9	117.6	150
Ago-06	423.5	1176.5	Ago-06	74.1	205.9	150	Ago-06	7.4	117.7	150
Sep-06	211.8	1004.9	Sep-06	49.6	235.3	150	Sep-06	7.7	156.9	150
Nov-06	268.4	1272.3	Nov-06	41.9	198.8	150	Nov-06	1.3	39.8	150
Dic-06	1,046.7	497.0	Dic-06	355.9	169.0	150	Dic-06	42.7	59.6	150
Ene-07	599.4	1553.0	Ene-07	42.5	110.0	150	Ene-07	1.4	50.0	150
Abr-07	330.8	720.6	Abr-07	111.6	243.2	150	Abr-07	12.5	81.0	150
May-07	340.5	684.6	May-07	94.1	189.2	150	May-07	8.7	63.0	150
Jun-07	734.5	617.6	Jun-07	218.6	183.8	150	Jun-07	18.2	51.5	150
Jul-07	621.0	360.0	Jul-07	258.8	150.0	150	Jul-07	86.3	120.0	150
Ago-07	837.0	790.0	Ago-07	190.7	180.0	150	Ago-07	38.6	160.0	150
Sep-07	344.1	476.2	Sep-07	109.0	150.8	150	Sep-07	12.7	55.6	150
Oct-07	729.6	387.3	Oct-07	344.2	182.7	150	Oct-07	102.5	115.4	150
Nov-07	780.9	942.1	Nov-07	109.6	132.2	150	Nov-07	10.6	90.9	150
Ene-08	794.0	850.6	Ene-08	158.7	170.0	150	Ene-08	19.0	102.0	150
Feb-08	281.4	610.7	Feb-08	84.4	183.3	150	Feb-08	10.2	74.1	150

En la salida de la laguna No. 2 (S2), se observaron 14 salidas que se encontraron por debajo de los datos históricos (Cuadro 29).

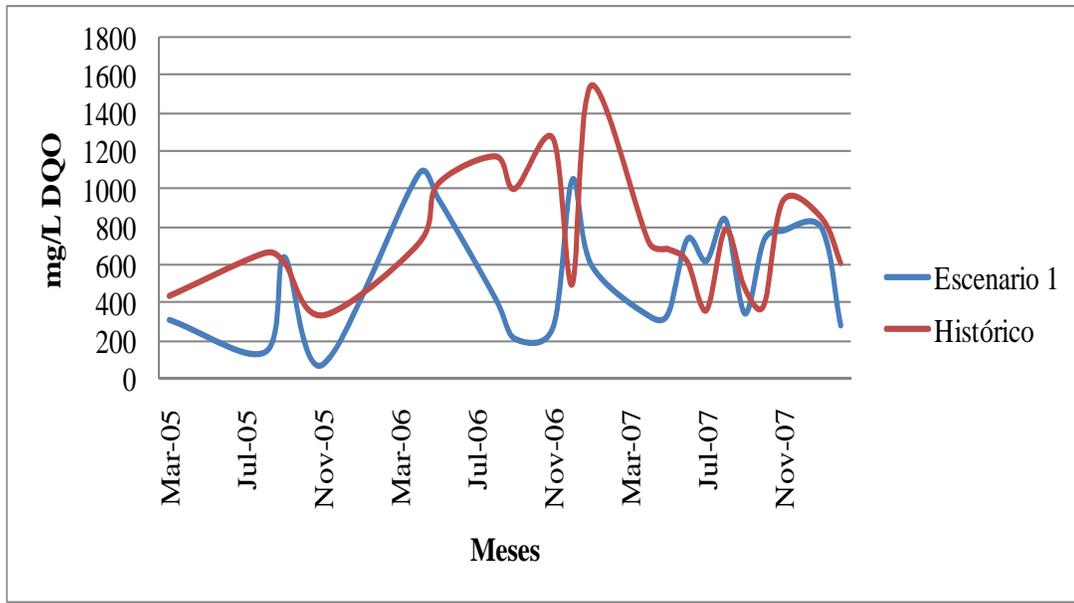


Figura 33. Escenario 1 (15 días) Salida 2 (S2).

Se observaron los picos históricos de la salida de la laguna No. 2 (S2) en enero 2007, con un DQO de salida de 1,553.0 mg/L (Figura 33), teniendo bajo el escenario 1 un pico en abril 2006 de 1,078.3 mg/L de DQO. Se observó una clara disminución en cuanto a picos anteriores.

En cuanto a dicha salida, el escenario 1 presenta datos favorables, pero esta tendencia no se mantiene a lo largo de las otras salidas.

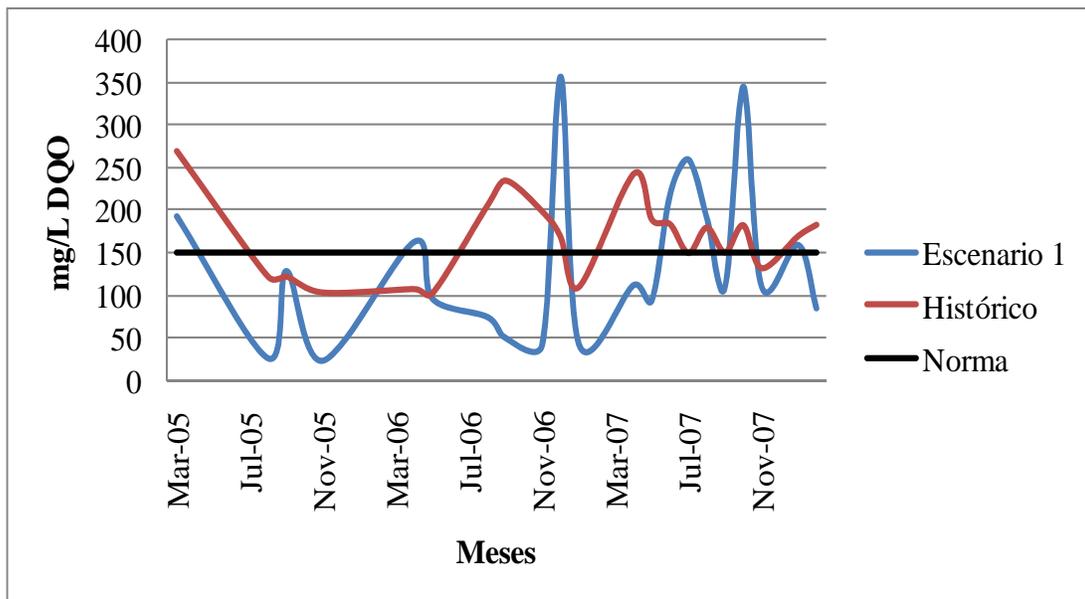


Figura 34. Escenario 1 (15 días) Salida 4 (S4).

