

PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR ANAEROBIO DE
FLUJO A PISTÓN PARA EL MANEJO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO
SANITARIO DE VILLAVICENCIO "DON JUANITO".

HAIBER FABIAN CUBILLOS ROA

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ. D.C
2006

PUESTA EN MARCHA Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR ANAEROBIO DE
FLUJO A PISTÓN PARA EL MANEJO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO
SANITARIO DE VILLAVICENCIO “DON JUANITO”.

HAIBER FABIAN CUBILLOS ROA

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero ambiental y sanitario

Director
ROBERTO RAFAEL BALDA AYALA
MsC. Ing sanitaria

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y SANITARIA
BOGOTÁ, D.C
2006

Nota de aceptación:

Decano

Director del proyecto

Jurado

Jurado

Este trabajo se lo dedico a mi mamá, ya que fue la responsable de este sueño hecho realidad. Por todo su amor, apoyo, por toda la confianza depositada en mi y sobre todo por haberme brindado las herramientas necesarias para poder llegar hasta donde hoy he llegado.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo gracias a Dios por haberme dado la oportunidad que muchos no tienen; la educación. Por todas las personas que me rodearon hasta hoy y porque con ellos compartí y termine una de las etapas mas importantes de mi vida.

A mi hermano Giovanni por los consejos oportunos, por haberme guiado en la elección de mi carrera universitaria, por ser mi amigo y por el ánimo aportado en toda mi carrera universitaria.

A mi papá porque aprendí de él a ser un buen ser humano, por enseñarme a querer la educación, por contar con su amistad y apoyo siempre.

A Lucho le doy las gracias por estar con mi mamá, por quererla, respetarla, cuidarla y por acompañarla ya que no pude estar cerca de ella en estos últimos 6 años.

A mi novia Lyda le doy gracias por ser mi motor para hacer las cosas bien, por ser mi inspiración, mi cómplice, mi primer amor y sueño cumplido. Gracias por la paciencia, por ser testigo y compañía en cada una de las etapas en las que realice este proyecto.

A mi siempre amigo el Pollo, el Ing *herr huhn*, por el apoyo constante durante todo el desarrollo del proyecto, por sus asesorías, por su compañía en las largas jornadas de laboratorio, trasnochos en el 501, y por todo el interés prestado en el proyecto.

Un sincero agradecimiento al Ingeniero Roberto Balda por la dirección del proyecto, por sus enseñanzas y su paciencia. Gracias por brindarme su amistad y por ser una excelente persona.

A Bioagrícola del Llano por haberme abierto las puertas para desarrollar mi práctica empresarial, por la colaboración y confianza depositada para desarrollar este proyecto. Agradezco a las Doctoras Alexandra y Carolina, a Paulo y a Nelvar, a todos gracias por haberme brindado su amistad, por ser muy buenos profesionales y por todo lo que aprendí de ellos.

Especial agradecimiento al Ingeniero Francisco Moreno, asesor de Bioagrícola Del Llano, por toda la colaboración prestada durante mi pasantía.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. DESCOMPOSICION DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN UN RELLENO SANITARIO	3
1.1 FASE HIDROLITICA	3
1.2 FASE FERMENTATIVA	3
1.3 FASE ACETOGENICA	4
1.4 FASE METANOGENICA	4
1.4.1 Bacterias metanogénicas hidrogenofílicas	4
1.4.2 Bacterias metanogénicas metanofílicas	5
2. LIXIVIADOS	6
2.1 PROCESO DE FORMACIÓN DEL LIXIVIADO	6
2.2 COMPOSICIÓN DEL LIXIVIADO	6
2.3 PROBLEMÁTICA PARA EL MANEJO DE LOS LIXIVIADOS	9

