ESTUDIO PRELIMINAR PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN UN REACTOR DE LODOS ACTIVADOS

NORMA CONSTANZA VALENCIA ÁNGEL

NORA XIMENA RIVERA OCAMPO

EMAS
EMPRESA METROPOLITANA DE ASEO S.A. E.S.P.

ESTUDIO PRELIMINAR PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN UN REACTOR DE LODOS ACTIVADOS

NORA XIMENA RIVERA OCAMPO
NORMA CONSTANZA VALENCIA ÁNGEL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
AGOSTO DEL 2003

TRABAJO FINAL

ESTUDIO PRELIMINAR PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS EN UN REACTOR DE LODOS ACTIVADOS

NORA XIMENA RIVERA OCAMPO Cod. 396539
NORMA CONSTANZA VALENCIA ANGEL Cod. 397060

Modalidad
PARTICIPACIÓN EN PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
Dentro del programa de investigación del grupo de ingeniería ambiental para el tratamiento de lixiviado del relleno sanitario “La Esmeralda” de Manizales

DIRECTOR:
Ingeniero Químico JORGE ELIÉCER MARÍN A.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
AGOSTO DEL 2003

DEDICATORIA

A todos aquellos
que de una u otra manera
hicieron posible este sueño,
a Dios , a mis padres
y hermanos
gracias
N.C

A mi familia,
En especial a mis padres,
y a los verdaderos
compañeros
y amigos
gracias
N.X

AGRADECIMIENTOS

A nuestros familiares quienes siempre fueron un gran apoyo en el desarrollo de este trabajo

Al grupo de investigación de ingeniería ambiental, conformado en su parte docente por los ingenieros: Adela Londoño Carvajal, Nelson De Jesús Gonzáles, Gonzalo Morante y nuestro director Jorge Eliécer Marín; por su valioso aporte en esta investigación.

A los trabajadores del laboratorio de química de la universidad Nacional de Colombia, en especial al Ingeniero Adamo Alexander Gutiérrez por su colaboración.

A los directivos de la empresa metropolitana de aseo los ingenieros Gabriel Ocampo y Maria Luisa Arbelaez, por brindarnos los elementos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

A los trabajadores de la empresa que de una u otra manera nos brindaron su ayuda en especial a: Alcides Román y Jorge Arboleda.

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN

2. INTRODUCCIÓN

3. OBJETIVOS 3
3.1 OBJETIVO GENERAL 3
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

4. MARCO TEÓRICO 4
4.1 ASPECTOS GENERALES 4
4.2 RELLENO SANITARIO " LA ESMERALDA" 5
4.3 LIXIVIADOS 7
4.4 MANEJO DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA 8
4.5 EL PROCESO DEL LODO ACTIVO 10
4.5.1 Historia 10
4.5.2 Descripción del proceso 11
4.5.3 Operación básica 12
4.5.3.1 Pretratamiento / Ajuste de Aguas Residuales 12
4.5.3.2 Remoción de DBO en un Tanque de aireación. 13
4.5.3.3 Separación sólido líquido en el Tanque de Sedimentación 13
4.5.3.4 Descarga del exceso de lodos 13

4.5.4 Microorganismo presentes en el proceso del lodo activo 14
4.5.5 Factores que afectan el proceso de depuración biológica 15
4.5.5.1 Temperatura 15
4.5.5.2 pH 15
4.5.5.3 Actuación recíproca microorganismos-materia orgánica 15
4.5.5.4 Inhibidores 16
4.5.5.5 Cantidad mínima de nutrientes 16
4.5.6 Parámetros de diseño de lodos activos 16
4.5.6.1 Factores de carga 16
4.5.6.2 Concentración de lodos activos 17
4.5.6.3 Consumo de oxígeno 17
4.5.6.4 Crecimiento bacteriano 18
4.5.7 Clasificación de los procesos de lodos activados 19
4.5.7.1 Flujo en pistón (convencional) de lodos activos 19
4.5.7.2 Aireación en pasos de lodo activo 20
4.5.7.3 Mezcla completa 20
4.5.7.4 Estabilización por contacto 21
4.5.7.5 Lodo activo con selector 22
4.5.8 Principales problemas del sistema de lodos activados 23
4.5.8.1 Hinchamiento del lodo (*bulking*) 24
4.5.8.2 Desfloculación 24
4.5.8.3 Flóculos punta de alfiler 24
4.5.8.4 Lodo ascendente 25
4.5.8.5 Formación de espuma espesa 25
4.5.9 Parámetros de control del proceso 25
4.5.9.1 Concentración de los lodos 25
4.5.9.2 Edad de los lodos 25
4.5.9.3 Carga orgánica másica 26
4.5.9.4 Carga orgánica volumétrica 27
4.5.9.5 Tiempo de retención hidráulico 27

CONTENIDO

4.5.10 Estado estable 28

4.5.11 Ventajas y desventajas del sistema de lodos activos 28

4.5.11.1 Ventajas 28

4.5.11.2 Desventajas 28

5. MATERIALES Y MÉTODOS 30

5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO 30

5.1.1 Reactor 30

5.1.2 Aireación 31

5.1.3 Compresor 31

5.1.4 Suministro de lixiviado crudo 32

5.1.5 Tanques de alimentación de lixiviado crudo 32

5.1.6 Tanque de recolección de lixiviado tratado 32

5.2 DISPOSICIÓN GENERAL DEL MONTAJE 33

6. OPERACIÓN DEL REACTOR PILOTO DE LODOS ACTIVADOS 34

6.1 INOCULACIÓN DEL REACTOR 34

6.2 ACLIMATACIÓN DEL REACTOR 34

6.3 VERIFICACIÓN DE NUTRIENTES 35

6.4 ANÁLISIS DE LABORATORIO REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS 36

6.5 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO Y DEL LICOR MEZCLA FINALIZADA LA ACLIMATACIÓN DEL REACTOR. 38

6.6 ALIMENTACIÓN DEL REACTOR 39

6.6.1 Variación de la carga orgánica 37

6.7 RECIRCULACIÓN DE LODOS 41

6.8 PURGA DE LODOS 41

6.9 CONTROL DE OXIGENO DISUELTO 42

6.10 ESTADO ESTABLE 42

6.11 CRECIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DE LODO 43

6.12 POSIBLES INHIBICIONES DEL SISTEMA 43

7. OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE RESULTADOS 45
7.1 VARIACIÓN DEL pH DURANTE EL PROCESO 45
7.2 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO 46
7.3 VARIACIÓN DEL COLOR DURANTE EL PROCESO 47
7.4 VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD DURANTE EL PROCESO 48
7.5 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES DURANTE EL PROCESO 49
7.6 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES DURANTE EL PROCESO 50
7.7 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES DURANTE EL PROCESO 51
7.8 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS DURANTE EL PROCESO 52
7.9 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS SEDIMENTABLES DURANTE EL PROCESO 53
7.10 VARIACIÓN DE LA DQO DURANTE EL PROCESO 54
7.11 VARIACIÓN DE LA DBO DURANTE EL PROCESO 55
7.12 VARIACIÓN DEL pH Y LA TEMPERATURA EN EL LICOR MEZCLA 56
7.13 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS EN EL LICOR MEZCLA DURANTE EL PROCESO 57
7.14 VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DBO_5/DQO 58

8. ESTADO ESTABLE 60
8.1 ESTADO ESTABLE 1 60
8.2 ESTADO ESTABLE 2 67

CONTENIDO

9. COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON LOS QUE SE OBTIENEN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO 72

CONCLUSIONES 75

RECOMENDACIONES 79

BIBLIOGRAFÍA 80

ANEXOS 83

ANEXO A. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS EN EL ESTUDIO DE TRATABILIDAD PARA CADA CARGA ORGÁNICA

ANEXO B. VISTAS DEL SISTEMA DE INSTALACIÓN DEL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tendencia mundial para el tratamiento y disposición final de los desechos sólidos 4

Tabla 2. Características fisicoquímicas típicas de un lixiviado generado en un relleno de residuos sólidos urbanos 8

Tabla 3. valores típicos para Carga orgánica másica y Carga volumétrica 17

Tabla 4. Seguimiento de temperatura y pH para el licor mezcla durante la aclimatación del reactor. 34

Tabla 5. Análisis de laboratorio realizados para la caracterización de las Muestras 37

Tabla 6. Caracterización del lixiviado y del licor mezcla, finalizada la aclimatación del reactor 38

Tabla 7. Parámetros para determinar carga orgánica másica. 40

Tabla 8. Carga orgánica expresada en diferentes unidades. 40

Tabla 9. Concentración mínima de algunos metales en el proceso de lodo activado comparada con las concentraciones encontradas en el lixiviado**.** 44

Tabla 10. Variación del pH durante el proceso 45

Tabla 11. Variación de la temperatura durante el proceso 46

Tabla 12. Variación del color durante el proceso 47

Tabla 13. Variación de la turbiedad durante el proceso. 48

Tabla 14. Variación de los sólidos totales durante el proceso. 49

Tabla 15. Variación de los sólidos suspendidos totales durante

el proceso. 50

Tabla 16. Variación de los sólidos suspendidos volátiles durante el proceso. 51

Tabla 17 Variación de los sólidos suspendidos fijos durante el proceso. 52

Tabla 18 Variación de los sólidos sedimentables durante el proceso. 53

Tabla 19 Variación de la DQO durante el proceso. 54

Tabla 20 Variación de la DBO durante el proceso. 55

Tabla 21 Variación del pH y la temperatura en el licor mezcla 56

Tabla 22 Variación de los sólidos en el licor mezcla 57

Tabla 23 Variación de la relación DBO_5/DQO 58

Tabla 24 Estado estable :Mayo 5/2003, 60

Tabla 25. Estado estable : Mayo 6/2003 61

Tabla 26. Estado estable. Mayo 7/2003 61

Tabla 27. Estado estable. Mayo 8/2003 62

Tabla 28. Estado estable**.** Mayo 9/2003 62

Tabla 29. Remoción de DQO 63

Tabla 30. Remoción de DBO durante el estado estable 64

Tabla 31. Remoción de color durante el estado estable 65

Tabla 32. Remoción de turbiedad durante el estado estable 66

Tabla 33. Estado estable. Mayo 12/2003 67

Tabla 34. Estado estable Mayo 13/2003 68

Tabla 35. Estado estable. Mayo 14/2003 68

Tabla 36. Estado estable. Mayo 15/2003 69

Tabla 37. Estado estable **.** Mayo 16/2003 69

Tabla 38. Remoción de DQO durante el estado estable 70

Tabla 39. Remoción de DBO_5 durante el estado estable 71

Tabla 40. Variación de los sólidos en el licor mezcla 71

Tabla 41. Caracterización planta de tratamiento de lixiviados, abril 30/2003 72

Tabla 42. Caracterización reactor de lodos activados, abril 30/2003 73

Tabla 43. Comparación de las remociones obtenidas por la planta de tratamiento de lixiviados y el reactor de lodos activados 74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso del lodo activado 11
Figura 2. Crecimiento bacteriano 18
Figura 3. diagrama del proceso Flujo en pistón (Convencional) de lodo activo 19
Figura 4. diagrama del proceso de aireación en pasos de lodo activo. 20
Figura 5. Diagrama del proceso de mezcla completa. 21
Figura 6. Diagrama del proceso de estabilización por contacto 22
Figura 7. Diagrama del proceso de lodo activo con selector 22
Figura 8. Esquema del reactor de lodos activos 30
Figura 9. Disposición general del montaje 33
Figura 10. Oxigeno disuelto en el reactor de lodos activados 41

LISTA DE GRAFICAS

Gráfico 1. Variación del pH durante el proceso 45
Gráfico 2. Variación de la temperatura durante el proceso 46
Gráfico 3. Variación del color durante el proceso 47
Gráfico 4. Variación de la turbiedad durante el proceso 48
Gráfico 5. Variación de los sólidos totales durante el proceso. 49
Gráfico 6. Variación de los sólidos suspendidos totales durante el proceso. 50
Gráfico 7. Variación de los sólidos suspendidos volátiles durante el proceso. 51
Gráfico 8. Variación de los sólidos suspendidos fijos durante el proceso. 52
Gráfico 9. Variación de los sólidos sedimentables durante el proceso. 53
Gráfico 10. Variación de la DQO durante el proceso. 54
Gráfico 11. Variación de la DBO durante el proceso. 55
Gráfico 12. Variación del pH y la temperatura en el licor mezcla 56
Gráfico 13. Variación de los sólidos en el licor mezcla 57
Gráfico 14. Variación de la relación DBO_5/DQO 59
Gráfico 15. Valores de DQO durante el estado estable. 63
Gráfico 16. Remoción de DQO durante el estado estable. 63
Gráfico 17. Valores de DBO durante el estado estable. 64
Gráfico 18. Remoción de DBO durante el estado estable. 64
Gráfico 19. Valores de color durante el estado estable. 65

Gráfico 20. Remoción de color durante el estado estable. 65
Gráfico 21. Valores de turbiedad durante el estado estable. 66
Gráfico 22. Remoción de color durante el estado estable. 66
Gráfico 23. Valores de DQO durante el estado estable. 70
Gráfico 24. Remoción de DQO durante el estado estable. 70
Gráfico 25. Variación de los sólidos en el licor mezcla 71
Grafico 26. Comparación de las remociones obtenidas por la planta de tratamiento de lixiviados y el reactor de lodos activados. 72

1.RESUMEN

El documento que aquí se presenta forma parte de una investigación acerca del tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario “La Esmeralda” en el cual se disponen los residuos sólidos de la ciudad de Manizales y de otros municipios. En esta investigación se está realizando un estudio de tratabilidad del lixiviado, empleando varios procesos fisicoquímicos y biológicos, mediante el cual se busca la mejor opción para la reducción de la carga contaminante del agua residual.

El presente trabajo se realizó a escala de banco, en un reactor de mezcla completa bajo el concepto de lodos activados, en el cual se hizo un seguimiento al comportamiento del reactor y a varios parámetros que permitieron determinar los niveles de remoción de carga orgánica, color y turbiedad, el comportamiento del lodo y los posibles problemas operacionales que podrían presentarse a escala real.

El sistema de lodos activados presento remociones en DBO_5 del 52.57% trabajando con una carga orgánica de 0.48 Kg DBO_5 / Kg SST*d (1.46 Kg DBO_5/ Kg VSS*d); además se observo una lenta sedimentación en el desarrollo del proceso.

ABSTRACT

This document is just a part of a research about leachate treatment from the sanitary landill "La Esmeralda", where urban solid wastes from Manizales (Caldas) and others municipalities are disposed

In this research several physical-chemistry and biological treatment process are being tested, in order to find the best combination for the leachate pollution reduction.

The present work presents the results of a bench-scale activated sludge reactor. Reactor performance related to color, turbidity organic matter reduction, sludge evolution and possible operational problems were investigated.

The activated sludge system showed a 52.57% removal of BOD_5 working at 0.48 Kg BOD_5/ Kg VSS*d (1.46 Kg BOD_5/ Kg VSS*d) very poor seditmentability was found sluge.

2. INTRODUCCIÓN

El control de la contaminación ocasionada por los desechos sólidos urbanos es una necesidad ambiental que requiere una evaluación por parte de las autoridades ambientales y un manejo adecuado por parte de las empresas encargadas.

Una de las acciones de mayor impacto positivo a nivel de salud pública y protección de las corrientes de agua en el departamento de Caldas fue la construcción del relleno sanitario “La Esmeralda”, en el cual se disponen las basuras urbanas de la ciudad de Manizales y de varios municipios aledaños. Sin embargo, el problema de la gestión de residuos sólidos no termina con su almacenamiento en rellenos sanitarios controlados. La transformación de la materia orgánica junto con las infiltraciones de aguas lluvias que disuelven y arrastran a su paso elementos nocivos, generan aguas residuales con alto grado de contaminación (lixiviados); principalmente por sus elevadas cargas orgánicas representadas en parámetros de DQO, DBO, SST y Nitrógeno total; además, dentro de la composición química de los lixiviados suele encontrarse concentraciones de productos tóxicos como metales pesados y compuestos organoclorados, entre otros. Por esto los lixiviados no pueden ser vertidos a un cuerpo de agua sin una previa adecuación, de forma que el resultado final sea compatible con las actuales normas ambientales.

Una de las soluciones planteadas es el envió de los lixiviados a un sistema de lodos activados, proceso en el que microorganismos realizan la transformación de compuestos orgánicos, ya que esencialmente todas las sustancias químicas

orgánicas se degradan si se establecen, mantienen y controlan las poblaciones microbianas apropiadas. Esta tecnología de tratamiento es de bajo costo frente a los métodos físico-químicos; ya que las reacciones de degradación se producen a velocidades rápidas a temperatura ambiente; por lo tanto los costos energéticos son relativamente bajos. Además, las reacciones microbiológicas en los procesos aerobios son 10 veces más rápidas que en los procesos anaerobios.

En el presente trabajo se realizó un análisis del proceso de lodos activados aplicado al tratamiento de los lixiviados generados por la disposición de las basuras en el relleno sanitario “La Esmeralda” de Manizales.

3.OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la viabilidad técnica del tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario “La Esmeralda” en un reactor de lodos activados.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un seguimiento sistemático a un reactor de lodos activados tipo banco, para el tratamiento de los lixiviados provenientes del relleno sanitario “La Esmeralda”.

2. Evaluar el comportamiento del reactor de lodos activados para el tratamiento de los lixiviados provenientes del relleno sanitario “La Esmeralda”

3. Obtener información básica para futuros estudios de tratabilidad.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. ASPECTOS GENERALES

La disposición final de los desechos sólidos en forma segura y confiable a largo plazo, es el componente más importante de la gestión integral de los residuos. Históricamente, los rellenos sanitarios han constituido el método más económico y ambientalmente más aceptable para la disposición final de los desechos sólidos en todo el mundo. En la siguiente tabla se puede apreciar la tendencia mundial en lo que respecta al tratamiento y disposición final de los desechos sólidos.

Tabla 1. Tendencia mundial para el tratamiento y disposición final de los desechos sólidos

	TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL (%)		
PAÍS / REGIÓN	RELLENOS SANITARIOS	INCINERACIÓN	COMPOSTAJE
ESTADOS UNIDOS	80	19	< 1
JAPÓN	30	68	2
ALEMANIA	70	27	3
FRANCIA	51	40	9
SUIZA	20	80	0
SUECIA	40	55	5
ESPAÑA	80	15	5
LATINOAMÉRICA	98	<1	< 1

FUENTE: diagnostico del manejo de los residuos sólidos municipales en Latinoamérica y el Caribe. OPS-OMS-CEPIS. Sep 1998

En Colombia no existe un manejo integral de residuos, el país tiene 40 millones de habitantes y produce cada día en sus centros urbanos 26.000 toneladas de desperdicios, cerca de 700 municipios de un total de 1.092, emplean basureros en cielo abierto o entierran los residuos en forma incontrolada, lo cual causa graves problemas sanitarios y ambientales. (17)

4.2. RELLENO SANITARIO " LA ESMERALDA"

En 1988 la administración de las entonces Empresas Públicas de Manizales se dio a la tarea de solucionar el problema de la disposición de las basuras de la ciudad que venían siendo dispuestas desde principios del siglo en las orillas de la quebrada Olivares. Para esto se contrato el servicio de dos firmas, Ingenieros Químicos y Civiles y la Compañía Colombiana de Consultores, entidades que efectuaron la escogencia del sitio y posterior diseño del relleno sanitario 'La Esmeralda'.