La salida de la laguna No. 4 (S4), no presenta tan buen escenario como la S2, en ésta se observó que históricamente la salida de la laguna No. 4 (S4) ha tenido 13 salidas en las

cuales las concentraciones de DQO están sobre la norma establecida de 150 mg/L de DQO (Cuadro 29). La cantidad de salidas arriba de la norma bajo la simulación de eficiencias encontradas en el día 15 del modelo físico, disminuyó a 8, pero aún así se obtienen datos de salidas más altos en este escenario que en los otros 3 escenarios. Lo cual se convierte en algo a considerar debido a que dichas aguas se usan para riego de cultivos experimentales, entre mayor sean estas salidas se corre mayor riesgo a no cumplir con los parámetros establecidos, aunque se conoce que estos pueden fluctuar durante el tiempo.

Es de importancia reconocer que la mayoría de fluctuaciones que sobrepasaron la norma se encontraron en la época lluviosa, es decir en la época en la cual no se hace uso de las aguas.

Para la DQO el dato histórico más alto de la salida de la laguna No. 4 ha sido de 270 mg/L en marzo 2005, pero bajo el escenario 1, se encontraron 2 datos sobre los 300 mg/L (Figura 34).

La salida de la laguna No. 5 (S5) representa las aguas que son descargadas al Río Yeguaré, por lo cual éstas si requieren situarse bajo la norma establecida y si es posible bajar estas concentraciones para mejorar el entorno ambiental. Tomando en cuenta los resultados antes mencionados, este escenario presentó los peores datos, ya que todos los datos se encontraron bajo la norma establecida (Figura 35), pero comparando estos datos de DQO con los otros escenarios montados, constituyeron los más altos, variando en puntos decimales en el caso de una comparación con el escenario 4 S5.

Debido a las situaciones planteadas anteriormente, este escenario presenta las peores condiciones del sistema, hay que destacar que es un escenario de DQO y esta es la materia orgánica más compleja de degradar.

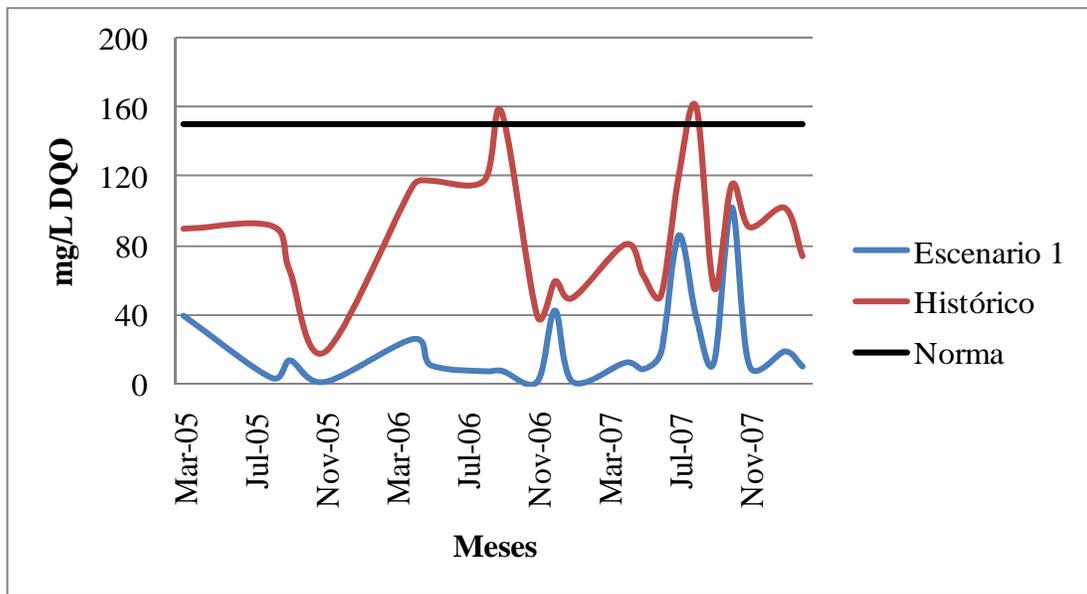


Figura 35. Escenario 1 (15 días) Salida 5 (S5).

4.13.2 Escenario 2 (30 días) S2, S4 y S5

El escenario 2 de la salida de la laguna No. 2 (S2) presentó mejores datos en cuanto a remoción de DQO, en este caso se obtuvieron los picos históricos de 1,553.0 mg/L en enero 2007 y 1,272.3 mg/L en noviembre 2006, mientras que los picos de S2 bajo el sistema fueron de 958.4 mg/L en abril 2006 y 930.4 mg/L en diciembre 2006 (Cuadro 30).

Cuadro 30. Escenario 2 (30 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).

Escenario 2 S2			Escenario 2 S4				Escenario 2 S5			
DQO	30	DH	DQO	30	DH		DQO	30	DH	
	S2	S2		S4	S4	Norma		S5	S5	Norma
Mar-05	275.6	435.6	Mar-05	170.8	270.0	150	Mar-05	35.3	90.0	150
Ago-05	124.6	664.0	Ago-05	22.9	122.1	150	Ago-05	3.2	91.6	150
Sep-05	568.8	611.8	Sep-05	113.8	122.4	150	Sep-05	12.3	65.9	150
Nov-05	65.8	332.9	Nov-05	20.5	103.5	150	Nov-05	1.2	18.8	150
Abr-06	958.5	714.2	Abr-06	144.3	107.5	150	Abr-06	23.3	115.2	150
May-06	847.0	1029.3	May-06	84.7	102.9	150	May-06	9.7	117.6	150
Ago-06	376.5	1176.5	Ago-06	65.9	205.9	150	Ago-06	6.6	117.7	150
Sep-06	188.3	1004.9	Sep-06	44.1	235.3	150	Sep-06	6.9	156.9	150
Nov-06	238.6	1272.3	Nov-06	37.3	198.8	150	Nov-06	1.2	39.8	150
Dic-06	930.4	497.0	Dic-06	316.4	169.0	150	Dic-06	37.9	59.6	150
Ene-07	532.8	1553.0	Ene-07	37.7	110.0	150	Ene-07	1.2	50.0	150
Abr-07	294.0	720.6	Abr-07	99.2	243.2	150	Abr-07	11.2	81.0	150
May-07	302.7	684.6	May-07	83.7	189.2	150	May-07	7.7	63.0	150
Jun-07	652.8	617.6	Jun-07	194.3	183.8	150	Jun-07	16.2	51.5	150
Jul-07	552.0	360.0	Jul-07	230.0	150.0	150	Jul-07	76.7	120.0	150
Ago-07	744.0	790.0	Ago-07	169.5	180.0	150	Ago-07	34.3	160.0	150
Sep-07	305.9	476.2	Sep-07	96.9	150.8	150	Sep-07	11.3	55.6	150
Oct-07	648.6	387.3	Oct-07	305.9	182.7	150	Oct-07	91.1	115.4	150
Nov-07	694.2	942.1	Nov-07	97.4	132.2	150	Nov-07	9.4	90.9	150
Ene-08	705.7	850.6	Ene-08	141.0	170.0	150	Ene-08	16.9	102.0	150
Feb-08	250.1	610.7	Feb-08	75.1	183.3	150	Feb-08	9.1	74.1	150

En la salida de la laguna No. 2 (S2), 16 salidas se encontraron bajo los datos históricos (Figura 36).