	Pág.
2.4 TRATAMIENTOS PARA EL MANEJO DE LIXIVIADOS	9
2.4.1 Recirculación de lixiviados	9
2.4.2 Evaporación de lixiviados	10
2.4.3 Tratamiento conjunto con las aguas residuales	10
2.4.4 Tratamiento biológico biomembrat	11
2.4.5 Tratamientos biológicos anaerobios	12
3. TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES	15
3.1 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO A PISTÓN (RAP)	15
3.2 MEDIOS DE SOPORTE FIJO	16
3.3 PUESTA EN MARCHA DE REACTORES ANAEROBIOS	18
3.3.1 Factores que inciden sobre el arranque de los reactores	18
3.3.1.1 Factores ambientales	18
3.3.1.2 Tipo de inculo	19
4. RELLENO SANITARIO DON JUANITO	20

	Pág.
5. LIXIVIADOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO DON JUANITO	21
5.1 REGIMEN DE LLUVIAS PRESENTADO SOBRE EL RELLENO SANITARIO	21
5.2 COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS DISPUESTOS EN EL RELLENO SANITARIO DON JUANITO	22
5.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN	24
5.4 INFILTRACIÓN DE AGUAS LLUVIAS	24
5.5 HUMEDAD DE LOS RESIDUOS	24
5.6 CUANTIFICACION DE LIXIVIADOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO DON JUANITO	25
5.7 CARACTERIZACION DE LOS LIXIVIADOS EN DON JUANITO	26
5.8 MANEJO Y TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO DON JUANITO	27
5.8.1 Recirculación	27
5.8.2 Planta de tratamiento	27

	Pág.
5.8.2.1 Tanque de homogeneización de caudales	28
5.8.2.2 Tanque 1 de sedimentación	28
5.8.2.3 Tanque 2 de sedimentación	28
5.8.2.4 Lecho de secado de lodos	28
5.8.3 Recirculación por aspersion	29
6. DESEMPEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	31
6.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO RECOMENDADO INICIALMENTE	31
6.1.1 Homogeneización	31
6.1.2 Trampa de grasas	32
6.1.3 Reactor biológico anaerobio	33
6.1.4 Tanque de paso	34
6.1.5 Sedimentador final	35
6.2 DIMENSIONES Y CAPACIDAD DE OPERACIÓN	

	Pág.
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	36
6.3 PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y CONTROL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO RECOMENDADA INICIALMENTE	36
6.3.1 Caudal de operación	36
6.3.2 Tiempo de retención	37
6.3.3 Carga hidráulica	37
6.3.4 Carga sobre el vertedero para el tanque 16B, sedimentador biológico	38
6.3.5 Carga volumétrica	38
6.3.6 Relación ácidos grasos volátiles / Alcalinidad	38
6.3.7 Eficiencia alcanzada por la planta	39
7. ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA EJECUCION DEL PRESENTE PROYECTO	40
7.1 SEGUIMIENTO EN LA FASE DE CONTRUCCIÓN	40
7.1.1 Construcción de pantalla en el sedimentador	42
7.1.2 Sistema de extracción de lodos	42

	Pág.
7.1.3 Adecuación de muros internos	43
7.2 SELECCIÓN DEL MEDIO DE SOPORTE BIOLÓGICO	44
7.2.1 Proceso de selección	45
7.2.2 Alternativas de selección	45
7.2.2.1 <i>Guadua Angustifolia</i> , alternativa N. 1	45
7.2.2.2 Roseta plástica de polipropileno, alternativa N. 2	46
7.2.2.3 Geotextil tejido, Alternativa N. 3	47
7.3 ALTERNATIVA SELECCIONADA	48
7.3.1 Área específica del geotextil tejido	49
7.3.2 Instalación del medio de soporte biológico	49
7.4 SELLAMIENTO CON GEOMEMBRANA	51
7.5 INOCULACIÓN	53
7.6 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO	57
7.6.1 Equipo seleccionado	57