A principios de 1991 se procedió a realizar las obras de infraestructura necesarias, las cuales se terminaron en mayo del mismo año, fecha en la cual se empezó a operar el sitio de disposición final con el 50% de la basura de la ciudad de Manizales.

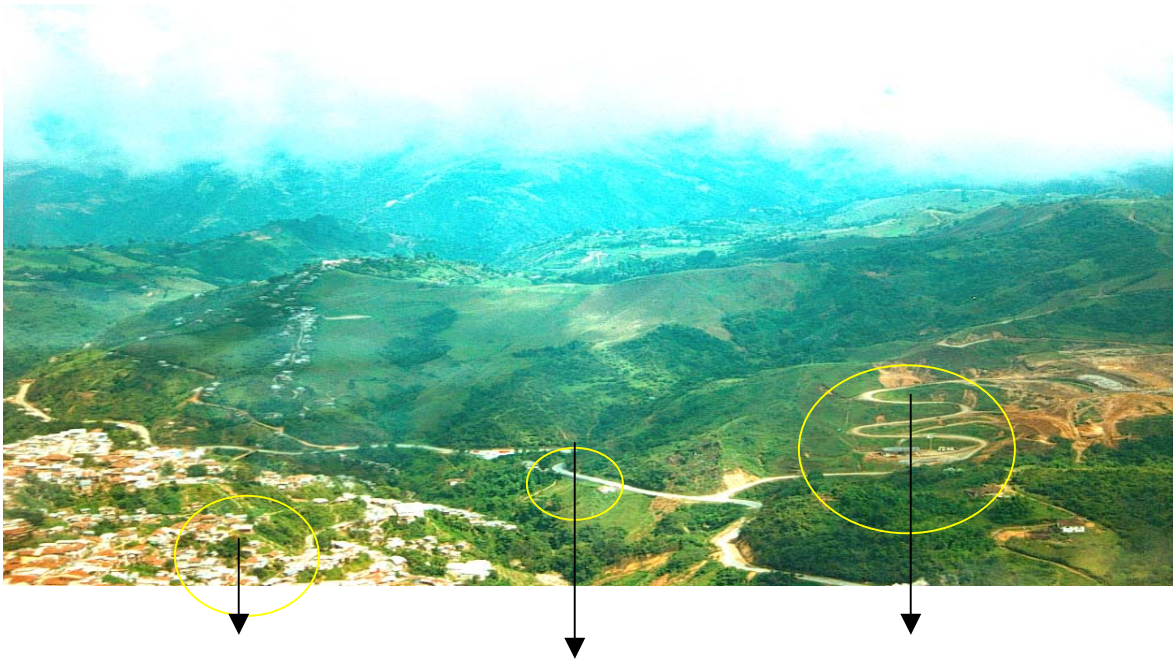
Desde 1995 la empresa Metropolitana de Aseo S.A. E.S.P –EMAS, se encargo del servicio público domiciliario de aseo en Manizales, pero solo desde 1997 se dispone el 100% de las basuras de la ciudad y de otros municipios en el relleno sanitario "La Esmeralda"

A continuación se dan algunos datos de interés acerca del relleno sanitario ' La Esmeralda' y su operación:

- LOCALIZACIÓN: al norte de la ciudad de Manizales en el Km. 2 vía al municipio de Neira.
- ÁREA: 54 hectáreas
- VIDA ÚTIL: hasta el año 2016

- HORARIO DE OPERACIÓN: 24 horas al día, los siete días de la semana.
- CANTIDAD DE DESECHOS QUE INGRESAN: aproximadamente 380 toneladas por día.
- MUNICIPIOS ATENDIDOS: Manizales, Chinchiná, Palestina, Risaralda, Belalcázar, Anserma, Marmato, Supía, Villamaría, Neira, Aranzazu, Salamina, Filadelfia, La Merced, San Félix y algo de Santa Rosa de Cabal.
- TERRAZAS: de 5 m de altura.
- COMPACTACIÓN: hasta alcanzar una densidad de campo de 1 Ton/m^3
- MANEJO DE LIXIVIADO: planta de tratamiento por proceso físico químico.
- DESTINO FUTURO: el destino final del relleno sanitario 'La Esmeralda', es un gran parque en el cual estarán sembrados 10000 árboles en su mayoría de flores y un guadual de 20000 m^2

Fotografía 1. Localización del relleno sanitario "La Esmeralda"



4.3. LIXIVIADOS

Los lixiviados son productos líquidos resultantes de la estabilización de los residuos sólidos. Puede decirse que los lixiviados son una mezcla de la infiltración directa de las precipitaciones con las sustancias resultantes de la descomposición anaeróbica de las basuras, como también con cualquier otro líquido que escurra como resultado de la consolidación de los residuos del relleno.

Los lixiviados de los rellenos sanitarios se encuentran catalogados como uno de los principales riesgos ambientales debido a su alta carga contaminante representada principalmente en DBO_5 y DQO.

De acuerdo con la calidad del lixiviado que se genera en el relleno sanitario La Esmeralda ($DBO_{PROMEDIO}$ =4000 y $DQO_{PROMEDIO}$ =11000), es posible establecer una relación con el agua residual domestica, ARD ($DBO_{PROMEDIO}$ =200 y $DQO_{PROMEDIO}$ =500) así:

$$DBO_{LIXIVIADO} / DBO_{ARD} = 20$$
$$DQO_{LIXIVIADO} / DQO_{ARD} = 22$$

Es de anotar que la literatura no tiene reportes precisos sobre tratamientos aplicables a lixiviados, debido fundamentalmente a la variación de las características del lixiviado con el tiempo y con el tipo de residuo que se deposita en el relleno. Sin embargo con muchas investigaciones se ha obtenido una caracterización fisicoquímica típica de un lixiviado según la edad del relleno sanitario la cual se muestra a continuación.

Tabla 2. Características fisicoquímicas típicas de un lixiviado generado en un relleno de residuos sólidos urbanos.

EDAD DEL RELLENO	**NUEVO < 2años**	**NUEVO < 2 años**	**> 10 años**
PARÁMETRO	RANGO	VALOR TÍPICO	RANGO TÍPICO
DQO (mg O_2/L)	3,000-60,000	18,000	100-500
DBO_5 (mg O_2/L)	2,000-30,000	10,000	100-200
SST (mg/L)	200-2,000	500	100-400
Nitrógeno total (mg N/L)	20-1,500	400	100-200
Fósforo total mg/Lde P)	5-100	30	5-10
Alcalinidad (mg$CaCO_3$/L)	1,000-10,000	3,000	200-1,000
Hierro (mg Fe/L)	50-1.200	60	20-200
Plomo (mg Pb/L)	1-10	2	0.01-0.5
Zinc (mg Zn/L)	25-250	50	0.1-1.0
pH (unidades)	5-8	6	6.6-7.5

FUENTE: GLYNN & HEINKE, " Environmental science and engineering".

4.4. MANEJO DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA

Para los rellenos sanitarios de un núcleo urbano un aspecto de vital importancia corresponde al manejo de los lixiviados. Desde que el relleno sanitario 'La Esmeralda' Comenzó su funcionamiento se han buscado diferentes alternativas para el manejo apropiado de los lixiviados que se generan continuamente.

Inicialmente el liquido se llevaba por canales a la quebrada Olivares sin ningún tratamiento previo, pero basados en las necesidades ambientales se buscó una alternativa que disminuyera el impacto ambiental; Para ello se hizo una canalización en filtros perimetrales que recogían el lixiviado y lo llevaban a 3 tanques de donde era recirculado al relleno con la ayuda de una motobomba. En este método se mitiga el impacto por medio de atenuación natural y evapotranspiración potencial. En el año de 1998 se contaba con 2 estaciones de recirculación de lixiviado.

Sin embargo, ante la necesidad de modernizar y tecnificar el tratamiento del lixiviado se pensó en el diseño y construcción de una planta que contara con un tratamiento físico químico de coagulación- floculación- sedimentación; ésta fue construida a mediados del mes de junio del 2000 y en el mes de septiembre se puso en funcionamiento y se suspendió completamente el proceso de recirculación de lixiviado (5).La planta en su diseño inicial constaba de un resalto para mezcla, un tanque floculador de tres compartimentos y un tanque sedimentador; pero a partir de una evaluación realizada se detectaron deficiencias en el sedimentador, ya que presentaba un tiempo de residencia muy corto para las condiciones del floc, y problemas de carácter hidráulico. En vista de lo anterior, y gracias a los ensayos realizados, se efectuó el diseño de un nuevo sedimentador construido durante el mes de junio del 2001.Los lixiviados entran a la planta por una canal que tiene un vertedero triangular, y en ese mismo canal se realiza la mezcla rápida de coagulante en un resalto hidráulico. Los lodos producidos son bombeados a los lechos de secado ubicados en la parte superior de la planta.

Actualmente los lixiviados siguen siendo tratados en esta planta, pero paralelamente se realizan estudios para implementar tratamientos biológicos que permitan aumentar la remoción de la carga orgánica que contienen los lixiviados.(4)

4.5. EL PROCESO DEL LODO ACTIVO

4.5.1. Historia

El sistema de tratamiento de las aguas residuales mediante lodos activados, nació en 1882 con los primeros ensayos de aireación de efluentes (1), pero no fue realmente conocido hasta 1914, 32 años después, por medio de un articulo publicado en el Journal of Chemical Industry de Inglaterra, por E. Ardern y W. T. Lockett. Ellos observaron que la aireación de las aguas residuales conducía a la formación de flóculos de partículas en suspensión; descubrieron, que el tiempo para eliminar contaminantes orgánicos se reducía de días a horas cuando estos flóculos de partículas se hacían permanecer en el sistema. Se refirieron a las partículas en suspensión, más específicamente al lodo que resultaba de la recogida de las partículas del tanque de sedimentación, como “activo” y así nació el proceso de lodo activo. Hacia 1917 la Manchester Corporatión puso en funcionamiento una planta continua para 946 m^3/d y el mismo año Houston, Texas, completó la construcción de una planta de 38,000 m^3/d. Enseguida muchas otras plantas fueron construidas en Inglaterra y los Estados Unidos (Sawyer, 1965).(1)

Es interesante tener en cuenta que la aplicación satisfactoria del proceso ocurrió incluso aunque faltaba la comprensión de cómo funcionaba el proceso realmente. Al comienzo la literatura contenía muchos artículos que incluían debates sobre si la eliminación que se obtenía era física o biológica. Hacia 1930 la evidencia a favor del proceso biológico fue suficientemente convincente. Sin embargo, no se disponía todavía de una teoría adecuada sobre los factores que afectaban las tasas de eliminación. Los tamaños de los tanques de aireación se escogían con base a la experiencia de otros sitios y usando parámetros de regla empírica, tales como el tiempo de detención del liquido o carga equivalente de población por

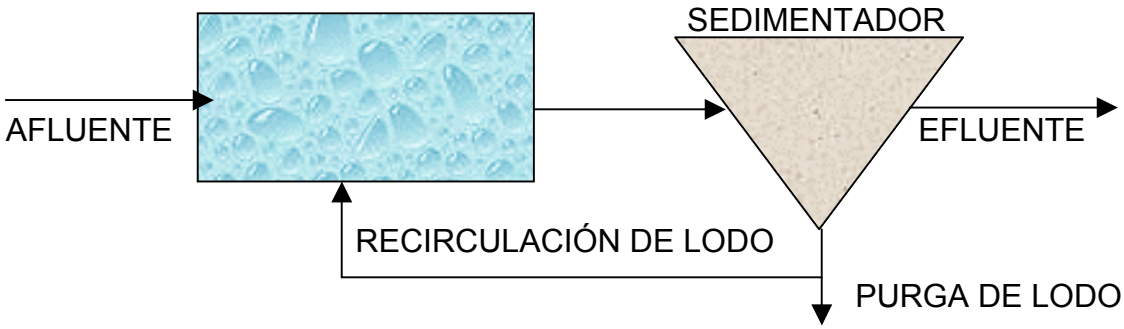
unidad de volumen del reactor. Estas estrategias empíricas dieron resultado generalmente en tratamiento de aguas residuales municipales, lo bastante parecidas en todas partes en características de flujo y de concentración de materia orgánica. Sin embargo, a menudo surgían problemas al tratar aguas residuales con características particulares. Evolucionaron diversas modificaciones del proceso, generalmente a base de tanteos. Finalmente en las décadas de 1950 y 1960 se desarrolló una teoría de funcionamiento suficiente como para que se consiguieran diseños racionales basados en las características de las aguas residuales a tratar (8).

4.5.2 Descripción del proceso

El proceso de lodos activados recibió este nombre porque involucra la producción de una masa activa de microorganismos capaces de estabilizar de manera aerobia un desecho. Hoy en día se utilizan muchas versiones del proceso original, pero en lo fundamental todas ellas son similares. Las configuraciones más comunes son: el flujo de pistón y los procesos de mezcla completa.

El proceso del lodo activo consiste en un reactor llamado Tanque de aireación, un tanque de sedimentación, reciclado de sólidos al tanque de aireación procedente del tanque de sedimentación y una línea de purga del lodo, como se muestra en el siguiente diagrama:

Figura 1. Proceso del lodo activado



El tanque de aireación es un reactor de crecimiento en suspensión, que contiene conjuntos microbianos o flóculos de microorganismos denominados lodo activo; allí se mezclan los organismos y las aguas residuales con gran cantidad de aire. Bajo estas condiciones los organismos oxidan una parte del desecho orgánico a dióxido de carbono y agua, para obtener energía y sintetizan la otra parte en forma de células microbianas nuevas utilizando la energía obtenida de la oxidación. Luego la mezcla entra en el tanque de sedimentación, donde los microorganismos floculantes se asientan y son removidos de la corriente efluente. Los microorganismos sedimentados, o el lodo activado, se recirculan hacía el inicio del tanque de aireación para mezclarlos de nuevo con el agua residual. En este proceso se producen en forma continua lodos activados nuevos, de cuyo exceso es necesario deshacerse (lodos activados de desecho).

El efluente proveniente de una planta de lodos activados adecuadamente diseñada y operada es de alta calidad; en general con concentraciones de DBO_5 y SST iguales o menores a 10 mg/L cuando se tratan aguas residuales domesticas (1).

4.5.3 Operación básica

4.5.3.1 Pretratamiento / Ajuste de Aguas Residuales

En algunos casos las aguas residuales deben ser acondicionadas antes del tratamiento biológico, para evitar la inhibición o problemas operacionales. Por ejemplo:

- Sustancias dañinas a la activación microbiana.
- Gran cantidad de sólidos
- Aguas residuales con valores anormales de pH

4.5.3.2 Remoción de DBO en un Tanque de aireación.

Las aguas residuales crudas mezcladas con el lodo activado retornado del tanque de sedimentador final es aireado hasta obtener 2 mg/L de oxígeno disuelto como mínimo; en este proceso una parte de materia orgánica contenida en el efluente es mineralizada y gasificada y la otra parte es utilizada para formación de nuevas bacterias.

4.5.3.3. Separación sólido líquido en el Tanque de Sedimentación

Los lodos activados deben ser separados del licor mezclado provenientes del tanque de aireación, este proceso se realiza en el tanque de sedimentación, concentrándolos por gravedad. El objetivo de este proceso es:

- Conseguir un efluente clarificado con un mínimo de sólidos suspendidos
- Asegurar el lodo de retorno.

4.5.3.4 Descarga del exceso de lodos

Con la finalidad de mantener la concentración de los lodos activados en el licor mezclado una parte de los lodos son eliminados del sistema y llevados a lechos de secado para posteriormente disponer el lodo seco como residuo sólido. (5)

Un aspecto relacionado con la separación de lodos es el concerniente a los flóculos biológicos de los lodos activados. Estos están compuestos de bacterias heterotróficas y autotróficas y son el elemento principal para la purificación, tienen dos importantes características en el proceso:

- Eficiente remoción de materia orgánica.
- Eficiente separación de sólidos.

4.5.4 Microorganismos presentes en el proceso del lodo activo

Los flóculos de lodo activado contienen partículas orgánicas, inorgánicas y principalmente bacterias. Las células vivas del flóculo representan entre el 5 y el 20% del total de bacterias. Los microorganismos presentes en los flóculos son bacterias, hongos, protozoos y rotíferos.

Bacterias: constituyen el principal componente. Los géneros principales son *Zooglea, Pseudomonas, Flavobacterium, Alcaligenes, Bacillus, Achromobacter, Corynebacterium* y *Acinetobacter*; también hay formas filamentosas como *Beggiatoa*. Estas bacterias oxidan la materia orgánica y producen polisacáridos y otros polímeros extracelulares que facilitan la floculación. Los microorganismos aerobios representan una fracción importante cuyo número varía inversamente al tamaño del floculo puesto que la difusión de oxigeno al interior se va viendo dificultada. En los flóculos de gran tamaño el interior es anaerobio y permite el crecimiento de anaerobios estrictos (tales como metanógenos) que han sobrevivido a fases de mayor aerobiosis en pequeñas bolsas anaerobias internas en flóculos de menor tamaño.

Entre las bacterias encontradas en el sistema de lodos activos el grupo numéricamente más importante es el de *Pseudomas*, también hay bacterias autótrofas tales como las nitrificantes *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* e incluso algunas bacterias fotosintéticas.

Hongos: Normalmente no están presentes. Sólo en condiciones ambientales muy especiales (bajo pH, deficiencia de nitrógeno, presencia de productos tóxicos) pueden aparecer ciertos hongos de los géneros *Penicillium* y *Cephalosporium*, entre otros.

Protozoos: Están presentes como depredadores de las bacterias. Pertenecen a los tres grupos (ciliados, flagelados y rizópodos). La actividad de los protozoos contribuye significativamente a la reducción de la DBO.

Rotíferos: Son organismos que se unen al flóculo y desarrollan dos importantes funciones en él: **(a)** eliminan las bacterias libres que no se han agregado al floculo, y **(b)** contribuyen a la formación del flóculo mediante la producción de materia fecal rodeada de capas de mucus.(15)

4.5.5 Factores que afectan el proceso de depuración biológica

.

4.5.5.1 Temperatura

El efecto de la temperatura sobre la actividad enzimática es doble. Como en muchas reacciones químicas, la velocidad de reacción se incrementa con la elevación de la temperatura, pero por otra parte, la elevación de temperatura hace a las enzimas menos estables. Es decir, la depuración biológica se desarrolla de forma adecuada entre los límites de temperatura 12°C y 38°C (zona mesofílica).

4.5.5.2 pH

Las enzimas son activas en un rango determinado de pH que normalmente no puede ser muy alejado de pH =7.