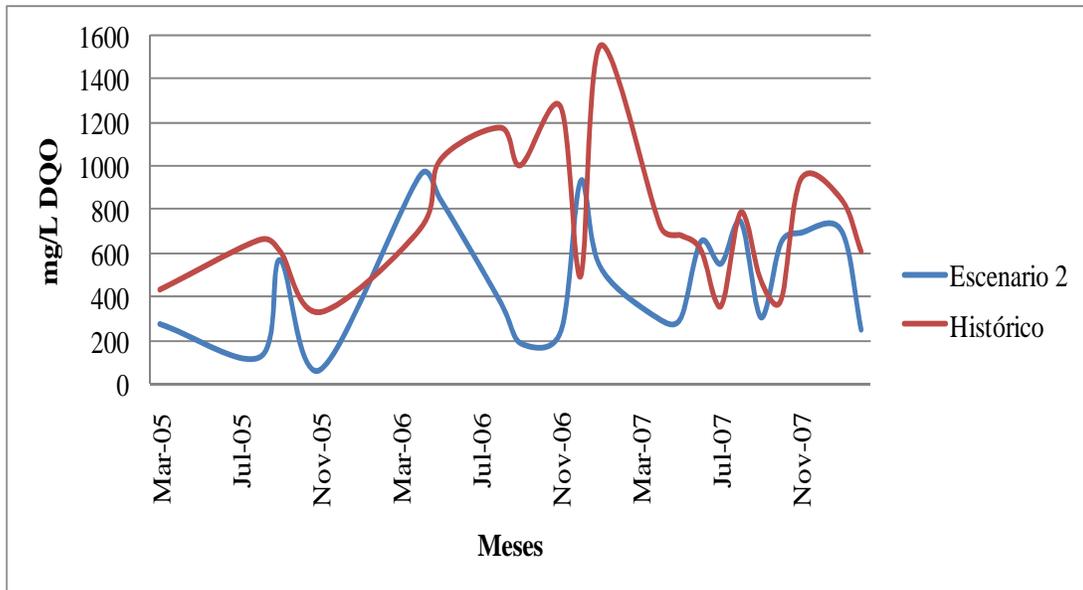


Figura 36. Escenario 2 (30 días) Salida 2 (S2).

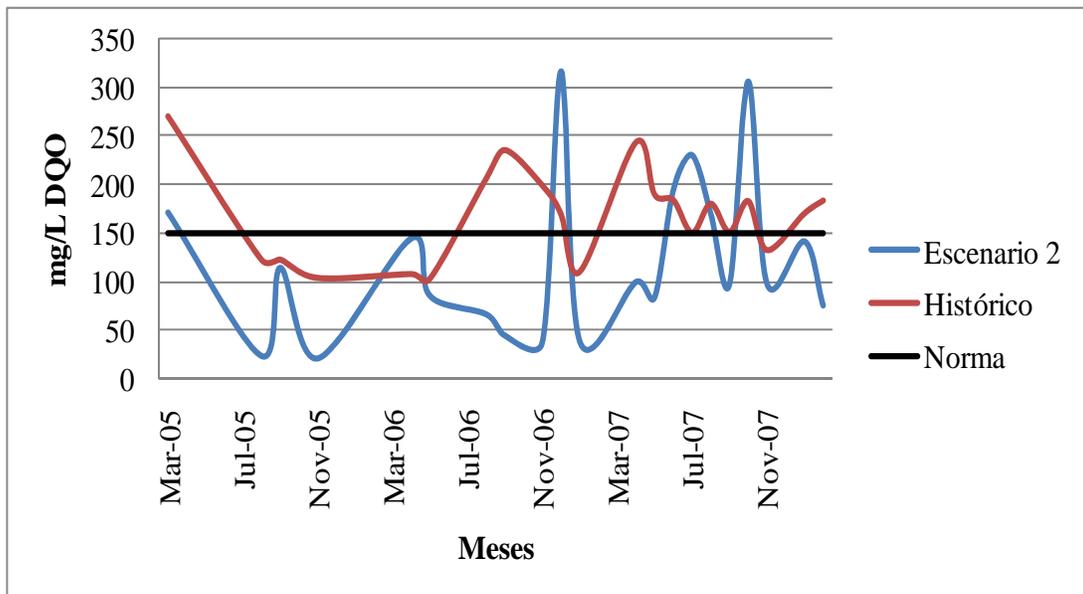


Figura 37. Escenario 2 (30 días) Salida 4 (S4).

En la salida de la laguna No. 4 (S4) se presentaron bajo el escenario 2, 16 salidas por debajo de los datos históricos, en muchos casos se observaron diferencias significativas entre ambos (Cuadro 30). Al analizar los datos históricos, se observó que 13 salidas están por arriba de la norma y bajo el escenario establecido este número se vio reducido a 6 salidas, con un pico de 316.4 mg/L de DQO y 305.9 mg/L (Figura 37). Estos se encontraron por arriba de los picos históricos.

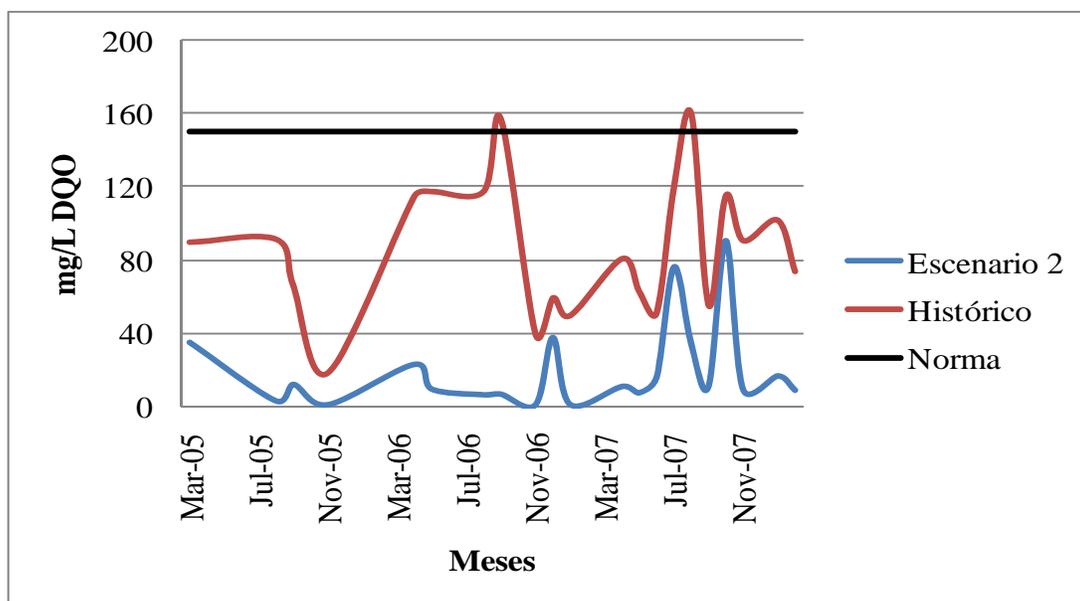


Figura 38. Escenario 2 (30 días) Salida 5 (S5).