	Pág.
7.6.2 Descripción del equipo de bombeo	57
7.6.3 Descripción del sistema implementado	58
8. DESEMPEÑO ACTUAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DON JUANITO	61
8.1 MEJORAS AL SISTEMA A TRAVÉS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL BOMBEO	61
8.1.1 Tiempo de retención	61
8.1.2 Carga hidráulica	61
8.1.3 Carga volumétrica	62
8.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL GEOTEXTIL TEJIDO	62
9. EVALUACIÓN DEL REACTOR	65
9.1 METODOLOGÍA DEL MONITOREO	65
9.2 CORROBORACION DE LOS CAUDALES DE LIXIVIADOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO	66
9.3 PRESENTACION DE RESULTADOS	67
9.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	69

	Pág.
9.4.1 Eficiencia de remoción de materia orgánica de la planta con base en la DQO	69
9.4.2 Remoción de sólidos suspendidos	70
9.4.3 Parámetros de control de operación	72
9.4.3.1 Relación ácidos grasos volátiles/alcalinidad	72
9.4.3.2 Ph	73
9.4.3.3 Temperatura	74
9.4.3.4 Nutrientes	75
9.4.4 Estimación de biogás producido por el reactor	76
9.4.5 Estimación de lodos producidos por el reactor	76
10. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS RELLENO SANITARIO DON JUANITO	77
10.1 ARRANQUE O PUESTA EN MARCHA	77
10.1.1 Proceso de inoculación	77
10.1.2 Operación del reactor en el arranque	78

	Pág.
10.2 REARRANQUE	78
10.3 PARÁMETROS DE CONTROL	78
10.4 OPERACIÓN DEL REACTOR	80
10.5 MANEJO DE PICOS ALTOS DE CAUDALES	81
10.6 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS	81
10.7 OPERACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO	82
10.7.1 Encendido de los equipos de bombeo	82
10.8 PLAN DE CONTINGENCIAS PARA LA OPERACIÓN DEL REACTOR	83
10.9 PLAN DE CONTINGENCIA PARA LOS EQUIPOS DE BOMBEO	85
10.10 MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO	85
10.11 MANTENIMIENTO DEL REACTOR	86
11. CONCLUSIONES	87
12. RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFIA	92
ANEXOS	94

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Características de los lixiviados según la edad del relleno Sanitario	8
Tabla 2 Ventajas y desventajas de los tratamientos para el manejo de Lixiviados	13
Tabla 3 Requerimientos y objetivos de un medio de soporte biológico	17
Tabla 4. Caracterización física de los residuos sólidos de la ciudad de Villavicencio	23
Tabla 5. Aforo de lixiviados generados en el relleno sanitario para Enero de 2005	25
Tabla 6. Características de los lixiviados generados en el Relleno Sanitario Don Juanito	26
Tabla 7. Dimensiones de la planta de tratamiento en la actualidad	36
Tabla 8. Relación ácidos grasos volátiles / alcalinidad encontrados en la planta original	39
Tabla 9. Volumen efectivo a ocupar por el medio de soporte biológico	45
Tabla 10. Comparación de los materiales en el proceso de selección del medio de soporte biológico.	48
Tabla 11. Aforo de lixiviados generados en el relleno sanitario Enero de 2006	66
Tabla 12. Primera caracterización 20 abril de 2006	68
Tabla 13. Segunda caracterización 12 de mayo de 2006	68
Tabla 14. Tercera caracterización 1 de junio de 2006	69
Tabla 15. Parámetros de control para el buen desempeño del reactor	80