4.5.5.3 Actuación recíproca microorganismos- materia orgánica

Es necesario poner en contacto los microorganismos y la materia orgánica, buscando una homogenización adecuada; puesto que el microorganismo es un elemento pequeño, en condiciones óptimas las moléculas orgánicas deberían tener las dimensiones adecuadas para poder pasar a través de la membrana de células y bacterias.

En el sistema de lodos activados la materia orgánica se mantiene dentro de la masa del agua en suspensión y homogenizada por inyección de aire.

4.5.5.4 Inhibidores

Las enzimas son activas en estado coloidal, pudiendo inhibir su actividad las materias presentes en las aguas en forma de sales insolubles, iones de metales pesados, reactivos alcaloides, el cloro y sus compuestos. Esta acción de los inhibidores puede actuar sobre los microorganismos destruyéndolos o dejándolos en estado latente.

4.5.5.5 Cantidad mínima de nutrientes

El proceso tendrá lugar siempre que el alimento sea suficiente para los microorganismos que actúan en el proceso como bacterias, protozoos, etc.

La condición adecuada para que un agua residual pueda depurarse, es que la cantidad de nutrientes sea suficiente, pudiéndose estimar su contenido por las relaciones (3):

$$\frac{DBO_5(ppm)}{N_{TOTAL}(ppm)} = \frac{100}{5} \quad [1] \qquad \frac{DBO_5(ppm)}{P_{TOTAL}(ppm)} = \frac{100}{1} \quad [2]$$

4.5.6 Parámetros de diseño de lodos activados

4.5.6.1 Factores de carga

- Carga orgánica másica

  Es la relación de kilogramos de DBO_5 introducidos por día en un reactor de activación, a kg de lodo contenidos en dicho reactor biológico.

$$Cm = \frac{kg.de.DBO_5 \ / \ dia}{kg.de.lodo} \quad [3]$$

Este parámetro representa la relación existente entre la cantidad de alimento y el contenido de microorganismos.

- Carga volumétrica

  Indica los Kg de DBO_5 introducidos por día y por m^3 de reactor de activación, es decir son los kg de DBO_5 por día que pueden ser tratados dependiendo del volumen del reactor.

Los valores típicos para Carga orgánica másica y carga volumétrica se dan a continuación. (1)

Tabla 3. valores típicos para carga orgánica másica y carga volumétrica

MODIFICACIÓN DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS	CARGA ORGÁNICA MÁSICA (Kg DBO_5/ Kg SST *d)	CARGA VOLUMÉTRICA (Kg DBO_5/ m^3 *d)
Aireación intensiva	0.05-0.2	0.3
Convencional	0.2-0.5	0.6
Aireación en disminución	0.2-0.5	0.6
Aireación en pasos	0.2-0.5	0.8
Estabilización por contacto	0.2-0.5	1.0
Aireación modificada	0.5-3.5	1.5-6
Aireación de alta carga	0.2-0.5	1.5-3

4.5.6.2 Concentración de lodos activados

Viene dado en g de lodos / m^3 de tanque, es decir la cantidad de sólidos existentes en el reactor por unidad de volumen. Su significado corresponde a la cantidad de sólidos en suspensión del liquido mezcla (agua bruta + lodo + aire).

4.5.6.3 Consumo de oxígeno

Para las reacciones químicas de la materia orgánica y la respiración de los microorganismos en el proceso biológico se precisa la introducción de oxigeno, dependiendo de:

a) La DBO_5 del agua que se introduce

b) La cantidad de sólidos que hay en el tanque. Es decir al aire necesario para mantener activos los lodos.

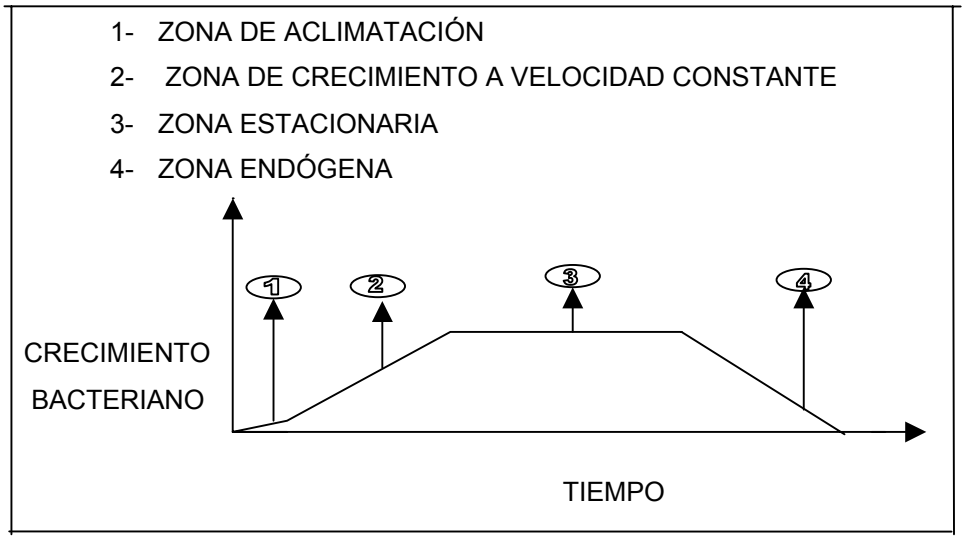
4.5.6.4 Crecimiento bacteriano

El grado de reproducción depende de la concentración del sustrato, de los nutrientes y de la temperatura.

La curva de crecimiento de las bacterias comprende 4 zonas:

1. De retardo durante la cual los microorganismos se aclimatan al nuevo medio de vida. Es lento.
2. De crecimiento constante. La célula se divide a velocidad constante. Hay alimento en exceso y el crecimiento depende del sustrato.
3. Estacionaria. Crecimiento nulo como consecuencia de la constancia de alimento.
4. De decrecimiento. Al terminarse el alimento y comenzar la escasez aparece la denominada fase endógena, donde los microorganismos consumen primero sus propias reservas de protoplasma, y posteriormente unos sirven de alimento a otros. Estas etapas quedan reflejadas en la siguiente figura, donde se incorpora una cantidad constante de alimentos y se observa la evolución de los microorganismos en función del tiempo.(3)

Figura 2. Crecimiento bacteriano



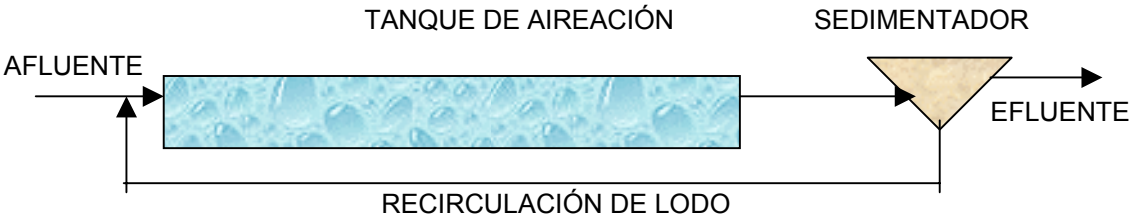
4.5.7 Clasificación de los procesos de lodos activados

Muchas modificaciones del proceso base del lodo activo han evolucionado desde que fue descubierto. Estas modificaciones proceden en gran medida de la larga historia de esfuerzos de tanteo para solucionar problemas según surgían en el funcionamiento del lodo activo. Las modificaciones que se utilizan en la actualidad representan los resultados que se han conservado de las muchas alternativas que fueron probadas durante años; cada una ofrece alguna ventaja particular para determinadas circunstancias.(1)

4.5.7.1 Flujo en pistón (Convencional) de lodo activo

El concepto original o convencional del sistema de lodo activo supone tanques de aireación estrechos en los que el agua residual entra por uno de los extremos y sale por el opuesto. Con ello se da un considerable carácter de flujo en pistón. Intuitivamente, el flujo en pistón parece ser la mejor aproximación y de acuerdo con la teoría cinética debería conseguir la mayor eliminación de contaminantes dentro del tiempo de tratamiento definido. Además, los contaminantes en la corriente afluente no atraviesan el sistema sin estar sometidos a la acción biológica. Sin embargo el sistema de flujo en pistón tiene sus propias limitaciones, algunas de las cuales conducen a otras configuraciones.

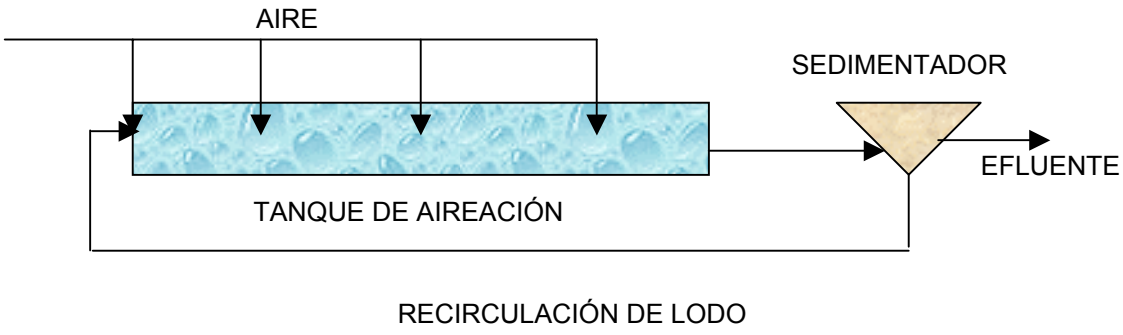
Figura 3. Diagrama del proceso Flujo en pistón (Convencional) de lodo activo



4.5.7.2 Aireación en pasos de lodo activo.

La aireación en pasos también conocida como alimentación en pasos, fue desarrollada como medio para evitar alguno de los problemas de la aproximación de flujo en pistón en vista de los problemas que se derivan de concentraciones elevadas de contaminantes en el extremo final del tanque de aireación; se evitan concentraciones altas en cualquier punto distribuyendo el afluente en pasos a lo largo del reactor. La ventaja se observa en los cambios en la concentración de contaminantes y demanda de oxigeno a lo largo del reactor. Mientras los parámetros varían a lo largo del tanque de aireación, los cambios son bastante amortiguados comparados con el sistema de flujo en pistón.

Figura 4. Diagrama del proceso de aireación en pasos de lodo activo.



4.5.7.3 Mezcla completa

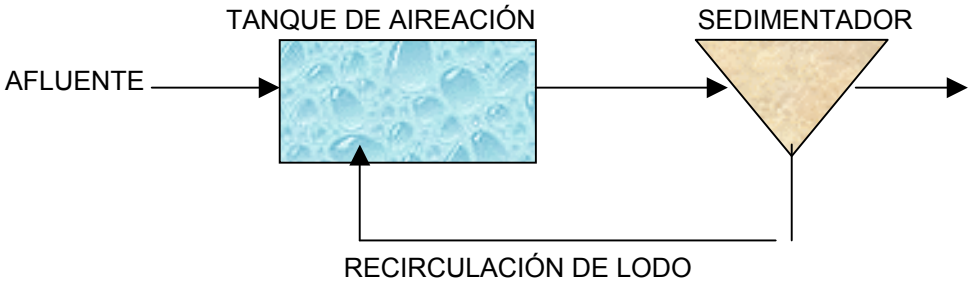
El proceso de tratamiento de lodo activo de mezcla completa o CSTR, con reciclado y sedimentado, evolucionó en la década de 1950. Dos factores espolearon el uso de diseños de mezcla completa. Primero, las aguas residuales industriales se trataban más, aunque con una notable falta de éxito, utilizando el sistema de flujo en pistón convencional. Esta dificultad se debía a la elevada concentración de contaminantes en el extremo final del sistema de flujo en pistón. Un sistema de mezcla completa es la aproximación más reciente para distribuir uniformemente el agua residual por todo el sistema de

tratamiento. Segundo, la década de 1950 marco el comienzo de modelo de reactores para procesos biológicos.

En el sistema de mezcla completa la concentración de contaminantes y la demanda de oxigeno no varían a lo largo del reactor. La concentración de contaminantes solubles en el efluente es uniforme y baja en todo el reactor.

Un sistema de mezcla completa resulta más favorable para aguas residuales que contienen sustancias biodegradables que son tóxicas para microorganismos en concentraciones modestas. La desventaja de este sistema es que la eficiencia de eliminación de un compuesto orgánico particular no es tan alta como un sistema de flujo en pistón que funcione bien, donde las concentraciones altas no son problema.

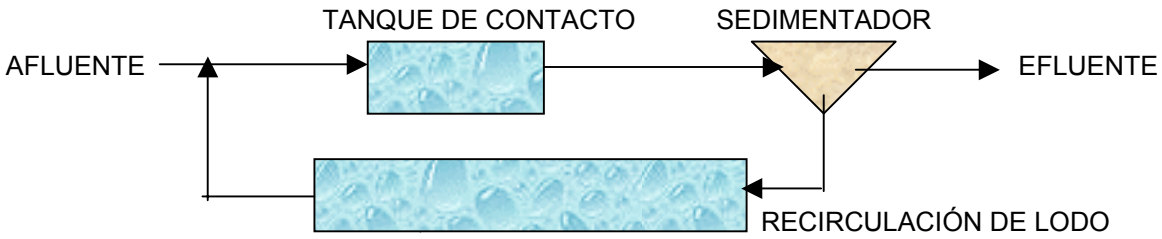
Figura 5. Diagrama del proceso de mezcla completa.



4.5.7.4 Estabilización por contacto

En este sistema el agua residual y el lodo activado son mezclados brevemente (20-30 minutos), tiempo necesario para que los microorganismos adsorban los contaminantes orgánicos en solución, pero no el necesario para que ellos asimilen la materia orgánica. El licor mezclado es sedimentado y derivado a otro tanque de aireación por un periodo de 2 a 3 horas para luego ser mezclado con el afluente ingresando al primer tanque de aireación.

Figura 6. Diagrama del proceso de estabilización por contacto

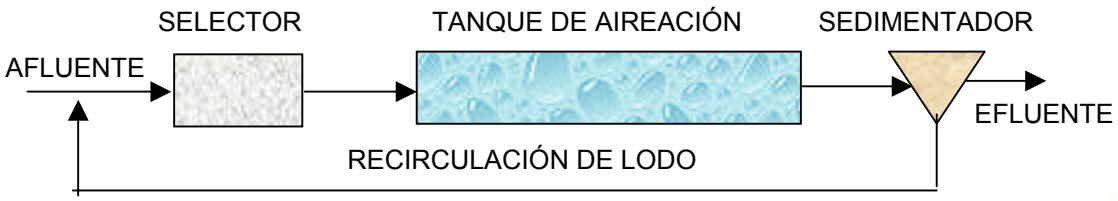


4.5.7.5 Lodo activo con selector

El caso más frecuente de fallo en los sistemas de lodo activo es el hinchamiento (*bulking*) del lodo, o lodo que no compacta bien en el tanque de sedimentación. Una de las innovaciones recientes es añadir un tanque selector antes del reactor aerobio. El lodo activo de retorno entra en contacto con la corriente residual solo 10 a 30 minutos en condiciones en las que es imposible la oxidación completa de la DBO. Las reacciones de fermentación convierten entonces los hidratos de carbono y, quizás, materia proteínica en ácidos grasos, que no pueden ser oxidados, sino que son almacenados por algunos microorganismos en forma de glicógeno o ácido polibetahidroxibutirico (PHB).

El almacenamiento de materia proporciona una ventaja ecológica a las bacterias cuando acceden al entorno del tanque normal de aireación. Afortunadamente las bacterias capaces de almacenar estas materias lo son también de formar flóculos compactos de lodo. De esta manera la función del selector es la de cambiar o escoger la ecología del sistema del lodo activo hacia organismos con buenas características de sedimentación.

Figura 7. Diagrama del proceso de lodo activo con selector



4.5.8 Principales problemas del sistema de lodos activados

En general la mala sedimentabilidad es el principal problema que se presenta en un sistema de lodos activos; si los sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM) del reactor no sedimentan rápidamente en el clarificador, el lodo sale con el efluente tratado, aumentando los niveles de DBO en éste.

Se han establecido patrones para determinar las características de decantación de los lodos:

- Índice de Mohlmann (I.M)

  Es el volumen en mililitros ocupado por un gramo de materia sólida en suspensión, después de decantar durante media hora en una probeta de un litro.

  Este parámetro intenta dar la concentración real de los sólidos que hay dentro del reactor indicando la eficacia de la floculación en el reactor biológico.

- Índice Volumétrico de Lodos (IVL)

  Este índice viene representado por el volumen en mililitros ocupado por el lodo después de dejar sedimentar en una probeta graduada de un litro, el Licor Mezcla durante 30 minutos.

$$IVL = \frac{Volumen.(en.ml)se\,\mathrm{dim}\,entado.en.30.\mathrm{min}}{SSVLM.(en.g)} \qquad [4]$$

El valor del IVL debe estar comprendido entre 35 y 150, para valores fuera de este rango se considera que el lodo posee malas características de asentamiento (2).

Los problemas de sedimentabilidad de los lodos se pueden presentar por alguna de las siguientes razones:

4.5.8.1 Hinchamiento (*bulking*) del lodo

Consiste en la formación de flóculos ligeros y con malas características de asentamiento, es causado por organismos filamentosos como: las bacterias Sphaerotilus y Streptothrix, el hongo Geotrichum, el Schizothirix y protozoarios ciliados. Estos flóculos son arrastrados con el efluente tratado, lo que hace que este tenga un alto contenido de materia orgánica. Las causas son:

- Las condiciones ácidas, ya que favorecen el crecimiento fungiforme antes que el bacteriano.
- La sobrecarga del sistema.
- El desbalance de nutrientes.
- Temperatura por encima de los 30°C.
- Descenso en la concentración de oxigeno disuelto, por debajo de 1 mg/L.
- Cargas orgánicas muy bajas, menores de 0.2 Kg de DBO /(d) Kg de SSVLM.

4.5.8.2 Desfloculación

El sobrenadante en el sedimentador es turbio, por lo que se pierden microorganismos en el efluente tratado; se hace difícil mantener la concentración del licor mezcla en el reactor. Causas por las que se presenta:

- Bajos niveles de oxigeno disuelto.
- Bajo pH.
- Entrada de cargas tóxicas.

4.5.8.3 Flóculos punta de alfiler

Son flóculos pequeños que no sedimentan fácilmente y que permanecen en el efluente tratado; se presentan cuando la edad de los lodos es mayor de 6 días. Se dan en sistemas con cargas bajas, menores de 0.2 Kg de DBO /(d) Kg de SSVLM.

4.5.8.1 Lodo ascendente

Las condiciones anóxicas que se presentan en el sedimentador después de que el lodo sedimentado ha consumido el oxigeno disuelto, pueden hacer que algunos microorganismos anaerobios produzcan desnitrificación obteniendo nitrógeno gaseoso y óxido nitroso; los que suben a la superficie arrastrando los flóculos.