En cuanto a la salida de la laguna No. 5 (S5), esta históricamente ha presentado dos salidas arriba de la norma de 150 mg/L de DQO. Bajo el escenario 2, todos los datos se encontraron bajo la norma establecida, lo cual nos señaló una mejora en el funcionamiento del sistema con más días de reposo del agua residual.

4.13.3 Escenario 3 (40 días) S2, S4 y S5

Cuadro 31. Escenario 3 (40 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).

Escenario 3 S2			Escenario 3 S4				Escenario 3 S5			
DQO	40	DH	DQO	40	DH		DQO	40	DH	
	S2	S2		S4	S4	Norma		S5	S5	Norma
Mar-05	258.4	435.6	Mar-05	160.2	270.0	150	Mar-05	33.1	90.0	150
Ago-05	116.8	664.0	Ago-05	21.5	122.1	150	Ago-05	3.0	91.6	150
Sep-05	533.3	611.8	Sep-05	106.7	122.4	150	Sep-05	11.5	65.9	150
Nov-05	61.7	332.9	Nov-05	19.2	103.5	150	Nov-05	1.1	18.8	150
Abr-06	898.6	714.2	Abr-06	135.2	107.5	150	Abr-06	21.8	115.2	150
May-06	794.0	1029.3	May-06	79.4	102.9	150	May-06	9.1	117.6	150
Ago-06	352.9	1176.5	Ago-06	61.8	205.9	150	Ago-06	6.2	117.7	150
Sep-06	176.5	1004.9	Sep-06	41.3	235.3	150	Sep-06	6.5	156.9	150
Nov-06	223.7	1272.3	Nov-06	34.9	198.8	150	Nov-06	1.1	39.8	150
Dic-06	872.2	497.0	Dic-06	296.6	169.0	150	Dic-06	35.6	59.6	150
Ene-07	499.5	1553.0	Ene-07	35.4	110.0	150	Ene-07	1.1	50.0	150
Abr-07	275.6	720.6	Abr-07	93.0	243.2	150	Abr-07	10.5	81.0	150
May-07	283.8	684.6	May-07	78.4	189.2	150	May-07	7.2	63.0	150
Jun-07	612.0	617.6	Jun-07	182.1	183.8	150	Jun-07	15.2	51.5	150
Jul-07	517.5	360.0	Jul-07	215.6	150.0	150	Jul-07	71.9	120.0	150
Ago-07	697.5	790.0	Ago-07	158.9	180.0	150	Ago-07	32.2	160.0	150
Sep-07	286.8	476.2	Sep-07	90.8	150.8	150	Sep-07	10.6	55.6	150
Oct-07	608.0	387.3	Oct-07	286.8	182.7	150	Oct-07	85.4	115.4	150
Nov-07	650.8	942.1	Nov-07	91.3	132.2	150	Nov-07	8.8	90.9	150
Ene-08	661.6	850.6	Ene-08	132.2	170.0	150	Ene-08	15.9	102.0	150
Feb-08	234.5	610.7	Feb-08	70.4	183.3	150	Feb-08	8.5	74.1	150

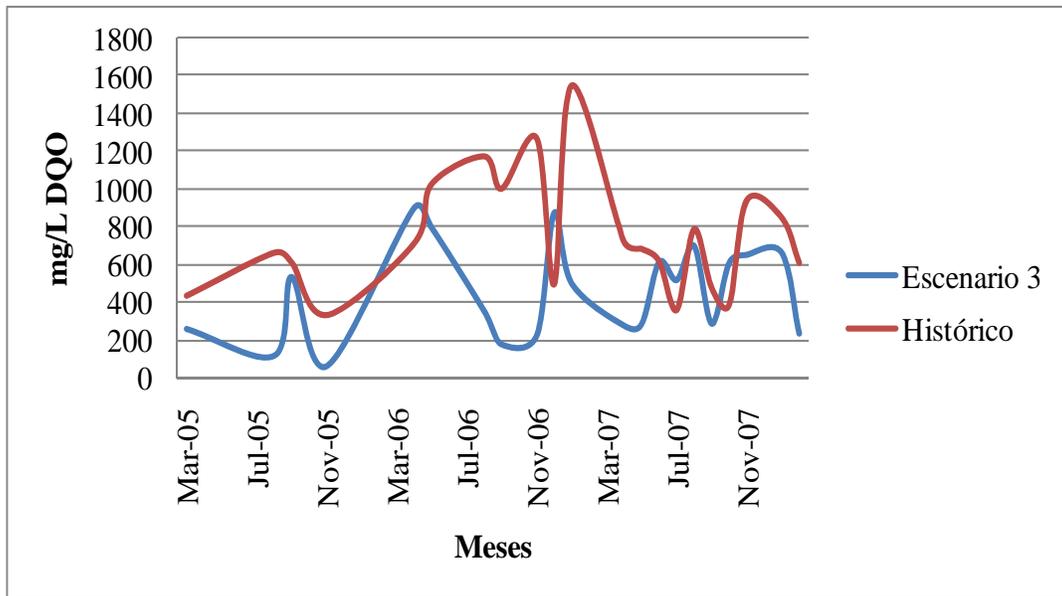


Figura 39. Escenario 3(40 días) Salida 2 (S2).

En este escenario se logró observar mejoras en cuanto a la eficiencia del sistema en su totalidad, en cuanto a la salida de la laguna No. 2 (S2): se observó una mejora en cuanto a los otros escenarios, con 17 salidas bajo los datos históricos (Cuadro 31). Obteniendo datos máximos que no sobrepasaron los 900 mg/L.

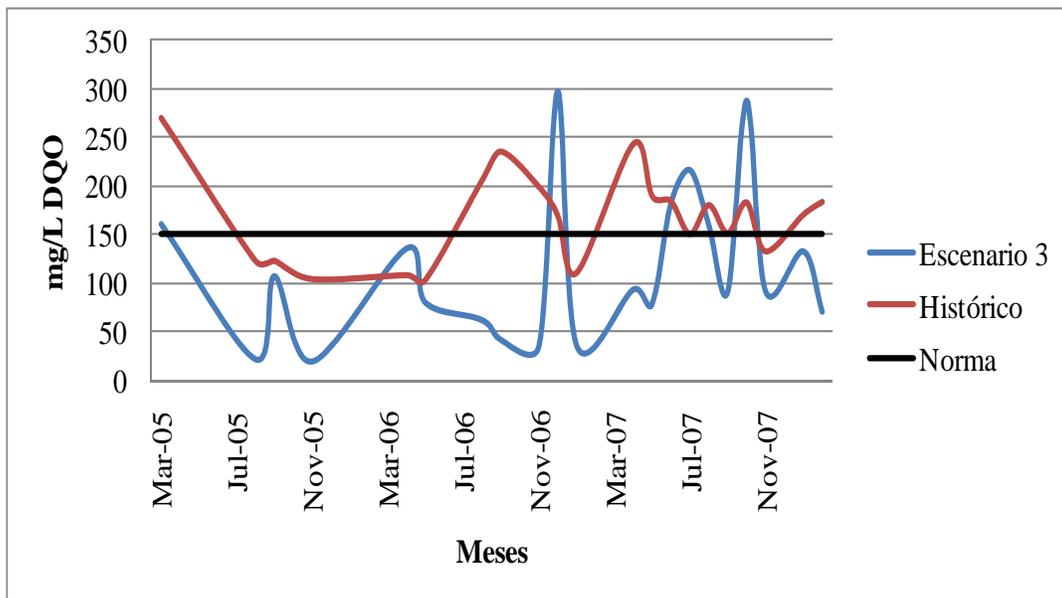


Figura 40 Escenario 3 (40 días) Salida 4 (S4).

La salida de la laguna No. 4 (S4) presentó el escenario de DQO con salidas más bajas. 17 salidas se encontraron más bajas que las salidas de los datos históricos y 6 salidas aún se encontraron sobre la norma de 150 mg/L, contrarrestando a 13 salidas históricas que

sobrepasan la norma (Cuadro 31). A pesar de los datos, estas salidas fueron las más bajas, lo cual asegura un mejor funcionamiento de la laguna No. 5.

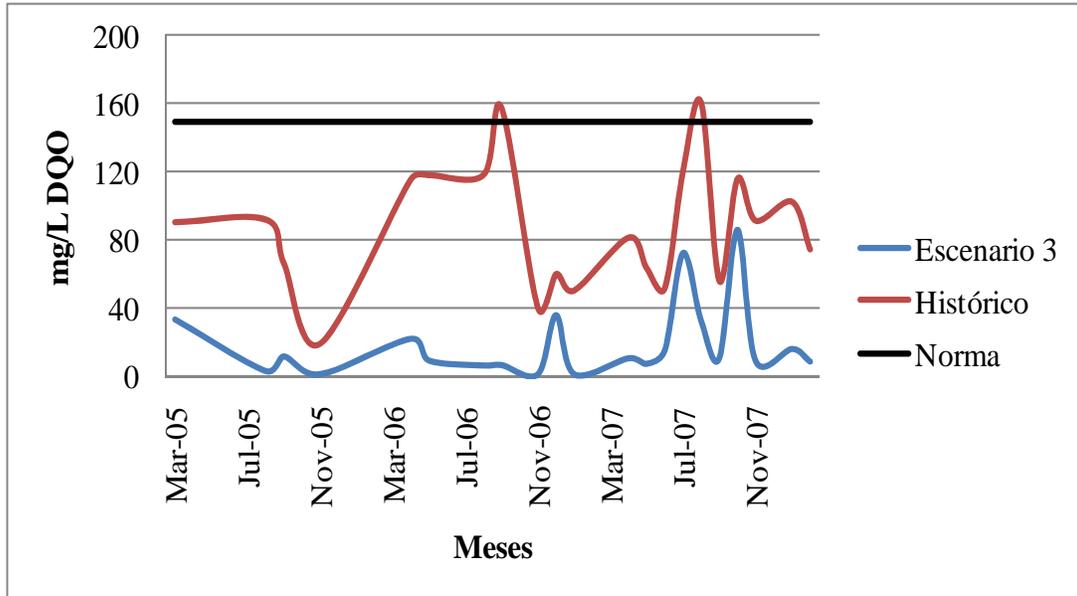


Figura 41. Escenario 3 (40 días) Salida 5 (S5).

La salida de la laguna No. 5 (S5) presentó como en escenarios anteriores, las salidas por debajo de las salidas históricas, pero éstas son las más bajas de todos los escenarios. Por contar con dicha tendencia en las salidas más bajas, dicho escenario puede considerarse como el escenario más óptimo para la remoción de DQO bajo un sistema anaerobio.

4.13.4 Escenario 4 (50 días) S2, S4 y S5

Cuadro 32. Escenario 4 (50 días), Salida 2 (S2), Salida 4 (S4), Salida 5 (S5) y Datos Históricos (DH).

Escenario 4 S2			Escenario 4 S4				Escenario 4 S5			
DQO	50	DH	DQO	50	DH		DQO	50	DH	
	S2	S2		S4	S4	Norma		S5	S5	Norma
Mar-05	304.3	435.6	Mar-05	188.6	270.0	150	Mar-05	39.0	90.0	150
Ago-05	137.5	664.0	Ago-05	25.3	122.1	150	Ago-05	3.5	91.6	150
Sep-05	628.1	611.8	Sep-05	125.7	122.4	150	Sep-05	13.5	65.9	150
Nov-05	72.7	332.9	Nov-05	22.6	103.5	150	Nov-05	1.3	18.8	150
Abr-06	1,058.3	714.2	Abr-06	159.3	107.5	150	Abr-06	25.7	115.2	150
May-06	935.2	1029.3	May-06	93.5	102.9	150	May-06	10.7	117.6	150
Ago-06	415.7	1176.5	Ago-06	72.7	205.9	150	Ago-06	7.3	117.7	150
Sep-06	207.9	1004.9	Sep-06	48.7	235.3	150	Sep-06	7.6	156.9	150
Nov-06	263.4	1272.3	Nov-06	41.2	198.8	150	Nov-06	1.3	39.8	150
Dic-06	1,027.3	497.0	Dic-06	349.3	169.0	150	Dic-06	41.9	59.6	150
Ene-07	588.3	1553.0	Ene-07	41.7	110.0	150	Ene-07	1.3	50.0	150
Abr-07	324.6	720.6	Abr-07	109.6	243.2	150	Abr-07	12.3	81.0	150
May-07	334.2	684.6	May-07	92.4	189.2	150	May-07	8.5	63.0	150
Jun-07	720.9	617.6	Jun-07	214.5	183.8	150	Jun-07	17.9	51.5	150
Jul-07	609.5	360.0	Jul-07	254.0	150.0	150	Jul-07	84.7	120.0	150
Ago-07	821.5	790.0	Ago-07	187.2	180.0	150	Ago-07	37.9	160.0	150
Sep-07	337.8	476.2	Sep-07	107.0	150.8	150	Sep-07	12.5	55.6	150
Oct-07	716.1	387.3	Oct-07	337.8	182.7	150	Oct-07	100.6	115.4	150
Nov-07	766.5	942.1	Nov-07	107.6	132.2	150	Nov-07	10.4	90.9	150
Ene-08	779.3	850.6	Ene-08	155.7	170.0	150	Ene-08	18.7	102.0	150
Feb-08	276.2	610.7	Feb-08	82.9	183.3	150	Feb-08	10.1	74.1	150

En el escenario 4, se observó claramente un retroceso en cuanto a la mejora en remoción de DQO. En la salida de la laguna No. 2 (S2) disminuyó el número de salidas bajo los datos históricos, como se presentó anteriormente en el escenario 3 había alcanzado 17 salidas y bajó a 14 salidas (Cuadro 32).