4.5.8.2 Formación de espuma espesa

Se puede presentar cuando se tienen organismos filamentosos, ya que crecen formando una red que atrapa las burbujas de aire dentro de la masa orgánica, la que asciende produciendo una espuma dura y espesa; esta condición se puede acrecentar con la agitación intensa.(2)

4.5.9 Parámetros del control del proceso

4.5.9.1 Concentración de los lodos

Se puede expresar como la concentración de Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor Mezclado (SSVLM); esto indica la cantidad de materia orgánica presente, pero no establece distinción entre el lodo bioquímicamente inerte y el activo.(3)

4.5.9.2 Edad de los lodos (θc)

Llamado también tiempo de residencia de lodos (TRL), es la cantidad total de sólidos en los lodos del sistema dividida por la tasa de pérdida de sólidos en los lodos del sistema.(2)

$$\theta c = TRL = \frac{V * Xa}{Qw * We} \qquad [5]$$

V = volumen del reactor (L)

Xa = Sólidos suspendidos volátiles en el reactor (mg/L)

Qw = Caudal purgado .(L/d)

We = concentración de biomasa purgada (mg/L)

Θc = Edad de los lodos (d)

Con la edad de los lodos se puede controlar la actividad de los lodos; así, por ejemplo, una θc baja produce una alta tasa de crecimiento de los lodos, o sea una alta actividad.

Para mantener constantes el nivel de SSVLM y la edad de los lodos en el sistema es preciso eliminar cierta cantidad de lodo activado, esto se logra purgando cierta cantidad de licor mezclado directamente del reactor o de la tubería efluente de dicho tanque. El caudal que debe ser desechado (Qw) se calcula con la siguiente expresión:

$$Qw = \frac{V}{\theta c} \qquad [6]$$

Qw = Caudal de purga (L/d)

V = Volumen del reactor (L)

Θc = Edad de los lodos (d)

4.5.9.3 Carga orgánica másica

Denominado también como relación alimento / microorganismos (A/M) y es la tasa con la que los nutrientes orgánicos entran al sistema, expresada como DBO por unidad de masa de los lodos en la etapa de aireación.(2)

$$CM = \frac{A}{M} = \frac{So * Qo}{V * Xa} = \frac{So}{th * Xa} \qquad [7]$$

A = Alimento

M = Microorganismos

So = Sustrato en el afluente(mg/L)

Qo = Caudal afluente (L/d)

V = volumen del reactor (L)

Xa =Sólidos suspendidos volátiles en el reactor (mg/L)

th = Tiempo de residencia hidráulico (d)

El valor de la carga orgánica másica que proporciona mejores características de sedimentación del lodo debe estar comprendido entre: 0.3 y 0.6. Una relación alimento microorganismos menor a 0.3 indica que la cantidad de alimento presente en el sistema es insuficiente para mantener el crecimiento de microorganismos; y una relación alimento microorganismos superior a 0.6 puede inducir el crecimiento de organismos filamentosos, con la producción de hinchamiento del lodo y de mala sedimentabilidad.

4.5.9.4 Carga orgánica volumétrica

Es la carga orgánica aplicada diariamente por unidad de volumen del reactor, según la siguiente relación:

$$COV = \frac{So * Qo}{V} \qquad [8]$$

So = Sustrato en el afluente (mg/L)

Qo = Caudal afluente (L/d)

V = Volumen del reactor (L)

En el proceso de lodos activados es recomendable que el valor de la carga orgánica volumétrica este comprendido entre 0.5 y 1.5 (Kg DBO5/ m^3 *d). (2)

4.5.9.5 Tiempo de retención hidráulico (th)

Es el tiempo teórico que permanece el agua afluente dentro del sistema de Lodos activados. Se calcula dividiendo el volumen del reactor por la cantidad de agua que diariamente es aplicada al sistema.(2)

$$th = \frac{V}{Qo} \qquad [9]$$

Qo = Caudal afluente (L/d)

V = Volumen del reactor (L)

4.5.10 Estado estable

En lodos activados estado estable es el lapso de tiempo en el cual el reactor tiene estabilidad de condiciones de salida para la misma condición de entrada; se pueden adoptar diferente criterios para su determinación; así, la velocidad de utilización de oxígeno (VUO) en el Licor Mezcla no varia y/o el sustrato (DBO_5 , DQO, COT) efluente se hace estable (variación máxima +/- 10%).(6)

4.5.11 Ventajas y desventajas del sistema de lodos activos

4.5.11.1 Ventajas

- Alta remoción de carga orgánica.
- Efluentes de buenas características organolépticas.
- Procesos estables, cuando los lodos son manejados apropiadamente.
- Estas plantas se caracterizan por el poco espacio que requiere su instalación.
- Se consigue una mineralización de la materia orgánica.
- Se consigue una oxidación de las sustancias químicas, tal como la nitrificación
- Pueden reducirse compuestos orgánicos peligrosos.
- Versatilidad, ya que sus parámetros pueden ser controlados
- La masa microbiana se controla purgando.

4.5.11.2 Desventajas

- Requiere equipo mecanizado (motor, reductor, aireadores, bombas, etc.).
- Alto consumo de energía.
- Sensibilidad del proceso a la oscilación de cargas contaminantes, de caudal y tóxicos.

- Eventual aspersión de partículas de agua y espumas.
- Sensible a bajas temperaturas.
- Produce gran cantidad de lodo.

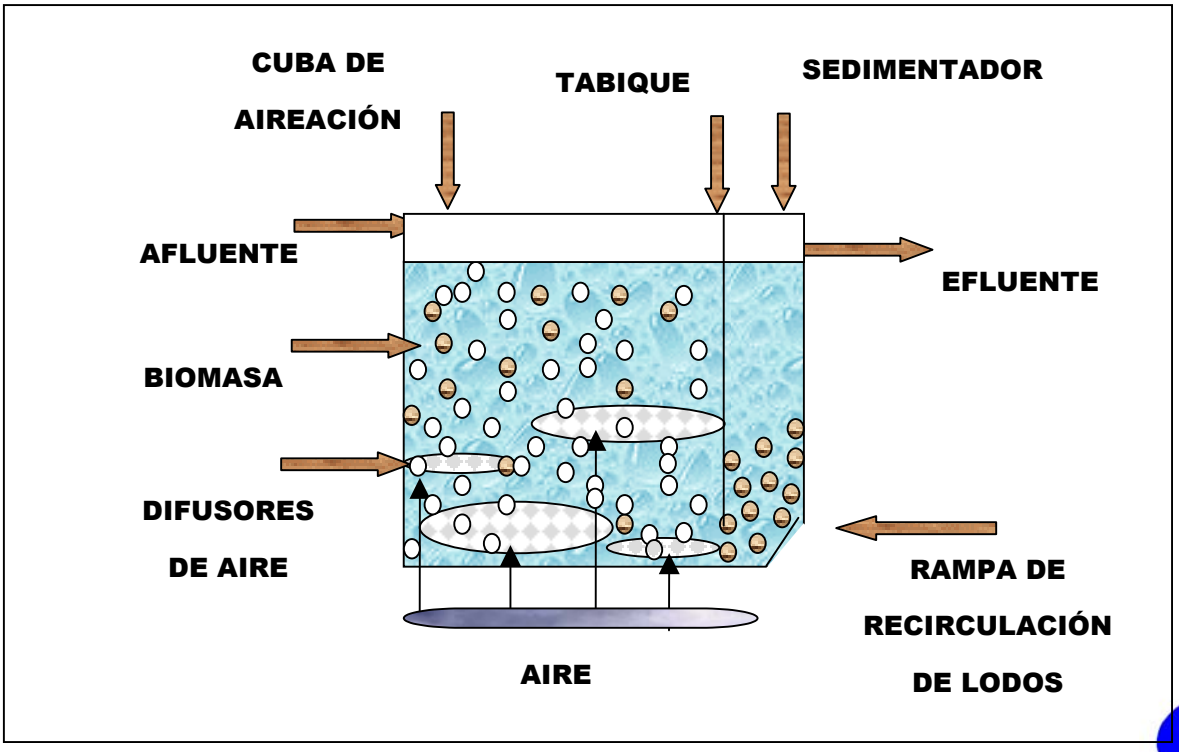
5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

5.1.1 Reactor

Para el desarrollo del proyecto se planteó la utilización de un reactor piloto de lodos activados, el cual permitiera obtener datos representativos .
En la siguiente figura se muestra una vista lateral del reactor de lodos activados utilizado en el estudio de tratabilidad.

Figura 8. Esquema del reactor de lodos activos



El reactor tiene un volumen de aireación de 200.216 litros con las siguientes dimensiones de ancho / largo / profundidad, 55.5 cm / 55.5 cm / 65.5 cm .
El área de sedimentación es de 525.27 cm^2 (55.5 cm x 9.5 cm).
El material de construcción del equipo es lámina de acrílico transparente con un calibre de 5 mm; la estructura es reforzada en todas sus aristas por un marco en acero inoxidable de 3 mm de espesor. Las líneas de alimentación, evacuación del efluente, drenaje del reactor y de conducción de aire están construidas en PVC de alta presión de ½ pulgada.

5.1.2 Aireación

El ambiente aerobio dentro del reactor se consiguió mediante el uso de 4 difusores de aire, con los cuales se esperaba obtener una buena acción de mezclado dentro del rector.
Los difusores eran de tipo poroso de membrana de plástico flexible en forma de plato; con formación de burbuja fina. Estaban colocados a 10 cm del fondo del reactor.

5.1.3 Compresor

Para el trabajo realizado se utilizó un compresor bajo las siguientes especificaciones:

Marca: IHM
Modelo: z0001 H-24
Potencia: 1.0 Hp
Desplazamiento: 4.60 cm

El compresor garantizaba un flujo de aire constante durante las 24 horas del día, el aire comprimido se controlaba por medio de un regulador de caudal dispuesto a

la salida del compresor. Este regulador tenía como objetivo disminuir la presión de salida del compresor y lograr así una corriente apropiada de afluente al reactor además una disminución en el ciclo de trabajo del equipo en donde el tiempo que permanecía apagado era mayor al tiempo de encendido; lo cual garantizaba el buen funcionamiento, minimizando la posibilidad de sobrecalentamiento y quemado del motor.

5.1.4 Suministro de lixiviado crudo

El suministro de lixiviado crudo se hizo con la ayuda de una tubería de PVC de 1 pulgada, la cual llevaba el lixiviado crudo desde el vertedero ubicado a la entrada de la planta de tratamiento hasta la caneca de alimentación; esta tubería permanecía conectada las 24 horas del día permitiendo renovar constantemente el lixiviado en la caneca de alimentación.

5.1.5 Tanque de alimentación de lixiviado crudo

Como tanque de almacenamiento de lixiviado crudo para la alimentación del reactor, se utilizó una caneca metálica de 20 galones, la cual contaba con un rebose que permitía la evacuación y constante renovación de lixiviado, además se instalo una tubería de PVC de una pulgada para la conexión con el reactor de lodos activados. Una válvula permitió graduar el caudal de lixiviado afluente.

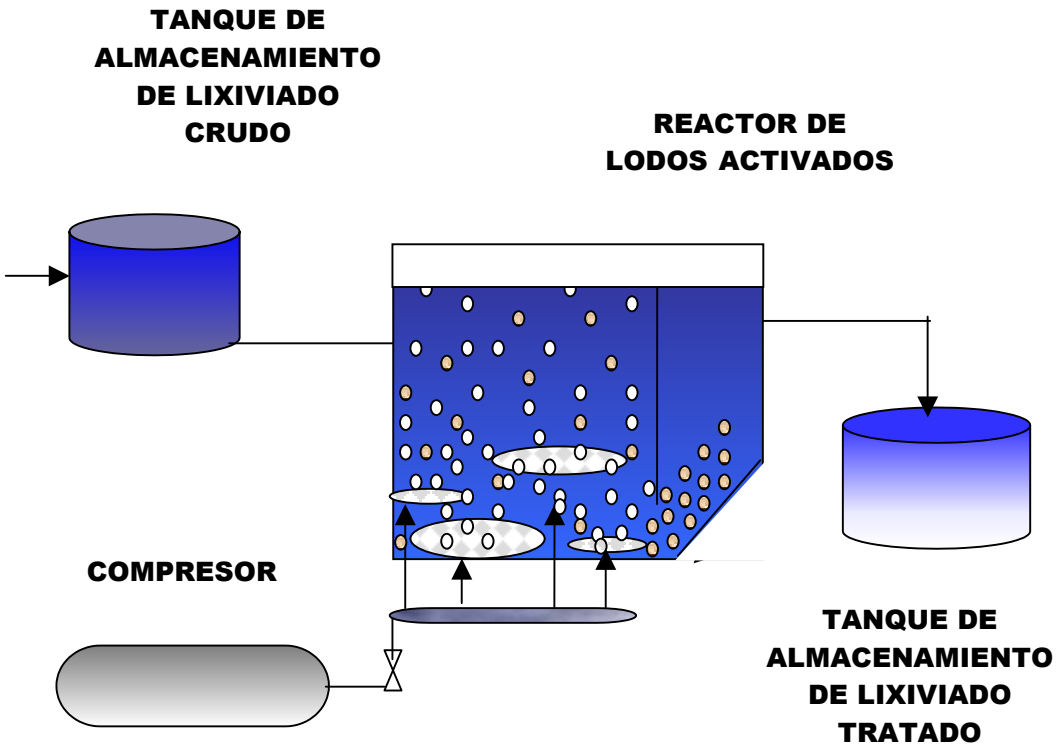
5.1.6 Tanque de recolección de lixiviado tratado

Como tanque de almacenamiento de lixiviado tratado se utilizó una caneca de 20 galones conectada por medio de una tubería de PVC de 1 pulgada al reactor.

5.2 DISPOSICIÓN GENERAL DEL MONTAJE

En la siguiente figura se muestra el esquema del montaje realizado para el desarrollo del trabajo experimental.

Figura 9. Disposición general del montaje



6 OPERACIÓN DEL REACTOR PILOTO DE LODOS ACTIVADOS

6.1 INOCULACIÓN DEL REACTOR

Para la inoculación del reactor se tomaron lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales doméstica, de aireación extendida, de la empresa MADEAL (Manufacturas de Aluminio)

De esta planta se tomaron 100 litros de licor mezcla y se unieron en solución con 50 litros de lixiviado crudo.

6.2 ACLIMATACIÓN DEL REACTOR

La aclimatación se realizó durante 8 días, en este periodo el reactor trabajó en forma discontinua (batch); con un seguimiento de temperatura y pH para el licor mezcla.

Los resultados se dan en la siguiente tabla:

Tabla 4. Seguimiento de temperatura y pH para el licor mezcla durante la aclimatación del reactor

DIA	pH (UNIDADES)	TEMPERATURA (°C)
1	6.45	25.6
3	8.34	20.4
4	8.69	17.6
7	8.72	18.1
8	8.64	19.4

6.3 VERIFICACIÓN DE NUTRIENTES

Como uno de los parámetros más importantes en los procesos biológicos se realizó la verificación de los requerimientos de nutrición de los microorganismos. El proceso debe contar con el alimento suficiente, ya que de otra forma no se logra la eficiencia deseada.

Las relaciones recomendadas de nutrientes son:

DBO_5 (p.p.m) / N total (p.p.m) = 100 / 5 [10]

DBO_5 (p.p.m) / P total (p.p.m) = 100 / 1 [11]

Para la verificación de estas relaciones se realizaron pruebas de nitrógeno y fósforo, obteniendo los siguientes resultados:

N_{TOTAL} lixiviado = 1055.46 ppm

N_{TOTAL} licor mezcla = 822.19 ppm

FÓSFORO lixiviado = 11.99 mg $P\text{-}PO_4$

FÓSFORO licor mezcla = 11.74 mg $P\text{-}PO_4$

Utilizando las relaciones reportadas para la relación DBO/Nitrógeno tenemos que el lixiviado de entrada presenta un exceso de nitrógeno así:

DBO_5 (p.p.m) / N total (p.p.m) = 100 / 5 = 20 [12]

Para DBO_5 =4000 ppm

N_{TOTAL} requerido = 200 mg/L

N_{TOTAL} lixiviado = 1055.46 ppm

Exceso de nitrógeno = 855.46 mg/L

En el caso del fósforo ocurre lo contrario: hay deficiencia de este nutriente como se muestra a continuación:

DBO_5 (p.p.m) / P total (p.p.m) = 100 / 1= 100 [13]

Para DBO_5=4000 ppm

Fósforo requerido = 40 mg/L

Fósforo lixiviado = 11.986

Fósforo faltante = 28.014 mg/L

El tanque de aireación es de 200 litros, por lo tanto se deben añadir al licor mezcla 5602.8 mg de fósforo.

Para suplir la deficiencia de Fósforo se añadieron al reactor 10 g de Fósforo como Fosfato de Potasio cada 7 días. El Fosfato de Potasio era disuelto en 500 ml de licor mezcla y después se vertía directamente en la cuba de aireación

6.4 ANÁLISIS DE LABORATORIO REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para la medición de las variables del proceso se siguió la metodología del Manual de Análisis de Aguas, el cual es una recopilación de los procedimientos de análisis basados en los métodos estandarizados de la APHA, AWWA y WPCF, que se llevan a cabo en el laboratorio de Aguas de la Universidad Nacional de Colombia , Sede Manizales. Las unidades de medición y los métodos empleados se dan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Análisis de laboratorio realizados para la caracterización de las muestras

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO
DBO (1)	mg O_2/L	Incubación
DQO (2)	mg O_2/L	Reflujo
SÓLIDOS TOTALES	mg/L	Filtración y secado a 110°C
SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES	mg/L	Calcinación a 550°C
SÓLIDOS SEDIMENTABLES	ml/L/h	Volumétrico
TURBIEDAD	UNT	Turbidimetro
NITRÓGENO	mg/L	Kjeldahl
COLOR	U Pt Co	Colorimétrico
pH	Unidades	Potenciométrico
TEMPERATURA	°C	Termométrico
OD	mg O_2 /L	Electrodo de membrana
FÓSFORO	mg P / L	Cloruro estañoso
ACIDEZ	mg $CaCO_3$/L	Titulométrico
ALCALINIDAD	mg $CaCO_3$/L	Titulométrico

1. Para esta prueba la dilución utilizada fue del 0.05% (5/100), ya que el lixiviado corresponde a un residuo industrial fuerte.

2. Al igual que la prueba anterior una de las dos diluciones de trabajo fue de 0.05% y en algunos casos se utilizo 0.04%.
   El método fue de reflujo abierto para las pruebas iniciales, pero en busca de una economía de reactivos y una disminución de la producción de residuos contaminantes se adoptó el método de reflujo cerrado, en el cual los reactivos corresponden al 10% en cantidades volumétricas y

gravimétricas respecto al método de reflujo abierto y de igual forma se valora la muestra por método volumétrico. El método de reflujo cerrado se realiza en un micro reactor de DQO y allí se tiene presente el mismo tiempo de digestión que en el caso de reflujo abierto, 2 horas.

6.5 CARACTERIZACIÓN DEL LIXIVIADO Y DEL LICOR MEZCLA, FINALIZADA LA ACLIMATACIÓN DEL REACTOR

Tabla 6. Caracterización del lixiviado y del licor mezcla, finalizada la aclimatación del reactor.

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA
pH	UNIDADES	8.25	8.64
TEMPERATURA	°C	22	19.4
COLOR *	NUC	303	334
TURBIDEZ *	NTU	81	244
ST	mg / L	9250	28300
SST	mg / L	364	1380
SSV	mg / L	312	1150
SSF	mg / L	52	230
S. SEDIMENTABLES	ml / L /h	0.5	55
ACIDEZ	Mg $CaCO_3$ / L	690	517.5
ALCALINIDAD	Mg $CaCO_3$ / L	7560	6300

5.1 ALIMENTACIÓN DEL REACTOR

5.1.1 Variación de la carga orgánica másica

El reactor trabajó en forma continua con variación de carga orgánica másica, iniciando con un valor bajo que cambio cada 7 días.

La definición de carga orgánica másica que se utilizó en este trabajo esta dada por:

$$\text{CARGA ORGÁNICA} = Q * DBO_5 / V * Xa \qquad [14]$$

Siendo

Q = caudal de lixiviado de alimento (L/d)

DBO_5 = Demanda bioquímica de oxigeno del lixiviado (mg O_2/L)

V = Volumen del reactor (L)

Xa = Concentración de microorganismos en el reactor (mg/L)

Para la variación de la carga orgánica másica en el reactor se hizo un control del caudal afluente al reactor.

$V_{REACTOR}$ = 200 L

En la siguiente tabla se muestra los parámetros para calcular carga organica relacionados con el caudal alimentado.

Tabla 7. Parámetros para determinar carga orgánica másica.

CAUDAL (L/d)	DBO_5 DEL LIXIVIADO (mg O_2/L)	SST EN EL REACTOR (mg/L)	SSV EN EL REACTOR (mg/L)	DQO DEL LIXIVIADO (mg O_2 / L)
43.2	4577	3280	2040	7333,33
60.48	4000	2550	1935	9375
77.76	3184	1010	690	18125
95.04	2980	2173	1613,33	7200
112.32	3780	1020	673,33	7800
129.6	4060	2380	1840	19125

La carga orgánica se puede expresar en diferentes unidades como se muestra a continuación, para estos cálculos se utilizaron los datos mostrados en la tabla anterior.

Tabla 8. Carga orgánica expresada en diferentes unidades.

CARGA ORGÁNICA MASICA (Kg DBO / Kg SST *d)	CARGA ORGÁNICA MASICA (Kg DBO / Kg SSV *d)	CARGA ORGÁNICA MASICA (Kg DQO / Kg SST *d)	CARGA ORGÁNICA MASICA (Kg DQO / Kg SSV *d)	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO (días)
0.30	0.48	0.48	0.78	4.7
0.48	0.62	1.11	1.46	3.5
1.23	1.79	2.78	4.06	2.5
0.65	0.88	4.18	2.12	2.1
2.08	3.15	4.98	5.117	1.8
1.10	1.43	2.12	2.75	1.6

6.7 RECIRCULACIÓN DE LODOS

Para la recirculación de lodos sedimentados se tienen dos vías, una de diseño y otra de carácter operativo, La primera tiene que ver con el hecho de que la rampa de recirculación de lodos termina justamente en la cuba de aireación, con lo cual se busca que los lodos sedimentados sean recirculados directamente a la zona de mezcla completa. La segunda vía de recirculación de lodos consistía en sacar una vez por día una cantidad apropiada de liquido del sedimentador a través de la válvula de drenaje, localizada justamente al final de la rampa de recirculación de lodos, donde se observara proliferación de lodo; aproximadamente 40 litros, y devolverlos a la cuba de aireación por la parte superior del reactor; esto con el objeto de garantizar un reciclo completo de todos los lodos y evitar que una parte de ellos se acumulara en la zona de sedimentación.

6.8 PURGA DE LODOS

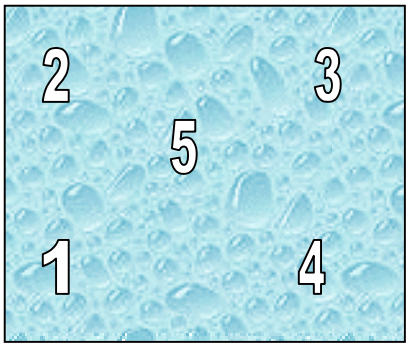
El crecimiento de lodo dentro del sistema bajo por lo cual no se hizo purga directa de lodo. La concentración de sólidos en el licor mezcla no sobrepasó los valores típicos que se encuentran en los reactores de lodos activados. Además, durante el desarrollo de la investigación el reactor presentó varias fugas que en lo posible se recogían y se recirculaban al reactor y que representaban una purga indirecta de lodo.

6.9 CONTROL DE OXIGENO DISUELTO

En un proceso de lodos activados es preciso mantener una concentración de oxigeno disuelto por encima de 2 mg/L, asegurando así las condiciones aeróbias en el reactor. Durante el proceso se tuvo la opción de medir el oxigeno disuelto

con un oximetro y se hizo en cinco puntos del reactor obteniendo los siguientes resultados:

Figura 10. Oxigeno disuelto en el reactor de lodos activados



- **Punto 1 = 2.6 mg/L**
- **Punto 2 = 2.5 mg/L**
- **Punto 3 = 2.7 mg/L**
- **Punto 4 = 2.3 mg/L**
- **Punto 5 = 2.5 mg/L**

El oxigeno disuelto promedio en el reactor fue de 2.52 mg/L
El oxigeno disuelto en el tanque de alimentación del lixiviado crudo fue 1.3 mg/L

6.10 ESTADO ESTABLE

En lodos activados el estado estable es el lapso de tiempo en el cual el reactor tiene estabilidad en condiciones de salida para una misma condición de entrada. Como criterio de estabilidad se tuvo que la concentración de la contaminación del efluente medida como DQO permaneciera con variaciones inferiores o iguales al 10%, así como su remoción; también se tuvieron en cuenta los datos de color, turbiedad y DBO_5.

6.11 CRECIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DE LODO

Durante el desarrollo de la investigación no se observó un crecimiento favorable de lodos dentro del reactor, debido posiblemente a inhibiciones que presentó el sistema.

Los flóculos contenidos en el reactor presentaron una sedimentación muy lenta y tenían un tamaño comprendido entre 0.3 -1.0 mm según la observación de la sedimentación del lodo en una probeta de 500 ml y comparando con la figura IV.2 (comparador para estimar el tamaño del floc producido en la coagulación según el WRA) del libro , teoría y practica de la purificación del agua de Jorge Arboleda Valencia.

6.12 POSIBLES INHIBICIONES DEL SISTEMA

El sistema presentó una deficiente formación de lodo, las inhibiciones que pudieron perjudicar el proceso son:

- Varios elementos pueden inhibir el desarrollo de las reacciones bioquímicas que tienen lugar en el proceso aerobio, la tabla siguiente muestra, para algunos metales la concentración mínima aceptada, comparada con las concentraciones encontradas en el lixiviado:

Tabla 9. Concentración mínima de algunos metales en el proceso de lodo activado comparada con las concentraciones encontradas en el lixiviado.

CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN LÍMITE (mg/L)	CONCENTRACIÓN LIXIVIADO (mg/L)
Plomo	0.1	0.71
Hierro	1.0	7.54

- Toxicidad por amonio de acuerdo a la evaluación de Nitrógeno Amoniacal del lixiviado afluente (922.53 mg NH_3 –N /L).
- La alta carga orgánica con la que se alimentó el sistema representada principalmente en DBO_5
- Presencia de organismos filamentosos que no favorecen el desarrollo del proceso, según la observaciones microscópicas realizadas del licor mezcla.
- El crecimiento disperso representa problemas de sedimentación en los que algunos de los microorganismos no floculan en partículas suficientemente grandes para sedimentar con rapidez.

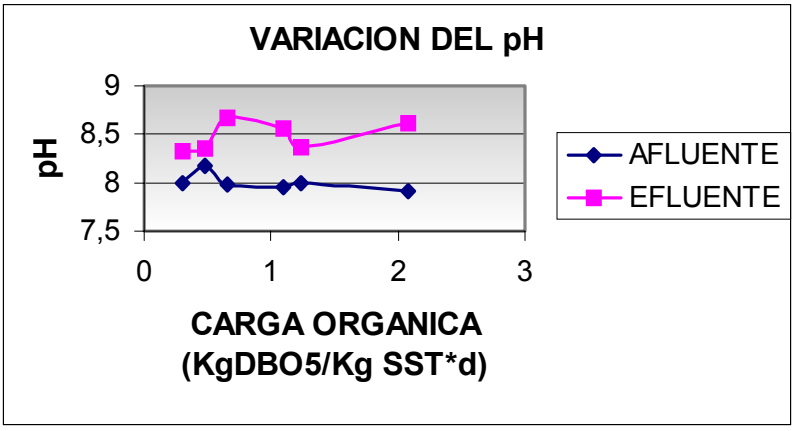
7 OBTENCIÓN Y TRATAMIENTO DE RESULTADOS

7.1 VARIACIÓN DEL pH DURANTE EL PROCESO

Tabla 10. Variación del pH durante el proceso

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	pH (Unidades) ENTRADA	pH (Unidades) SALIDA
0.30	7,99	8,33
0.48	8,18	8,35
0.65	7.98	8.67
1.10	7.96	8.56
1.23	7.99	8.37
2.08	7.91	8.62

Gráfico 1. Variación del pH durante el proceso



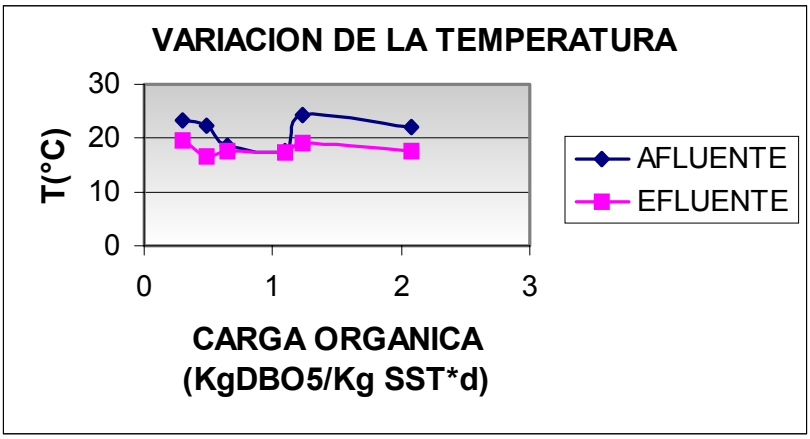
Se observa que durante el proceso se da una elevación del pH del lixiviado de la entrada a la salida para todas las cargas orgánicas utilizadas, llegando a un punto máximo de 8.67 unidades y un valor mínimo de 8.33 unidades.

7.2 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO

Tabla 11. Variación de la temperatura durante el proceso

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	T(°C) ENTRADA	T(°C) SALIDA
0.30	23,4	19,7
0.48	22,2	16,7
0.65	18.7	17.7
1.10	17.7	17.4
1.23	24.3	19.2
2.08	22	17.6

Gráfico 2. Variación de la temperatura durante el proceso



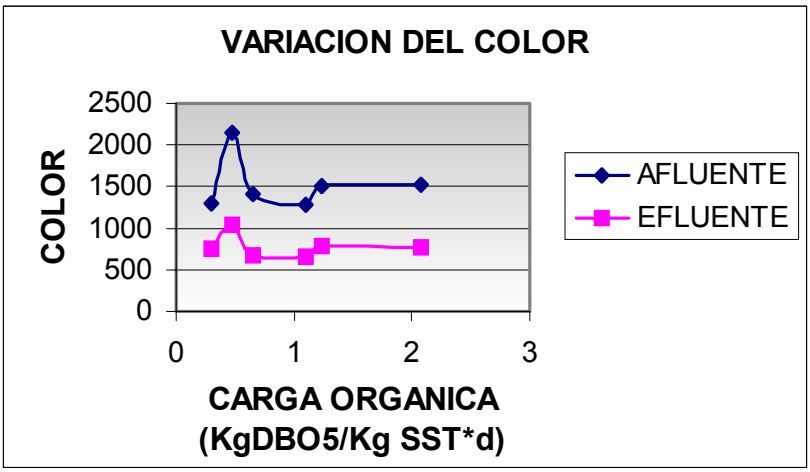
La temperatura en el proceso, al contrario del pH disminuyó para cada una de las cargas orgánicas utilizadas, variando entre 17.7 – 24.3 °C a la entrada y 16.7 - 19.7 °C a la salida, esto debido posiblemente a los cambios climáticos.

7.3 VARIACIÓN DEL COLOR DURANTE EL PROCESO

Tabla 12 Variación del color durante el proceso.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	COLOR (NUC) ENTRADA	COLOR (NUC) SALIDA	% REMOCIÓN
0.30	1305	755	42.15
0.48	2140	1040	51.40
0.65	1415	670	52.65
1.10	1280	650	49.22
1.23	1505	780	48.17
2.08	1515	770	49.17

Gráfico 3. Variación del color durante el proceso



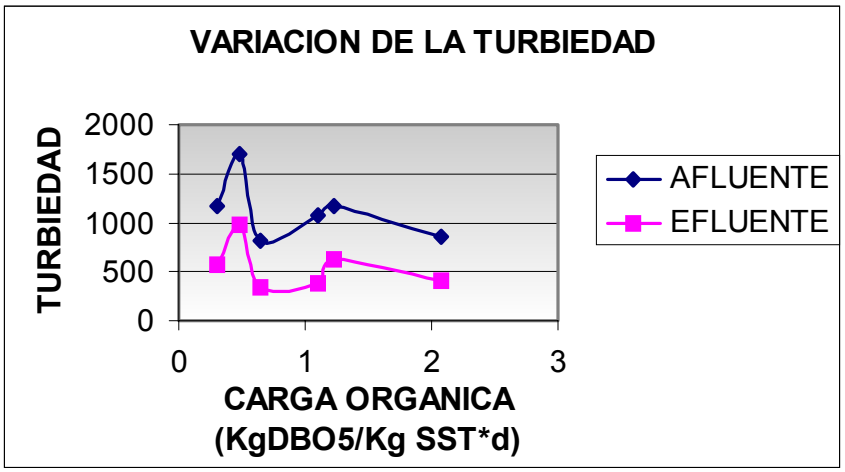
El color tuvo remociones cercanas al 50% para las diferentes cargas orgánicas empleadas; sin embargo, hubo unas pocas ocasiones en las que se observó un incremento del color a la salida del reactor.

7.4 VARIACIÓN DE LA TURBIEDAD DURANTE EL PROCESO

Tabla 13 Variación de la turbiedad durante el proceso.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	TURBIEDAD (NTU) ENTRADA	TURBIEDAD (NTU) SALIDA	% REMOCIÓN
0.30	1170	570	51.28
0.48	1700	980	42.35
0.65	810	340	58.02
1.10	1070	380	64.48
1.23	1170	620	47.01
2.08	860	410	52.32

Gráfico 4. Variación de la turbiedad durante el proceso.



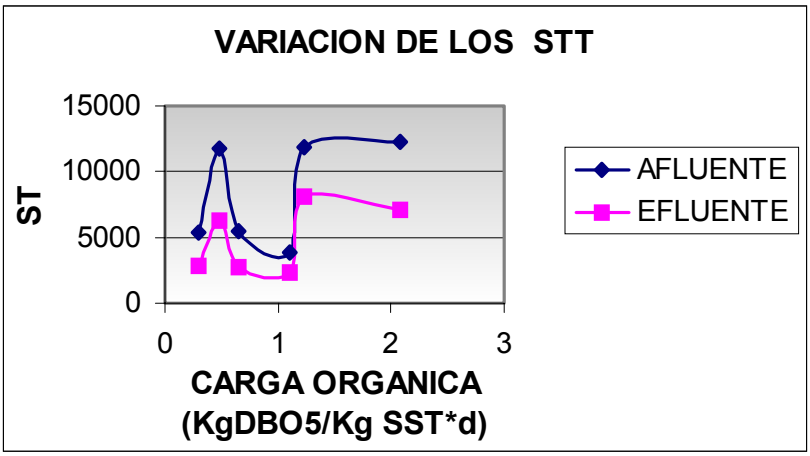
La Turbiedad tuvo una remoción máxima del 64.48% para una carga orgánica de 0.65 (Kg DBO_5 /Kg SST*d) y la remoción mínima fue de 42.35% para 0.47 (Kg DBO_5 /Kg SST*d).

7.5 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES DURANTE EL PROCESO

Tabla 14 Variación de los sólidos totales durante el proceso.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	STT ENTRADA (mg/L)	STT SALIDA (mg/L)	%REMOCIÓN
0.30	5368	2836	47.68
0.48	11740	6280	46.51
0.65	5442	2720	50.02
1.10	3830	2340	38.9
1.23	11820	8070	31.73
2.08	12250	7100	42.04

Gráfico 5. Variación de los sólidos totales durante el proceso.



Puede observarse como cambia la concentración de los sólidos totales a la entrada del reactor, esto sin duda afecta la eficiencia del proceso y las condiciones en búsqueda de un estado estable.

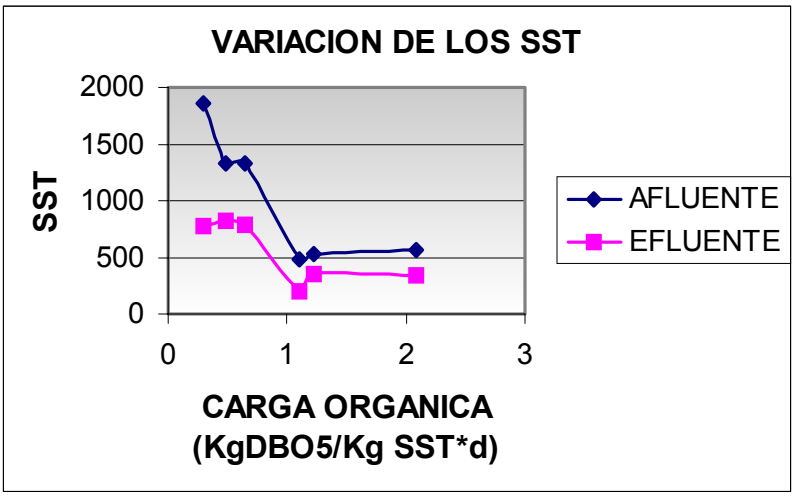
La remoción de los sólidos totales fue buena; La remoción más baja fue del 31% para una carga orgánica de 1.10 (Kg DBO_5 /Kg SST*d); Y la más alta de 50.02 % para una carga de 1.23 (Kg DBO_5 /Kg SST*d).