Se observaron máximos de salidas que sobrepasan los 1,000 mg/L en las salidas de la laguna No. 2 (S2) bajo el escenario 4 (Figura 42).

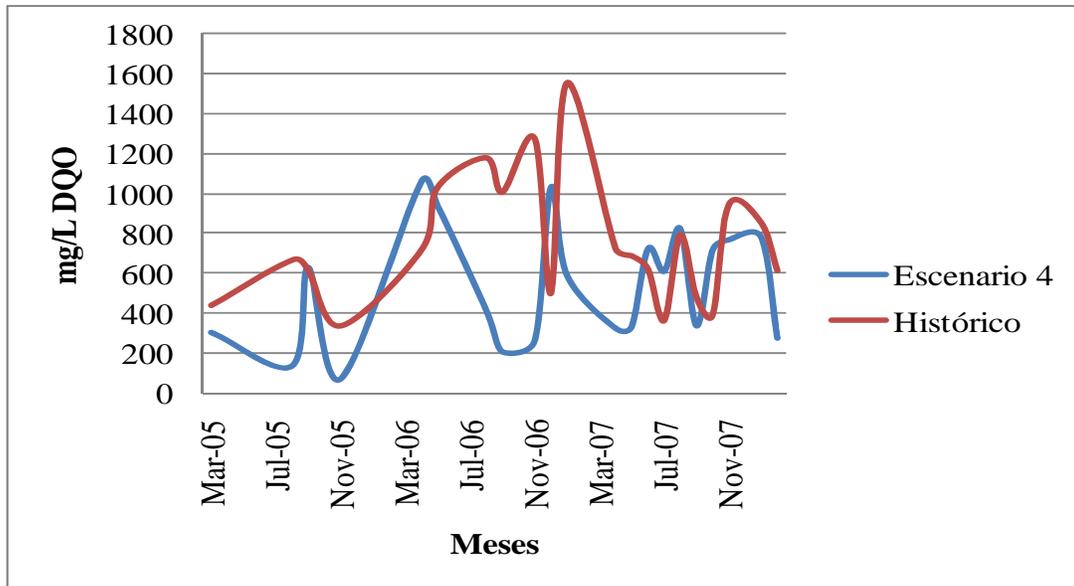


Figura 42. Escenario 4 (50 días) Salida 2 (S2).

En cuanto a la salida de la laguna No. 4 (S4), disminuyeron las salidas con datos menores que los históricos a 14 y con 8 salidas del escenario que se encuentran por arriba de la norma establecida (Figura 43). Los datos que se obtuvieron están por debajo de la norma, pero son más altos que las salidas obtenidas del escenario 3.

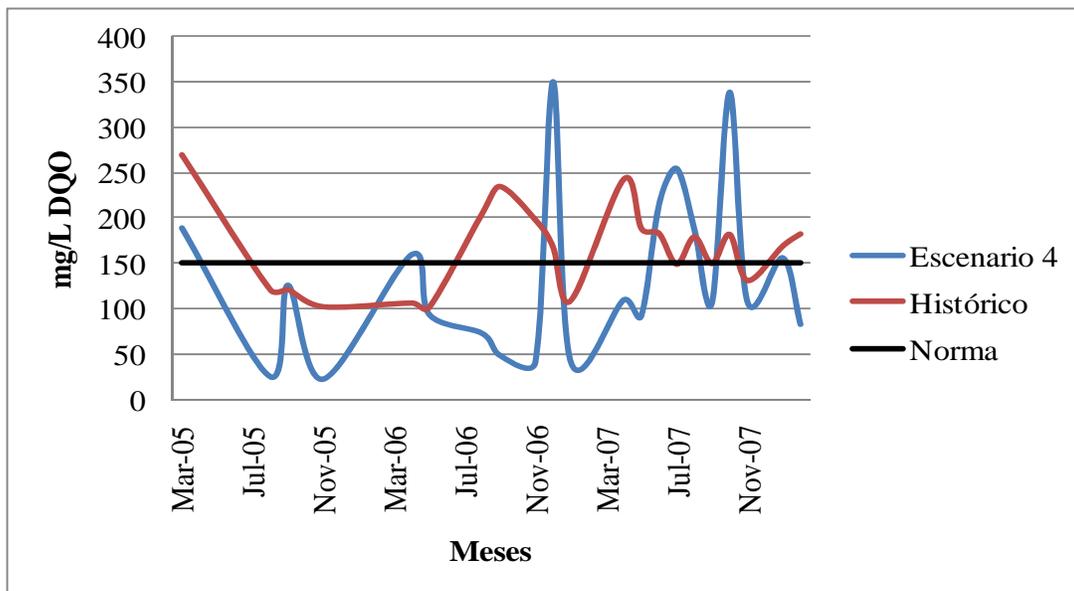


Figura 43. Escenario 4 (50 días) Salida 4 (S4).

En cuanto a la salida de la laguna No. 5 (S5) todos los datos se encuentran bajo la norma y menor a los datos históricos, pero éstos son mayores a los del escenario 3 y menores a los del escenario 1.