7.6 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES DURANTE EL PROCESO

Tabla 15. Variación de los sólidos suspendidos totales durante el proceso.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	SST ENTRADA (mg/L)	SST SALIDA (mg/L)	% REMOCIÓN
0.30	1860	780	58.06
0.48	1324	820	38.07
0.65	1326	793,33	40.17
1.10	480	200	58.33
1.23	530	350	33.96
2.08	564	346,67	38.53

Gráfico 6. Variación de los sólidos suspendidos totales durante el proceso.



La remoción de los sólidos suspendidos totales fue cercana al 60% para cargas orgánicas de 0.30 y 0.48 (Kg DBO_5 /Kg SST*d), la remoción más baja fue del 33% para una carga de 1.10 (Kg DBO_5 /Kg SST*d).

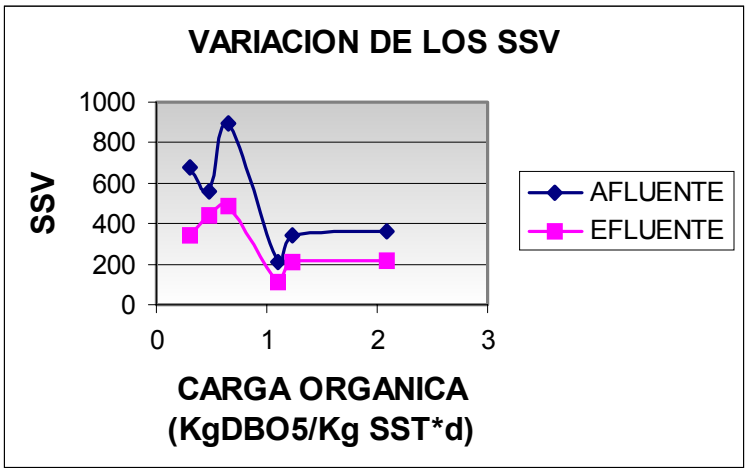
Se observa nuevamente una variación entre los sólidos suspendidos totales a la entrada del reactor.

7.7 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES DURANTE EL PROCESO

Tabla 16. Variación de los sólidos suspendidos volátiles durante el proceso.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	SSV ENTRADA (mg/L)	SSV SALIDA (mg/L)	%REMOCIÓN
0.30	680	340	50
0.48	559	439	21.47
0.65	895	487	45.59
1.10	210	110	47.62
1.23	340	210	38.24
2.08	362	220	39.22

Gráfico 7. Variación de los sólidos suspendidos volátiles durante el proceso.



Los sólidos suspendidos volátiles tuvieron remociones hasta del 50% para una carga orgánica de 0.30 (Kg DBO_5 /Kg SST*d).

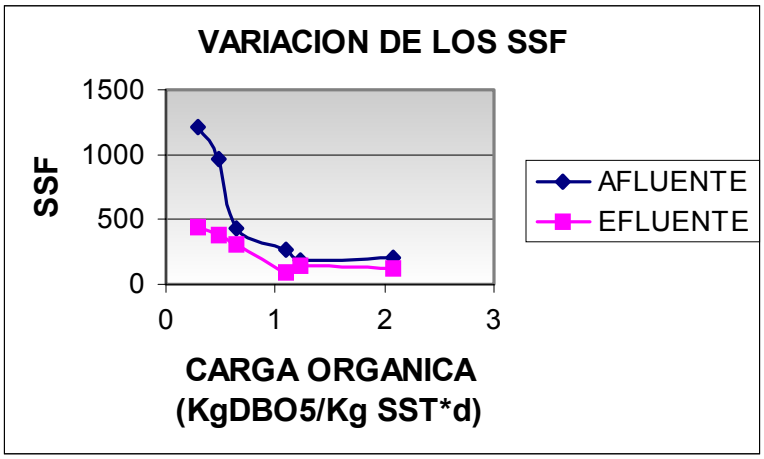
La concentración de los sólidos suspendidos volátiles en el efluente del reactor es baja lo que sugiere que no hubo pérdidas de biomasa activa en el sistema.

7.8 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS DURANTE EL PROCESO

Tabla 7. Variación de los sólidos suspendidos fijos durante el proceso.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	SSF ENTRADA (mg/L)	SSF SALIDA (mg/L)	% REMOCIÓN
0.30	1210	440	63.64
0.48	965	381	60.52
0.65	431	306	29
1.10	270	90	66.67
1.23	190	140	26.32
2.08	202	126,67	37.62

Gráfico 8. Variación de los sólidos suspendidos fijos durante el proceso.



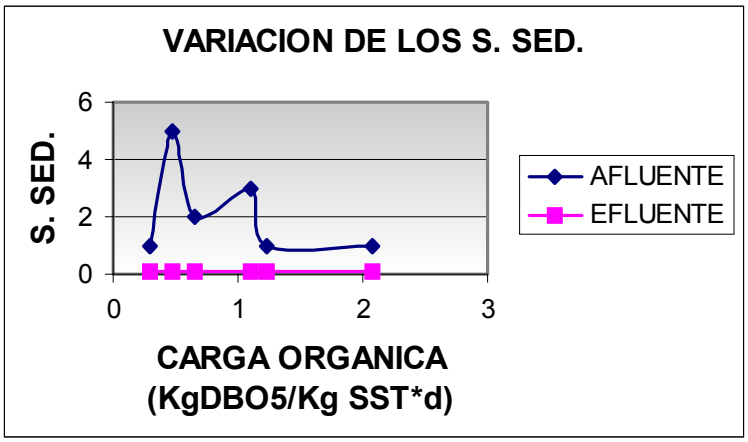
Los sólidos suspendidos fijos presentaron variaciones significativas a la entrada del reactor, lo cual muestra las variaciones en el clima y por lo tanto en el estado del lixiviado, así para tiempo con precipitación pluvial alta se notó una disminución en la concentración de sólidos en el afluente. Las remociones obtenidas en general fueron buenas, llegando a valores altos del 66.67 % para una carga de 1.23; la remoción más baja fue del 26.32% para una carga de 1.10 (Kg de DBO_5 /Kg SST*d).

7.9 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS SEDIMENTABLES DURANTE EL PROCESO

Tabla 18 Variación de los sólidos sedimentables durante el proceso.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	S. SED. (ml/L/h) ENTRADA	S. SED. (ml/L/h) SALIDA	% REMOCIÓN
0.30	1	0,1	90
0.48	5	0,1	98
0.65	2	0,1	95
1.10	3	0,1	96.67
1.23	1	0,1	90
2.08	1	0,1	90

Gráfico 9. Variación de los sólidos sedimentables durante el proceso.



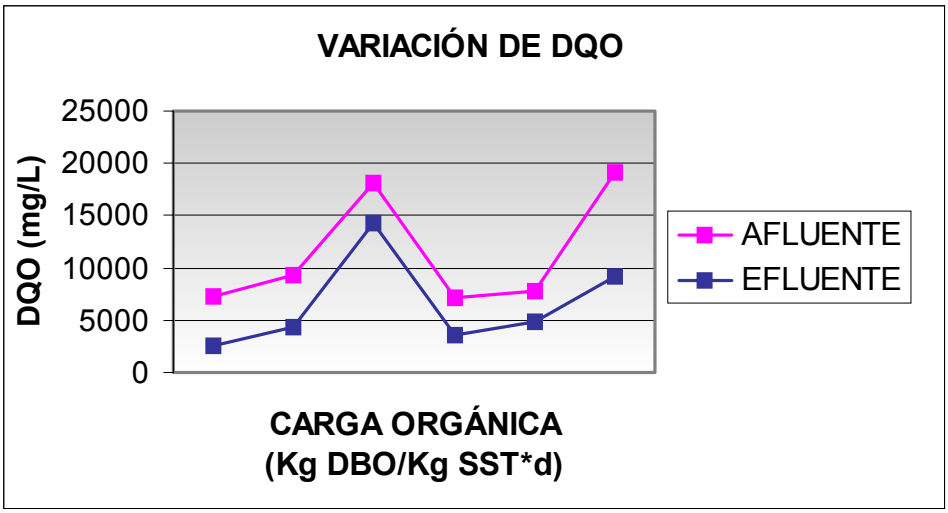
Los sólidos sedimentables a la salida del sedimentador siempre presentaron valores muy bajos (< 0.1 ml/L/h), una de las razones puede ser el tamaño del lodo que la ser pequeño no se represente como sólidos sedimentables, sino como sólidos suspendidos.

7.10 VARIACIÓN DE LA DQO DURANTE EL PROCESO

Tabla 19. Variación de la DQO durante el proceso.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	DQO (mg O_2 / L) ENTRADA	DQO (mg O_2 / L) SALIDA	% REMOCIÓN
0.30	7333,33	2500	65.91
0.48	9375	4375	53.33
0.65	18125	14250	21.38
1.10	7200	3600	50
1.23	7800	4800	38.46
2.08	19125	9120	52.31

Gráfico 10. Variación de la DQO durante el proceso.



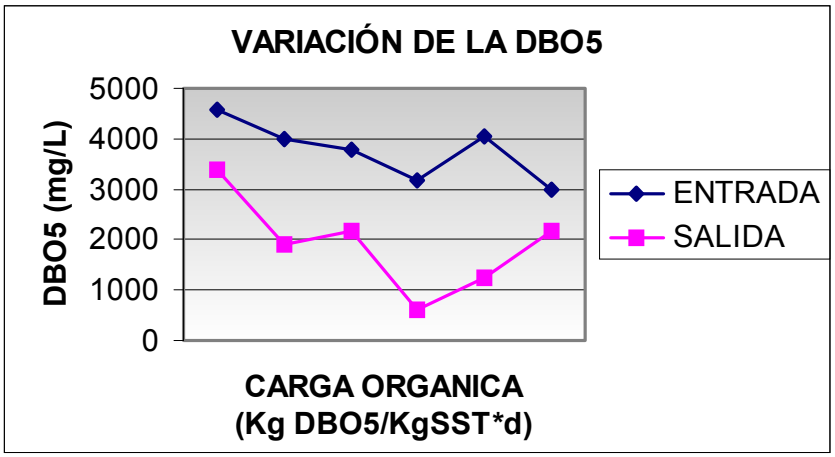
La remoción de la carga orgánica representada en DQO fue mayor para las cargas orgánicas más bajas alimentadas (65.91%). Cuando se incrementó la carga los porcentajes de remoción bajaron al 21%.

7.11 VARIACIÓN DE LA DBO DURANTE EL PROCESO

Tabla 20. Variación de la DBO durante el proceso.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	DBO (mg O_2 / L) ENTRADA	DBO (mg O_2 / L) SALIDA	% REMOCIÓN
0.30	4577	3380	26.15
0.48	4000	1900	52.57
0.65	3780	2180	42.32
1.10	3184	597	81.25
1.23	4060	1250	69.2
2.08	2980	2180	26.85

Gráfico 11. Variación de la DBO durante el proceso.



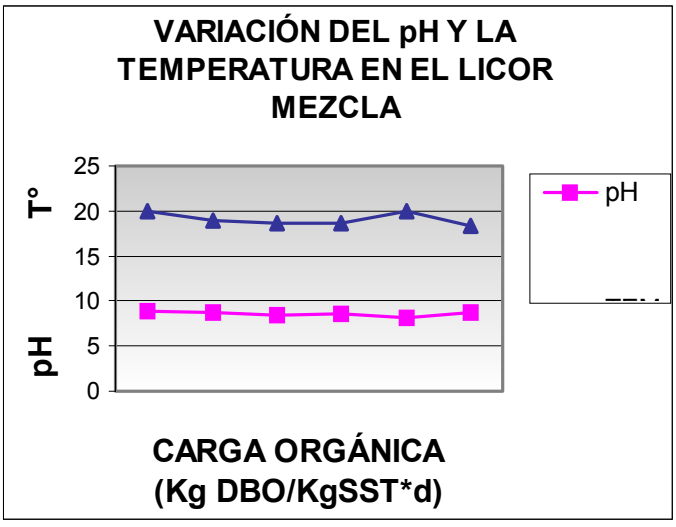
La remoción de DBO fue muy variable obteniéndose el mejor valor (81.25%) para una carga orgánica de 1.10 (Kg DBO_5 /Kg SST*d) y el valor más bajo (26.15%) para una carga de 0.30 (Kg DBO_5 /Kg SST*d).

7.12 VARIACIÓN DEL pH Y LA TEMPERATURA EN EL LICOR MEZCLA

Tabla 21. Variación del pH y la temperatura en el licor mezcla.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	pH (Unidades)	T(°C)
0.30	8.91	20
0.48	8.79	19
0.65	8.39	18.7
1.10	8.58	18.7
1.23	8.08	20
2.08	8.78	18.3

Gráfico 12. Variación del pH y la temperatura en el licor mezcla.



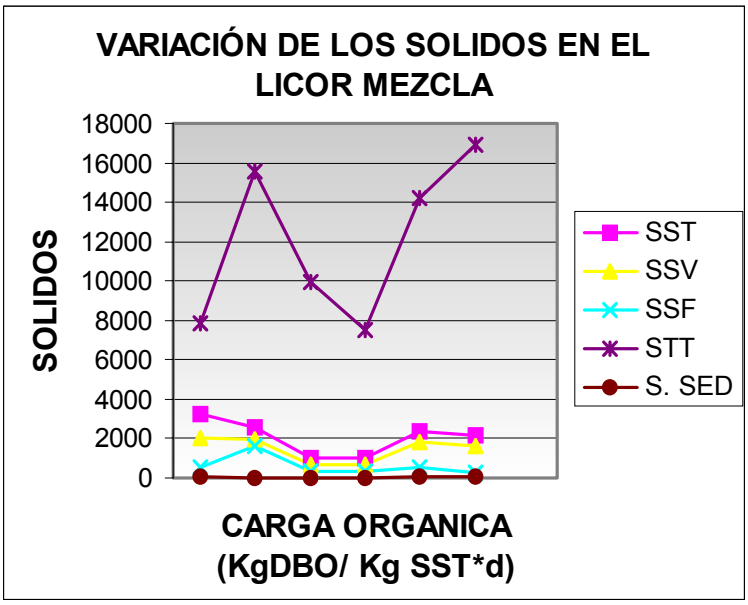
El pH en el reactor oscilo entre 7.5 y 8.7 unidades, se considera que el intervalo óptimo para el licor mezcla esta entre 6.5 y 8.5 rango en el cual el crecimiento biológico es normal. La temperatura en la cuba de aireación osciló entre 18 y 25 °C siendo influenciada por los cambios de clima, ya que el reactor se encontraba a la intemperie, la temperatura óptima era de 20 °C, por lo cual concluimos que el rango en el cual trabajo el proceso fue el adecuado.

7.13 VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS EN EL LICOR MEZCLA DURANTE EL PROCESO

Tabla 22. Variación de los sólidos en el licor mezcla.

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)	STT (mg/L)	S. SED (ml/L/h)
0.30	3280	2040	570	7836	40
0.48	2550	1935	1615	15540	20
0.65	1010	690	320	7500	20
1.10	2173	1613,33	260	16900	35
1.23	1020	673,33	346,67	9980	20
2.08	2380	1840	540	14230	40

Gráfico 13. Variación de los sólidos en el licor mezcla.



Como medida de control de la operación del reactor de lodos activados, se realizaron mediciones periódicas de la concentración de los sólidos en el afluente,

en la cuba de aireación y en el efluente del reactor de lodos activados. Se observa una oscilación de los valores de los sólidos (ST, SST, SSV, SSF, S SED.) entre una carga y otra, esto puede ser causa de las pérdidas de lodo que se dieron en el transcurso de la investigación por fugas en el reactor, además de los cambios observados en la concentración de sólidos en el lixiviado utilizado como alimentación al reactor.

En un proceso como éste se espera que lo SSV aumenten con el transcurso de cada edad de lodos, pero no se pudo notar ninguna tendencia favorable en este sentido debido a los ya nombrados problemas operacionales.

Sin embargo, la eficiencia del proceso en cuanto a la remoción de sólidos es relativamente buena, llegándose a obtener hasta un 50% para cada uno de los parámetros mencionados.

7.14 VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DBO_5/DQO

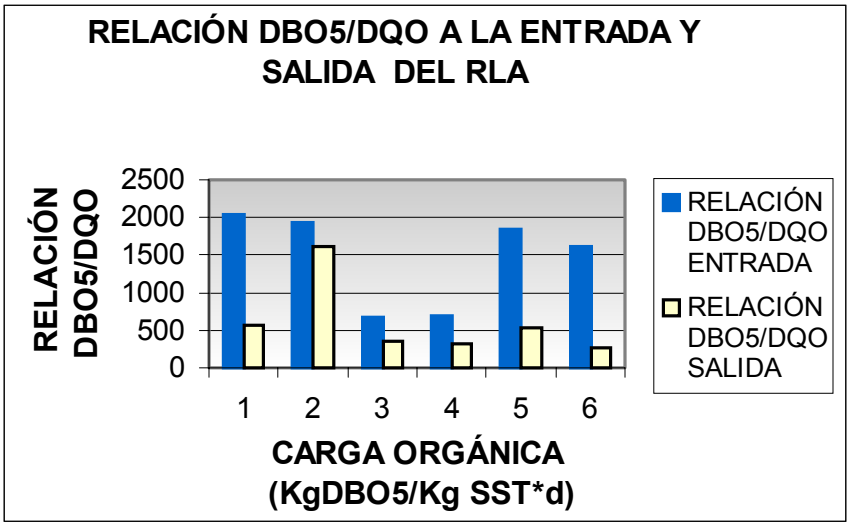
Tabla 23. Variación de la relación DBO_5/DQO

CARGA ORGÁNICA (Kg DBO_5 /Kg SST*d)	RELACIÓN DBO_5/DQO ENTRADA	RELACIÓN DBO_5/DQO SALIDA
0.30	0.62	0.75
0.48	0.43	0.43
0.65	0.21	0.15
1.10	0.44	0.17
1.23	0.52	0.32
2.08	0.16	0.24
PROMEDIO	**0.4**	**0.35**

La relación entre la DBO5, que representa la parte fácilmente biodegradable del sustrato o alimento, y la DQO es relativamente alta para el lixiviado crudo, lo cual justifica el tratamiento biológico. Puede notarse que en promedio la relación

DBO_5/DQO es mayor a la entrada (0.4) que a la salida (0.35) como pude observarse en la grafica siguiente:

Gráfico 14. Variación de la relación DBO_5/DQO



8. ESTADO ESTABLE

Para determinar la estabilidad del reactor de lodos activados se realizaron pruebas de caracterización durante varios días, manteniendo caudal constante y observando que para esta condición de entrada, el comportamiento de la remoción de DBO y DQO principalmente no tuvo altas variaciones encontrándose los valores que se presentan a continuación:

8.1 ESTADO ESTABLE 1

Tabla 24. Mayo 5/2003

Caudal = 0.9 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.84	8.45	8.42	-
TEMPERATURA	°C	26.1	16.7	19.9	-
COLOR *	NUC	2030		1180	41.87
TURBIDEZ *	NTU	1900		1030	45.79
ST	mg / L	10955	12203	2490	77.27
SST	mg / L	2730	4610	1330	51.28
SSV	mg / L	1830	1870	1000	45.36
SSF	mg / L	900	2740	330	63.33
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	1	40	<0.1	-
DQO	mg O_2 / L	7200		3600	50
DBO_5	mg O_2 / L	4900		2100	57.14

Tabla 25. Mayo 6/2003

Caudal = 0.9 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.84	8.68	8.30	-
TEMPERATURA	°C	19.8	21.3	19.2	-
COLOR *	NUC	1900		1185	37.63
TURBIDEZ *	NTU	1720		990	42.44
DQO	mg O_2 / L	9760.8		5112.8	47.62

Tabla 26. Mayo 7/2003

Caudal = 0.9 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.84	8.68	8.30	-
TEMPERATURA	°C	19.8	21.3	19.2	-
COLOR *	NUC	1900		1185	37.63
TURBIDEZ *	NTU	1720		990	42.44
DQO	mg O_2 / L	9760.8		5112.8	47.62
DBO_5	mg O_2 / L	4000		1700	57.5

Tabla 27. Mayo 8/2003

Caudal = 0.9 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.64	8.23	8.07	-
TEMPERATURA	°C	26.6	25	17.6	-
COLOR *	NUC	1755		1015	42.16
TURBIDEZ *	NTU	1830		1080	40.98
DQO	mg O_2 / L	9996		4760	52.38
DBO_5	mg O_2 / L	4060		1250	69.2

Tabla 28. Mayo 9/2003

Caudal = 0.9 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.86	7.80	8.29	-
TEMPERATURA	°C	26	22.5	17.2	-
COLOR *	NUC	1360		710	47.79
TURBIDEZ *	NTU	1370		710	48.17
DQO	mg O_2 / L	7040		3080	56.25

Los niveles de remoción para color, turbiedad, DQO, y DBO se mantuvieron dentro de un rango que nos permite concluir que el reactor esta trabajando en forma estable, como se puede observar en las siguientes tablas y graficas.