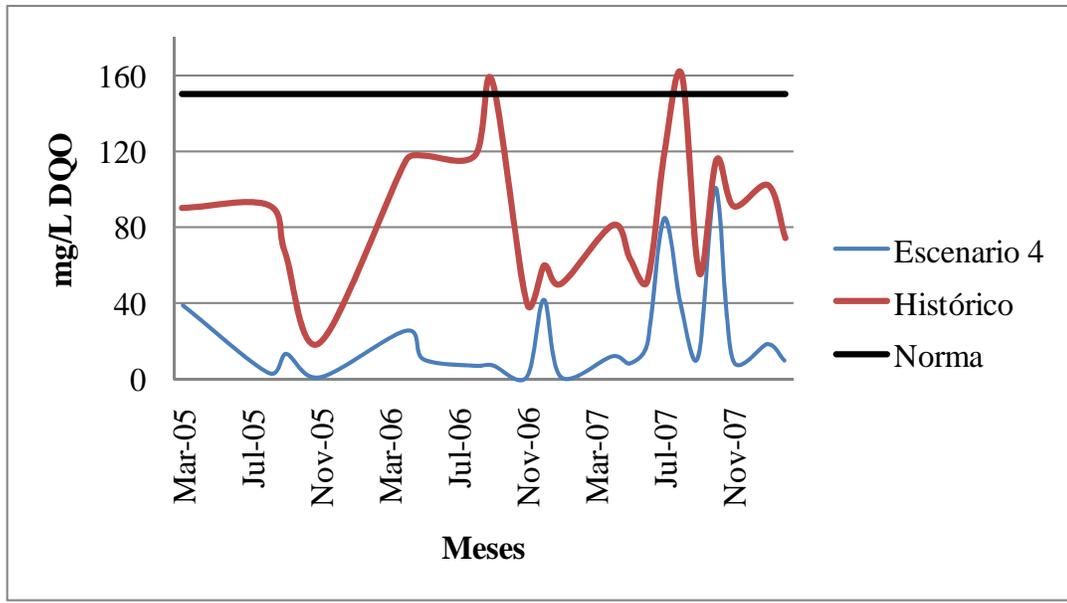


Figura 44. Escenario 4 (50 días) Salida 5 (S5).

5 CONCLUSIONES

- En el estudio comparativo de la eficiencia en remoción de materia orgánica medida bajo parámetros de DBO y DQO, y la producción de biogas bajo un sistema facultativo (sistema actual) y un sistema anaerobio (que fue simulado) el caudal promedio durante época seca fue de 486.9 m³/día y durante época lluviosa de 720.4 m³/día.
- Aplicando la metodología de la IPCC, bajo un tratamiento anaerobio se puede llegar a una producción anual de metano de 25.3 t/año bajo un parámetro de DBO, que se traduce a 387.01 Mwh-año, que equivale a 8.5% de la demanda actual de Zamorano.
- Bajo un parámetro de DQO, que sería una estimación más conservadora, la producción anual alcanzaría 11.3 t/año, que se traduce a 173.0 Mwh-año, que equivale a 3.8% de la demanda actual de Zamorano.
- El sistema anaerobio presenta una mayor producción de biogás que puede ser aprovechado y representar hasta un 8.5% de la demanda energética de la Escuela en la estimación menos conservadora.
- La mayor eficiencia de las lagunas de estabilización bajo condiciones anaerobias se presentó en el día 40, en el cual la eficiencia de remoción de materia orgánica bajo el parámetro de DBO llegó a 70% y bajo el parámetro de DQO a 55%. Bajo el escenario 3 (40 días) se presenta el mejor funcionamiento de las lagunas bajo ambos parámetros de DBO y DQO.
- Los peores escenarios fueron los siguientes: bajo el parámetro de DQO, el escenario 1 (15 días), ya que la DQO requiere de un mayor tiempo de reposo de las aguas residuales para observar una mejora en la eficiencia del sistema en cuanto a remoción de este tipo de materia orgánica. En cuanto a DBO el escenario 4 (50 días), fue el de mas baja eficiencia ya que el sistema se encontraba ya saturado por lo cual ya no era capaz de depurar las aguas vertidas.

6 RECOMENDACIONES

- Implementar medidores de agua para diferenciar los aportes de materia orgánica por cada sector de uso dentro del campus. Esto permitirá saber con exactitud el aporte de cada sector.
- Realizar una calibración como resultado de mediciones de biogás en el modelo.
- Realizar estudios en la época lluviosa y la época seca para ambas lagunas para evaluar como la generación de biogás podría variar en el tiempo.
- Iniciar proyectos de educación sobre fuentes alternas de energía como parte de la formación de los estudiantes con apoyo del Centro de Energía Renovable de Zamorano.
- Dar mayor seguimiento al registro de entradas y salidas de la carga orgánica de las distintas lagunas para contar con una buena base de datos a la hora de realizar estudios similares.
- Cuando las concentraciones de DBO o DQO en el afluente de la laguna No. 4 sobrepase los valores máximos permisibles de la Normativa Vigente se debe garantizar que se restrinja su uso.
- Dar a conocer este sistema implantado por la institución como un modelo en la región de un manejo adecuado de desechos líquidos que resulta en formas alternas de energía
- Al realizar el estudio de factibilidad para el aprovechamiento de biogás, tomar las estimaciones más conservadoras de generación.

7 BIBLIOGRAFÍA

- IPCC: Intergovernmental Panel of Climate Change. 1996.
- León, G. 1995. Aspectos generales y principios básicos de los sistemas de lagunas de estabilización. (en línea). Programa de tratamiento de aguas residuales. Cali, Colombia. Consultado el 1 de Abr de 2008. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org>
- Metcalf & Eddy. 1996. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento Vertido y Reutilización. Tomo I. 750p.
- Metcalf & Eddy. 2003. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4th ed./revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel. 1817p.
- Netto, J; Hess, M. 1970. Tratamiento de águas residuárias. Sao Paulo, Brasil. 218p.
- Peña, M. 2003. Lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales. (en línea). Universidad del Valle, Instituto Cinara. Cali, Colombia. Consultado el 1 de Abr de 2008. Disponible en: <http://www.es.irc.nl>
- Romero, J. 1999. Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización. Escuela Colombiana de Ingeniería. 3ª edición. 320p.
- Solórzano, G. 2001. Aportación de gases de efecto invernadero por el manejo de residuos sólidos en México: el caso del metano. (en línea). Consultado el 7 de abr de 2008. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx>

8 ANEXOS

Anexo 1: Análisis de laboratorio de las muestras compuestas durante época seca y lluviosa.