REMOCIÓN DE DQO

Tabla 29. Remoción de DQO durante el estado estable

Días	DQO (mgO_2/L) ENTRADA	DQO (mgO_2/L) SALIDA	% REMOCIÓN
Mayo 5	7200	3600	50
Mayo 6	9760.8	5112.8	47.62
Mayo 7	9296	5112.8	45
Mayo 8	9996	4760	52.38
Mayo 9	7040	3080	56.25

Gráfico 15. Valores de DQO durante el estado estable**.**

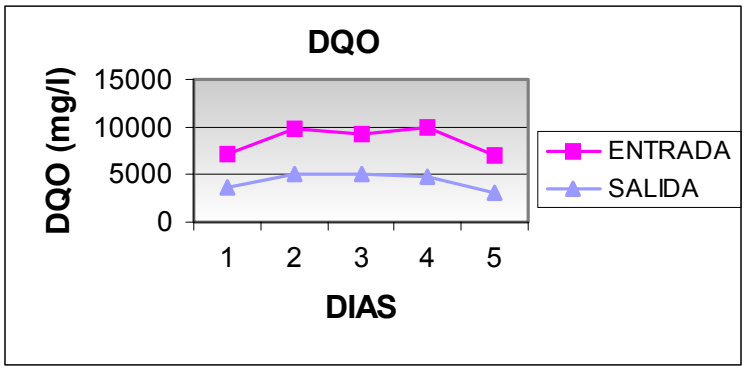
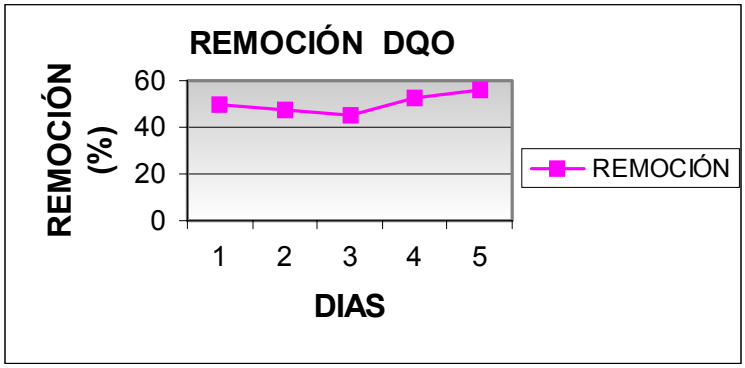


Gráfico 16. Remoción de DQO durante el estado estable.



REMOCIÓN DE DBO

Caudal = 0.9 ml/s

Tabla 30. Remoción de DBO_5 durante el estado estable

Días	DBO_5 (mgO_2/L) ENTRADA	DBO_5 (mgO_2/L) SALIDA	% REMOCIÓN
Mayo 5	4900	2100	57.14
Mayo 7	4000	1700	57.5
Mayo 8	4060	1250	69.2

Gráfico 17. Valores de DBO durante el estado estable.

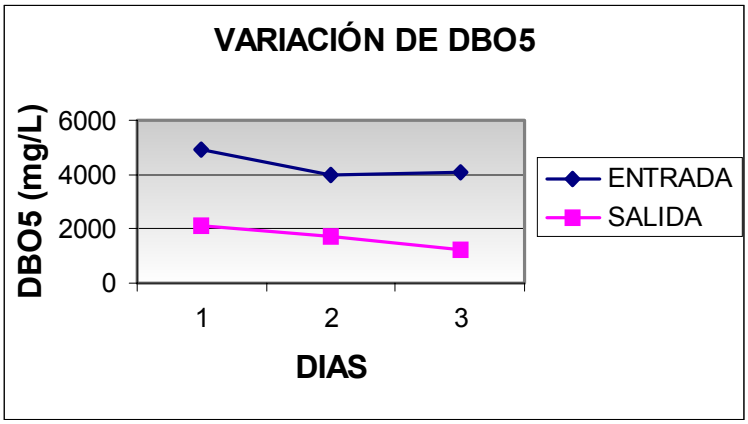
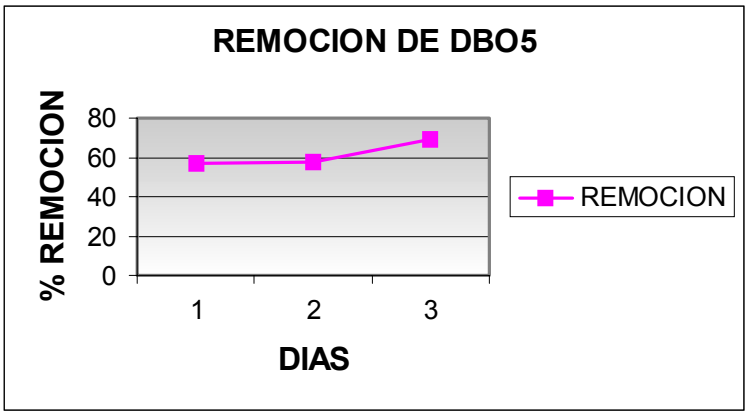


Gráfico 18. Remoción de DBO durante el estado estable.



REMOCIÓN DE COLOR

Tabla 31. Remoción de color durante el estado estable

Días	COLOR (UNC) ENTRADA	COLOR (NUC) SALIDA	% REMOCIÓN
Mayo 5	2030	1180	41.87
Mayo 6	1900	1185	37.63
Mayo 7	1265	790	37.55
Mayo 8	1755	1015	42.16
Mayo 9	1360	710	47.79

Gráfico 19. Valores de color durante el estado estable.

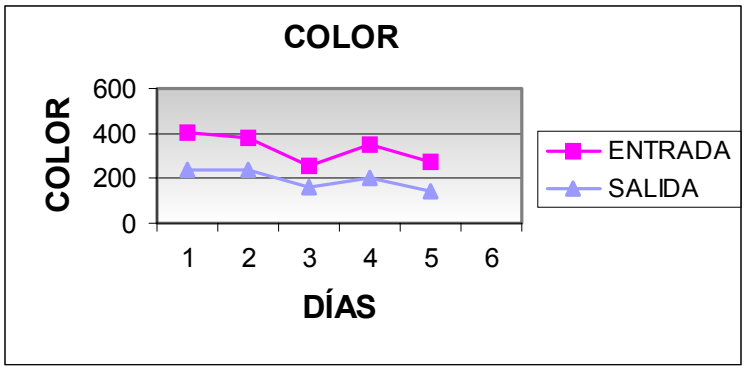
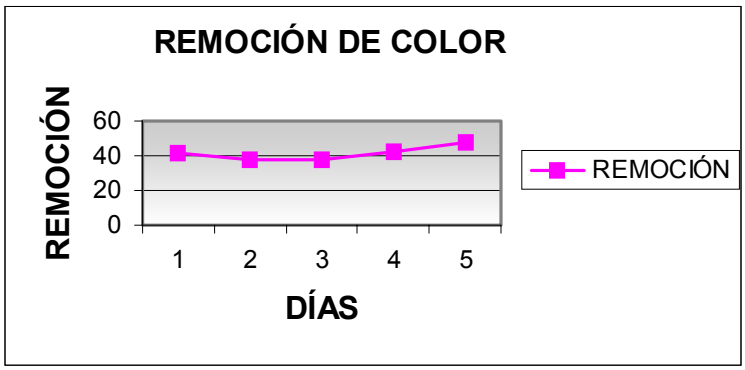


Gráfico 20. Remoción de color durante el estado estable.



REMOCIÓN DE TURBIEDAD

Tabla 32. Remoción de turbiedad durante el estado estable

Días	TURBIEDAD (NUT) ENTRADA	TURBIEDAD (NUT) SALIDA	% REMOCIÓN
Mayo 5	1900	1030	45.79
Mayo 6	1720	990	42.44
Mayo 7	1090	630	42.20
Mayo 8	1830	1080	40.98
Mayo 9	1370	710	48.17

Gráfico 21. Valores de turbiedad durante el estado estable.

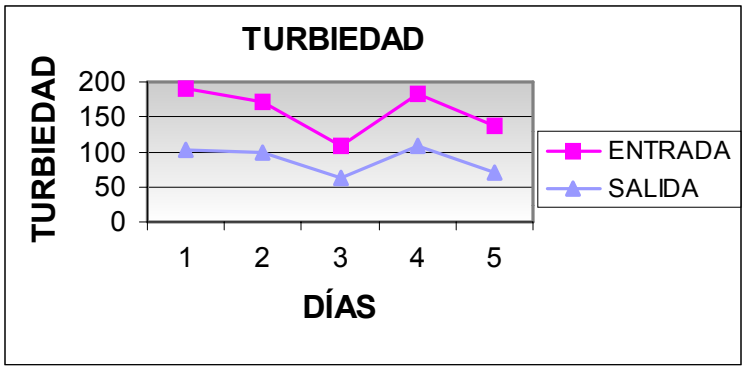
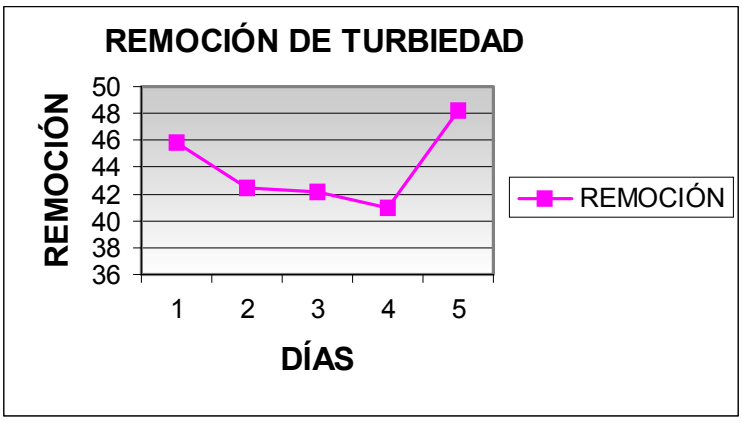


Gráfico 22. Remoción de color durante el estado estable.



8.2 ESTADO ESTABLE 2

Tabla 33. Mayo 12/2003

Caudal =0.5 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.81	8.50	8.14	-
TEMPERATURA	°C	20.6	21.9	19.3	-
COLOR *	NUC	1285		1020	20.62
TURBIDEZ *	NTU	1310		950	27.49
STT	mg / L		17280		
SST	mg / L		2914		
SSV	mg / L		2014		
SSF	mg / L		900		
DQO	mg O_2 / L	7816		3180	59.31

Tabla 34. Mayo 13/2003

Caudal =0.5 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.74	8.41	8.11	-
TEMPERATURA	°C	26.9	20.7	19.4	-
COLOR *	NUC	1120		2040	
TURBIDEZ *	NTU	1600		2250	
DQO	mg O_2 / L	10791.2		3948	63.41
DBO_5	mg O_2 / L	5800		2000	65.51

Tabla 35. Mayo 14/2003

Caudal =0.5 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.93	8.36	8.28	-
TEMPERATURA	°C	20.8	19.5	17.8	-
COLOR *	NUC	1445		1070	25.95
TURBIDEZ *	NTU	1720		1230	28.49
STT	mg / L	13086.67	13680	2593.33	80.18
SST	mg / L	2630	3020	1710	53.80
SSV	mg / L	1550	2370	1010	34.84
SSF	mg / L	1080	650	700	35.18
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	5	30	1	80
DQO	mg O_2 / L	9600		3200	66.67

Tabla 36. Mayo 15/2003

Caudal =0.5 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.61	8.35	8.27	-
TEMPERATURA	°C	25.5	17.6	16	-
COLOR *	NUC	1715		1310	23.61
TURBIDEZ *	NTU	1430		1120	21.68
STT	mg / L		11870		
SST	mg / L		3280		
SSV	mg / L		2660		
SSF	mg / L		620		
DQO	mg O_2 / L	10981		3792.48	65.47

Tabla 37. Mayo 16/2003

Caudal =0.5 ml/s

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.86	8.57	8.44	-
TEMPERATURA	°C	25.3	19.1	17.1	-
COLOR *	NUC	143		173	-
TURBIDEZ *	NTU	960		1440	-
STT	mg / L		10400		
SST	mg / L		2900		
SSV	mg / L		2040		
SSF	mg / L		860		
DQO	mg O_2 / L			3148.145	63.82
DBO_5	mg O_2 / L	5000		1800	64

REMOCIÓN DE DQO

Tabla 38. Remoción de DQO durante el estado estable

Días	DQO (mgO_2/L) ENTRADA	DQO (mgO_2/L) SALIDA	% REMOCIÓN
Mayo 12	8860	3180	64.11
Mayo 13	10791.2	3948	63.41
Mayo 14	9600	3200	66.67
Mayo 15	10981.2	3792.48	65.47
Mayo 16	8703.7	3148.15	63.82

Gráfico 23. Valores de DQO durante el estado estable.

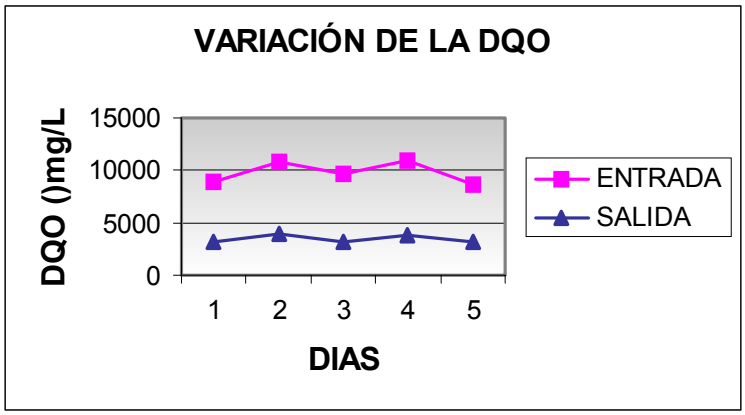
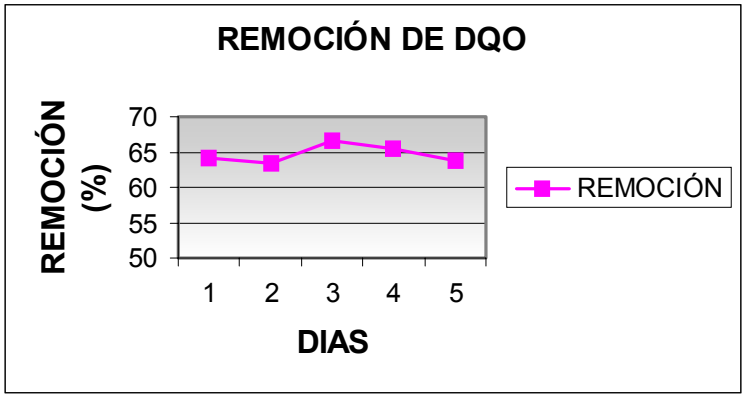


Gráfico 24. Remoción de DQO durante el estado estable.



REMOCIÓN DE DBO_5

Tabla 39. Remoción de DBO_5 durante el estado estable

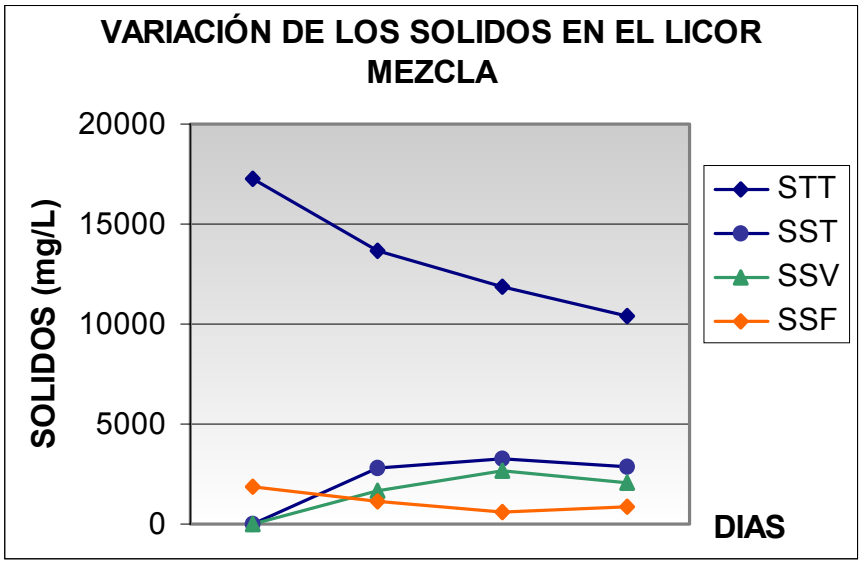
Días	DBO_5 (mgO_2/L) ENTRADA	DBO_5 (mgO_2/L) SALIDA	% REMOCIÓN
Mayo 13	5800	2000	65.51
Mayo 16	5000	1800	64

VARIACIÓN DE LOS SÓLIDOS EN EL LICOR MEZCLA

Tabla 40. Variación de los sólidos en el licor mezcla

Días	STT (mg/L)	SST (mg/L)	SSV (mg/L)	SSF (mg/L)
Mayo 12	17280	3914.29	2014.29	1900
Mayo 14	13680	2820	1670	1150
Mayo 15	11870	3280	2660	620
Mayo 16	10400	2900	2040	860

Gráfico 25. Variación de los sólidos en el licor mezcla



9. COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS CON LOS QUE SE OBTIENEN EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO

Actualmente la planta de tratamiento físico-químico que se tiene en el relleno sanitario “La Esmeralda ” proporciona los siguientes resultados

Fecha: Abril 30/2003

Clima: seco

Caudal: 2.5 L/s

Coagulante: cloruro férrico

Tabla 41. Caracterización planta de tratamiento de lixiviados, abril 30/2003

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	ENTRADA PTL	SALIDA PTL	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.32	7.43	NA
TEMPERATURA	°C	25	25	NA
COLOR *	NUC	1640	1495	8.84
TURBIDEZ	NTU	1035	774	25.22
ST	mg / L	9703	9100	6.21
SST	mg / L	3220	1889	41.33
SSV	mg / L	2460	1356	44.88
SSF	mg / L	760	533	29.87
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	3.5	0.8	77.14
ALCALINIDAD	mg $CaCO_3$ / L	8320	8312	NA
DQO	mg O_2 / L	14000	12000	14.29
DBO	mg O_2 / L	4200	4000	4.76

Para esta misma fecha se obtienen los siguientes datos en el reactor de lodos activados:

CARGA ORGÁNICA = 0.47 Kg DBO / Kg SST*d

Q = 0.7 ml / s

Tabla 42. Caracterización reactor de lodos activados, abril 30/2003

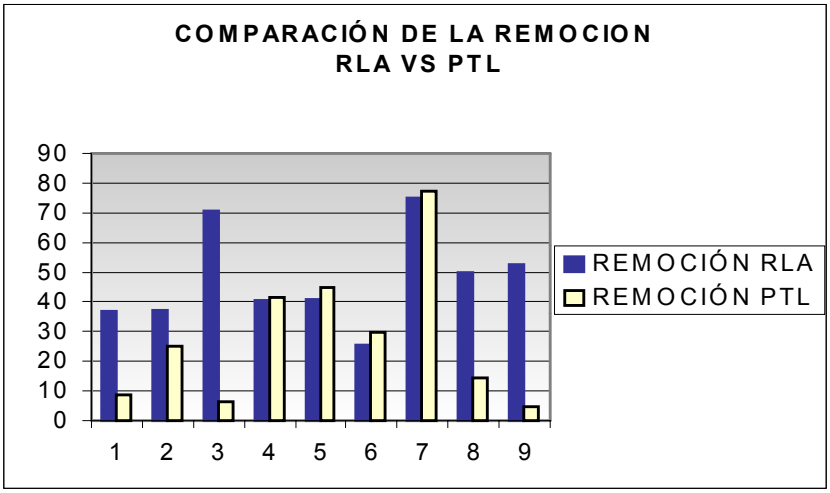
CARACTERÍSTICA	UNIDAD	ENTRADA RLA	SALIDA RLA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.45	8.04	-
TEMPERATURA	°C	25	25	-
COLOR *	NUC	1760	1115	36.64
TURBIDEZ	NTU	1720	1080	37.21
ST	mg / L	7445	2180	70.72
SST	mg / L	1895	1130	40.37
SSV	mg / L	1460	865	40.75
SSF	mg / L	435	325	25.59
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	4	1	75
DQO	mg O_2 / L	9360	4680	50
DBO	mg O_2 / L	4000	1900	52.57

RLA (Reactor de lodos activados)

Tabla 43. Comparación de las remociones obtenidas por la planta de tratamiento de lixiviados y el reactor de lodos activados

CARACTERÍSTICA	%REMOCIÓN RLA (REACTOR DE LODOS ACTIVADOS)	%REMOCIÓN PTL (PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS)
1. COLOR	36,64	8,84
2. TURBIEDAD	37,21	25,22
3. SÓLIDOS TOTALES	70,72	6,21
4. SST	40,37	41,33
5. SSV	40,75	44,88
6. SSF	25,59	29,87
7. S. SED.	75	77,14
8. DQO	50	14,29
9. DBO	52,57	4,76

Grafico 26. Comparación de las remociones obtenidas por la planta de tratamiento de lixiviados y el reactor de lodos activados.



Como se puede observar el reactor da niveles de remoción en todos los parámetros mucho mayores a los de la planta.

CONCLUSIONES

- ✓ Las mejores condiciones de operación del reactor de lodos activados se dio al trabajar con una carga orgánica de 0.48 Kg DBO_5 /Kg SST*d ; observándose porcentajes de remoción en DBO_5 del 52.57 %, DQO del 65.07%, de STT de 46.51 %, de color del 51.40 % y de turbiedad del 42.35%; además esta carga orgánica se encuentra en el rango de diseño recomendado en la literatura para el proceso de lodos activados tipo mezcla completa (0.2-0.6 Kg DBO_5 /Kg SST*d).

- ✓ El pH y la temperatura de la cuba de aireación durante la investigación fueron apropiados para facilitar el proceso biológico.

- ✓ Al aumentar el valor de la carga orgánica afluente al reactor de lodos activados, la remoción de la materia orgánica presento oscilaciones que no permiten observar el efecto del incremento de la carga orgánica para la eficiencia del proceso.

- ✓ El proceso tuvo un lento crecimiento del lodo el cual se acumuló en la parte inferior de la cuba de aireación, esto debido a la zona muerta encontrada entre la base de la cuba de aireación y los difusores de aire.

- ✓ La proliferación de lodo no se pudo visualizar por medio de las pruebas de sedimentabilidad realizadas, esto no indica que no hubo producción de

biomasa, ya que se encontró gran cantidad de lodo acumulado en la base de la cuba de aireación al desocupar el reactor

- ✓ Todo parece indicar que el sistema de lodos activados presento inhibiciones, posiblemente por toxicidad ante el exceso de amonio del lixiviado y/o la presencia de metales pesados y sulfuros.

- ✓ La sedimentación que se observo en las pruebas realizadas con el cono imnhof y la probeta de 1000 ml dejando sedimentar por 30 minutos, fue muy lenta además de que los flóculos presentaron tamaños muy pequeños.

- ✓ Para llegar a conclusiones más apropiadas en cuanto a la población microbiana presente en el lodo era necesario realizar un análisis microscópico más detallado.

- ✓ Se presume que en el lodo se encuentran organismos filamentosos ya que el floc es de baja densidad, mal compactado y con una baja sedimentación.

- ✓ Se presentó una capa de espuma de color carmelita claro de 5 a 8 cm de espesor sobre el área superficial del reactor, comportamiento normal en el proceso de lodos activados .

- ✓ En ocasiones pudo presentarse una mezcla fuerte dentro del reactor ocasionada por exceso de aire alimentado, el cual pudo provocar el rompimiento del floc biológico.

- ✓ El proceso mostró no ser sensible a la oscilación de cargas contaminantes.

- ✓ El control del oxigeno disuelto en el reactor a lo largo de la investigación se hizo mediante oximetro, ya que su medición por otros métodos no tiene

aplicación en este tipo de agua residual. La concentración de oxigeno encontrada fue apropiada para este sistema, en promedio de 2.6 mg O_2/L.

- ✓ Los difusores de aire utilizados para el abastecimiento de oxigeno y para lograr la mezcla completa dentro del reactor, estaban colocados sobre el fondo a 10 cm, lo cual permite que en la parte inferior de ellos se produzca acumulación de lodo. Lo ideal es que no existiera espacio entre los difusores de aire y el fondo del reactor.

- ✓ Durante el desarrollo de la investigación se presentaron algunos problemas operacionales tales como fugas en el reactor, interrupción en el suministro de aire y del lixiviado de alimento; los cuales no permitieron obtener una estabilidad prolongada en la operación del reactor de lodos activados y por lo tanto niveles de remoción superiores a los obtenidos.

- ✓ El reactor de lodos activados utilizado para la investigación presentó algunas dificultades de diseño principalmente en la zona de sedimentación, ya que el liquido clarificado entraba allí por la parte inferior del tabique y no por la parte superior como debería de ser, el lixiviado tratado debía recorrer toda la zona de sedimentación y ascender hasta el nivel en el que era evacuado del reactor.

- ✓ A pesar de las dificultades encontradas en el desarrollo del estudio de tratabilidad, el proceso de lodos activados presenta niveles de remoción que superan los obtenidos en la planta de tratamiento de lixiviado de carácter físico-químico que se opera actualmente en el relleno sanitario; principalmente en parámetros como DQO y DBO_5.

- ✓ Con los resultados obtenidos en el proceso biológico y los que se obtienen actualmente en la planta de tratamiento de lixiviados podría pensarse que si

el reactor de lodos activados recibiera el lixiviado ya tratado en la planta, el liquido efluente del reactor tomaría características favorables, los niveles de remoción aumentarían y podría obtenerse un proceso completo que cumpliría con los niveles de remoción exigidos por las leyes ambientales.

RECOMENDACIONES

- ✓ El estudio se debe realizar en un reactor de lodos activados que tenga mejores condiciones de diseño y operación.

- ✓ Los difusores de aire deben ser colocados en el fondo del reactor evitando formación de puntos muertos y mejorando la mezcla en la cuba de aireación.

- ✓ El control del oxigeno disuelto es un parámetro importante que se debe medir diariamente en un proceso aerobio como este.

- ✓ Se debe garantizar el suministro constante de aire y de lixiviado de alimento al reactor, ya que cada parada proporciona dificultades al proceso

- ✓ Existe una necesidad de implementar un tratamiento primario de filtración para un estudio posterior a nivel de laboratorio, en vista de los problema operacionales presentados por el taponamiento de los conductos de alimentación.

- ✓ Es necesario buscar alternativas de solución para disminuir la concentración de Nitrógeno Amoniacal y Metales Pesados que posiblemente son los causantes de inhibiciones en el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. BRUCE. E, Ritmann, PERRY L. M_C Carty. Biotecnología del medio ambiente, principios y aplicaciones. Editorial Mc Graw Hill. Sprint, 2001.

2. CÁRDENAS, Diana Constanza, Montaje y puesta en marcha de un sistema de lodos activados a nivel de laboratorio. Universidad nacional de Colombia, Manizales, 1995.

3. HERNÁNDEZ MUÑOZ, Aurelio. Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos. Depuración de aguas residuales. 3°ed. Madrid: Servicio de publicaciones de Ingenieros de caminos de Madrid, 1996.

4. HERRERA SEPÚLVEDA, Bibiana Maria, LADINO CASTAÑO, Lina Emperatriz. Mejoramiento del sistema de tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario La Esmeralda. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2001.

5. LÓPEZ CANO, Lorenza del pilar. Búsqueda y posible solución al problema de los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 1998.

6. MERCURI POSADA, Italo. Estudio de tratabilidad aerobio de las aguas efluentes del tratamiento anaerobio en la fabrica de café Liofilizado. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 1999.

1. METCALF & EDDY. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento vertido y reutilización. Editorial Mc Graw Hill. México, 1996.

2. ORTIZ ARCE, Jesús Mario. Sistemas de biomasa en suspensión para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 1998.

3. RAMALHO, Rubens S. Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté S.A. España, 1991

4. TCHOBANOSGLOUS, George y BURTON, Franklin L. MERCALF & EDDY, INC. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. 3° ed.: Editorial Mc Graw Hill./ interamericana de España, 1995.

5. Emac - Rellenos Sanitarios.htm

6. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

7. MORRIS Levin, MICHAEL a. Gealt. Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos. Editorial Mc Graw Hill. Mexico.

8. http://www.maps/small_topbar.GIF.map/maps/small_topbar.GIF.map

9. http://www.geocities.com/CapeCanaveral/lab/7839/lodo.html

10. http://www.cepis.ops-oms.org/enwww/eva2000/colombia/informe/inf-04.htm

11. http://www.tierramérica/noticias/modservicios.htm

12. http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/gtz/deslbasu/deslbasu.html#2.2

13. GLYNN & HEINKE, “ Environmental science and engineering”.

ANEXO A

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS EN EL ESTUDIO DE TRATABILIDAD PARA CADA CARGA ORGÁNICA

1. Finalizando la aclimatación del reactor

   Fecha: Febrero 12/2003

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA
pH	UNIDADES	8.25	8.64
TEMPERATURA	°C	22	19.4
COLOR *	NUC	1515	1670
TURBIDEZ *	NTU	810	2440
STT	mg / L	9250	28300
SST	mg / L	364	1380
SSV	mg / L	312	1150
SSF	mg / L	52	220
S. SEDIMENTABLES	ml / L /h	0.5	55
ACIDEZ	mg $CaCO_3$ / L	190	117.5
ALCALINIDAD	mg $CaCO_3$ / L	7560	6300
DQO	Mg O_2 / L	6890.72	2766.9

2. CARGA ORGÁNICA = 0.30 Kg DBO_5 /Kg SST*d

   Q = 0.5 ml / s

   Fecha: Marzo 3/2003

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.99	8.91	8.33	NA
TEMPERATURA	°C	23.4	20	19.7	NA
COLOR *	NUC	1305	1675	755	42.15
TURBIDEZ *	NTU	1170	1460	570	51.28
STT	mg / L	5368	7836	2836	47.17
SST	mg / L	1860	3280	780	58.06
SSV	mg / L	680	2040	340	50
SSF	mg / L	1210	570	440	63.64
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	1	40	<0.1	90
ACIDEZ	mg $CaCO_3$ / L	345	276	276	N.A
ALCALINIDAD	mg $CaCO_3$ / L	6148.8	4838	4838	N.A
DQO	mg O_2 / L	7333.3		2500	65.91
DBO	mg O_2 / L	4577		3380	26.15

3. CARGA ORGÁNICA = 0.48 Kg DBO_5 /Kg SST*d

   Q = 0.7 ml / s

   Fecha: Marzo 10/2003

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	8.18	8.79	8.35	NA
TEMPERATURA	°C	22.2	19	16.7	NA
COLOR *	NUC	2140		1040	51.40
TURBIDEZ *	NTU	1700		980	42.35
STT	mg / L	11740	15540	6280	46.51
SST	mg / L	1324	2550	820	38.07
SSV	mg / L	559	1935	439	31.84
SSF	mg / L	965	1615	381	60.52
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	5	20	<0.1	98
ACIDEZ	mg $CaCO_3$ / L	517.5		1035	NA
ALCALINIDAD	mg $CaCO_3$ / L	9072		5292	NA
DQO	mg O_2 / L	9375		3275	65.07
DBO	mg O_2 / L	4000		1900	52.57

4. CARGA ORGÁNICA = 0.65 Kg DBO_5 /Kg SST*d

   Q = 1.3 ml / s

   Fecha : Marzo 26/2003

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.98	8.39	8.67	NA
TEMPERATURA	°C	17.7	18.7	17.4	NA
COLOR *	NUC	1415		670	52.65
TURBIDEZ *	NTU	810		340	58.02
STT	mg / L	5442.66	9980	2740	49.66
SST	mg / L	1326	1020	793.33	40.17
SSV	mg / L	895	673.33	487.33	45.55
SSF	mg / L	431	346.67	306	29
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	2	20	<0.1	95
ACIDEZ	mg $CaCO_3$ / L	655.5	345	414	NA
ALCALINIDAD	mg $CaCO_3$ / L	7500	4250	3500	NA
DQO	mg O_2 / L	18125		11875	34.48
DBO	mg O_2 / L	3780		2180	42.32

5. CARGA ORGÁNICA = 1.10 Kg DBO_5 /Kg SST*d

   Q = 0.9 ml / s

   Fecha: Marzo 21/2003

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.96	8.58	8.56	NA
TEMPERATURA	°C	17.7	18.7	17.4	NA
COLOR *	NUC	1280		650	49.22
TURBIDEZ *	NTU	1070		380	64.49
STT	mg / L	3830	7500	2340	38.90
SST	mg / L	480	1010	200	58.33
SSV	mg / L	210	690	110	47.62
SSF	mg / L	270	320	90	66.67
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	3	20	<0.1	96.67
ACIDEZ	mg $CaCO_3$ / L	563.8		345	NA
ALCALINIDAD	mg $CaCO_3$ / L	8365		5897	NA
DQO	mg O_2 / L	7200		3600	50
DBO	mg O_2 / L	3184		597	81.25

6. CARGA ORGÁNICA = 1.23 Kg DBO_5 /Kg SST*d

   Q = 1.5 ml / s

   Fecha: Febrero 24/2003

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.99	8.08	8.37	NA
TEMPERATURA	°C	24.3	20	19.2	NA
COLOR *	NUC	1505	1675	780	48.17
TURBIDEZ *	NTU	1170	1460	620	47
STT	mg / L	11820	14230	8070	31.73
SST	mg / L	530	2380	350	33.96
SSV	mg / L	340	1840	210	38.24
SSF	mg / L	190	540	140	26.32
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	1	40	<0.1	90
ACIDEZ	mg $CaCO_3$ / L	138	276	276	NA
ALCALINIDAD	mg $CaCO_3$ / L	8568	5040	5040	NA
DQO	mg O_2 / L	7800		3800	51.28
DBO	mg O_2 / L	4060		1250	69.2

7. CARGA ORGÁNICA = 2.08 Kg DBO_5 /Kg SST*d

   Q = 1 ml / s

   Fecha: Febrero 17/2003

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	LIXIVIADO	LICOR MEZCLA	SALIDA	% REMOCIÓN
pH	UNIDADES	7.91	8.78	8.62	NA
TEMPERATURA	°C	22	18.3	17.6	NA
COLOR *	NUC	1515	1375	770	49.17
TURBIDEZ	NTU	860	1370	410	52.33
STT	mg / L	12250	16900	7100	42.04
SST	mg / L	564	2173	346.67	38.53
SSV	mg / L	362	1613.33	220	39.23
SSF	mg / L	202	260	126.67	37.29
SÓLIDOS SED.	ml / L /h	1	35	<0.1	90
ACIDEZ	mg $CaCO_3$ / L	172.5	345	345	NA
ALCALINIDAD	mg $CaCO_3$ / L	5040	6048	5191.2	NA
DQO	mg O_2 / L	19125		12250	35.95
DBO	mg O_2 / L	2980		2180	26.85

ANEXO B

VISTAS DEL SISTEMA DE INSTALACIÓN DEL REACTOR DE LODOS ACTIVADOS

1. Disposición general del montaje realizado para el desarrollo del trabajo experimental (tanque de alimentación, reactor y compresor.)

2. Disposición general del montaje realizado para el desarrollo del trabajo experimental (tanque de alimentación, reactor y tanque de recolección de lixiviado tratado.

3. Vista del vertedero ubicado a la entrada de la planta de tratamiento de lixiviados y desde el cual se tomo la alimentación al sistema de lodos activados.

4. Sistema de almacenamiento de lixiviado crudo para la alimentación al reactor de lodos activados. Se pueden observar las tuberías en PVC, (1) viene del vertedero y (2) sale al reactor de lodos activados.

5. Compresor utilizado para el suministro de aire al reactor de lodos activados.

6. Vista del reactor de lodos activados y del sistema de dosificación del lixiviado de alimento al reactor (control de caudal).

7. Difusores de aire empleados para la aireación del reactor de lodos activados