Datos de época seca														
Día	Hora	DBO5	DQO	Nitrógeno		Sólidos Sedimentables	Sólidos Suspendedos	Sólidos Volátiles Totales	Promedio SVT	Sólidos Volátiles		Q	SV	Sólidos Suspendedos Volátiles
				Total Kjeldahl	Sólidos Totales					Totales	Totales			
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mL/L/hr	mg/L	mg/L	mg/L	Kg/L	L/d	Kg/d	mg/L	
Lunes		798.8	1,689.4		851.1	7.0		460.0	460.0	0.00046	479,586.0	220.61		
Martes	0:00am-12:00pm	581.5	1,000.7		645.6		219.3	460.0	411.1	0.00041	554,956.3	228.14	208.00	
	13:00pm-0:00am	464.3	751.9		628.9	4.5	191.3	362.2					181.30	
Miércoles	0:00am-17:00pm	565.0	168.0		591.1	3.3	203.3	373.3	294.0	0.00029	620,044.4	182.3	191.7	
	17:00pm-0:00am	280.0	333.0		401.1		115.0	214.8					<5	
Jueves	0:00am-15:00pm	313.1	563.2		391.6		111.7	144.4	250.6	0.00025	461,434.1	115.6	112.2	
	16:00pm-0:00am	274.7	359.0		536.7		193.3	356.7					163.3	
Viernes	0:00am-16:00pm	625.5	801.6		727.8	6.5	215.0	268.9	136.5	0.00014	426,312.4	58.2	31.7	
	17:00pm-0:00am	358.2	654.8		195.6	6.5	20.0	<5					<5	
Sábado			650.6		680.0	4.5	236.7	458.3	458.3	0.00046	485,825.6	222.7	216.7	
Domingo			952.9		795.0	3.5	211.0	491.7	491.7	0.00049	380,180.1	186.9	206.7	
Datos de época lluviosa														
Lunes	06:00am-16:00pm	1,053.0	1,780.3	50.0	1,238.7	5.0	296.7	90.7	343.5	0.00034	627,784.3	215.6	280.0	
	17:00pm-22:00pm	963.0	1,344.3	63.4	986.7	12.0	385.0	596.3						
Martes	22:00pm-05:00am	11.5	44.3	31.8	300.0	1.0	56.7	60.0	1660.0	0.00166	691,802.7	1,148.4	46.7	
	6:00am-16:00pm	1,290.0	1,967.6	49.6	5,313.0		636.7	4,693.3					596.7	
Miércoles	17:00pm-23:00pm	200.0	331.3	34.3	437.7		190.0	226.7					145.0	
	0:00am-04:00am	25.0	91.4	57.5	257.7		56.7	75.6	233.9	0.00023	1158,596.8	271.0		
	05:00am-11:00am	489.0	620.1	57.1	686.7		240.0	393.3					186.7	
	12:00pm-18:00pm	213.0	443.6	18.0	853.3	6.0	695.0	288.9					235.0	
Jueves	19:00pm-0:00am	103.0	219.4	79.6	416.7	6.0	133.0	177.8					126.7	
	0:00am-14:00pm	460.0	671.6	46.6	679.8		236.7	360.0	306.7	0.00031	743,171.2	227.9	193.3	
Viernes	15:00pm-22:00pm	277.5	771.2	39.4	493.3	6.0	160.0	253.3					96.7	
	23:00pm-04:00am	71.0	107.2	29.3	286.7	1.0	123.3	148.9	291.1	0.00029	556,730.4	162.1	93.3	
	05:00am-07:00am	280.0	474.6	66.4	415.6	9.0	115.0	233.3					110.0	
Sábado	08:00am-16:00pm	735.0	1184.5	3.0	808.9	<1	250.0	515.6					233.3	
	17:00pm-0:00am		328.4	68.2	466.7	23.0	180.0	266.7					173.3	
	0:00am-04:00am		99.5	22.3	175.5		15.0	66.7	286.0	0.00029	634,824.9	181.5	15.0	
Domingo	05:00am-10:00am	804.0	1041.3	43.5	817.8		200.0	520.0					147.0	
	11:00am-23:00pm	336.0	441.4	54.1	486.7		203.3	271.2					186.7	
	0:00am-04:00am		283.6	49.4	426.7		153.3	191.2	223.7	0.00022	629,544.6	140.8	143.3	
	05:00am-18:00pm	558.0	731.5	41.2	562.2		205.0	286.7					181.7	
	19:00-0:00am		298.6	44.1	455.5		133.3	193.2					80.0	

Anexo 2: Producción de biogás considerando pérdida de metano bajo parámetro de DBO.

SVT	%CH ₄ /SV	15 SVT (-pérdidas)	30 SVT (-pérdidas)	40 SVT (-pérdidas)	50 SVT (-pérdidas)	Promedio*	Promedio**
Kg/día		Kg CH ₄ / día (-pérdidas)					
220.6	69%	141.2	143.4	139.0	130.2	139.0	96.5
228.1	51%	146.0	148.3	143.7	134.6	143.7	73.1
182.3	57%	116.7	118.5	114.9	107.6	114.9	66.0
115.6	47%	74.0	75.1	72.8	68.2	72.8	34.2
58.2	144%	37.2	37.8	36.6	34.3	36.6	52.8
222.7	0%	142.5	144.7	140.3	131.4	140.3	
186.9	0%	119.6	121.5	117.8	110.3	117.8	
						Promedio época seca	64.5
215.6	117%	138.0	140.2	135.8	127.2	135.8	159.5
1148.4	12%	735.0	746.5	723.5	677.6	723.5	87.3
271.0	35%	173.4	176.1	170.7	159.9	170.7	60.6
227.9	48%	145.9	148.1	143.6	134.5	143.6	69.1
162.1	50%	103.7	105.3	102.1	95.6	102.1	50.8
181.5	80%	116.2	118.0	114.4	107.1	114.4	91.2
140.8	100%	90.1	91.5	88.7	83.1	88.7	88.5
						Promedio época lluviosa	86.7
Promedio de Kg CH ₄ / día**							75.6
CH ₄ Kg/año**							25,331.7
Kwh - año**							387,011.9
Mwh - año**							387.0
*Pérdidas del sistema							
** Considerando pérdidas del sistema, producción neta promedio							

Anexo 3: Producción de biogás considerando pérdida de metano bajo parámetro de DQO.

		15	30	40	50	Promedio*	Promedio**
SVT	% Ch4/SV	SVT (-pérdidas)	SVT (-pérdidas)	SVT (-pérdidas)	SVT (-pérdidas)	SVT (-pérdidas)	Kg CH4 / día (-pérdidas)
		Kg/día					
220.6	46%	141.2	143.4	139.0	130.2	139.0	63.8
228.1	27%	146.0	148.3	143.7	134.6	143.7	38.3
182.3	11%	116.7	118.5	114.9	107.6	114.9	12.2
115.6	23%	74.0	75.1	72.8	68.2	72.8	16.8
58.2	67%	37.2	37.8	36.6	34.3	36.6	24.4
222.7	18%	142.5	144.7	140.3	131.4	140.3	24.9
186.9	24%	119.6	121.5	117.8	110.3	117.8	28.5
					Promedio época seca		29.9
215.6	57%	138.0	140.2	135.8	127.2	135.8	77.2
1148.4	6%	735.0	746.5	723.5	677.6	723.5	42.6
271.0	18%	173.4	176.1	170.7	159.9	170.7	31.4
227.9	29%	145.9	148.1	143.6	134.5	143.6	42.2
162.1	22%	103.7	105.3	102.1	95.6	102.1	23.0
181.5	23%	116.2	118.0	114.4	107.1	114.4	26.4
140.8	24% 28%	90.1	91.5	88.7	83.1	88.7	21.7
					Promedio época lluviosa		37.8
Promedio de Kg CH4/ día**							33.8
CH4 Kg/año**							11,326.6
Kwh - año**							173,044.9
Mwh - año**							173.0
*Pérdidas del sistema							
** Considerando pérdidas del sistema, producción neta promedio							