Tabla 16. Problemas frecuentes de los equipos de bombeo

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de biodegradación de los residuos sólidos orgánicos	5
Figura 2. Nivel de precipitación – estaciones vecinas al relleno sanitario Don Juanito	22
Figura 3. Lixiviados generados en el relleno sanitario Don Juanito, tanque 14	25
Figura 4. Tanques de recirculación del lixiviado	27
Figura 5. Estructura original planta de tratamiento de lixiviados	29
Figura 6. Recirculación por aspersion	29
Figura 7. Manejo y tratamiento de los lixiviados en el Relleno Sanitario Don Juanito	30
Figura 8. Tanque de homogeneización	32
Figura. 9 Tanques 14 A Y 14B	33
Figura 10. Régimen de flujo a pistón tanques 14 A, 14 B y paso al reactor Biológico	33
Figura 11. Pantalla interna tanques 15A, 15B y flujo a pistón	34
Figura 12. Tanque 15C, de paso, al sedimentador final	35
Figura 13. Tanques 16A y 16B, sedimentador final	35
Figura 14. Sistema de bombeo original	37
Figura 15. Sedimentador original tanque 16B y sedimentador con nueva pantalla construida	41
Figura 16. Sistema construido para retirada de lodos, tanques 15Ay 15B	42

	Pág.
Figura 17. Tubería de extracción de lodos ubicadas dentro de las cámaras	43
Figura 18. Desempeño del sistema sin el tolvaje implementado	43
Figura 19. Adecuación de muros en concreto	44
Figura 20. Finalización adecuación de muros, vista interna del reactor	44
Figura 21. <i>Guadua Angustifolia</i>	46
Figura 22. Rosetas plásticas de polipropileno	47
Figura 23. Geotextil tejido 1050 PAVCO	48
Figura 24. Diseño para la instalación del geotextil tejido	50
Figura 25. Soportes para varillas antes y después de ser instalados en el tanque 15A	50
Figura 26. Protección de las varillas con pintura epóxica	51
Figura 27. Instalación del geotextil tejido y asegurado contra descolgamiento	51
Figura 28. Anclaje de la geomembrana a las paredes laterales de la planta	52
Figura 29. Instalación de geomembrana tanques 15A y 15B	52
Figura 30. Sellamiento total, tanques 15A y 15B (Reactor biológico)	52
Figura 31. Montaje para actividad metanogénica específica lodos reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP) Don Juanito.	53
Figura 32. Purga de lodos reactor; Colanta planta UHT	54
Figura 33 Montaje de actividad metanogénica específica lodos reactor Anaerobio de Colanta S.A.	55
Figura 34. Montaje en incubadora a 35°C. - lodos reactor anaerobio, Colanta	55
Figura 35. Canecas de 55 galones con lodo anaerobio de Colanta S.A.	56

	Pág.
Figura 36. Inoculación al tanque 14A (trampa-grasas)	56
Figura 37. Equipo seleccionado para la optimización del sistema de bombeo	58
Figura 38. Sistema implementado	59
Figura 39. Descarga de lixiviado proveniente del tanque 14 al reactor	59
Figura 40. Arrancadores directos	60
Figura 41. Recorte de geotextil tejido tanque 15A.	62
Figura 42. Laboratorio de Tinción de Gram para biomasa adherida al geotextil tejido	63
Figura 43. Análisis microscópico de la Tinción de Gram	63
Figura 44. Microorganismos identificados en el geotextil tejido (Medio de soporte biológico)	64
Figura 45. Análisis <i>in-situ</i>	65
Figura 46. Análisis físico-químico de laboratorio	66
Figura 47. Caudal de lixiviados generados en el relleno sanitario para los años 2005 y 2006	67
Figura 48. Comparación de eficiencias planta original y planta en la actualidad	70
Figura 49. Eficiencia obtenida por el reactor a diferentes concentraciones de DQO en el afluente	71
Figura 50. Comportamiento de los sólidos suspendidos para el reactor	72
Figura 51. Relación ácidos grasos volátiles Vs alcalinidad en el afluente y efluente del RAP	73
Figura 52. pH (Prueba <i>in-situ</i>)	74
Figura 53. Temperatura (Prueba <i>in-situ</i>)	75

	Pág.
Figura 54. Requerimientos nutricionales del sistema 2da caracterización	75
Figura 55. Descripción de los equipos de bombeo	81
Figura 56. Descripción de los Arrancadores directos del equipo de bombeo	82
Figura 57. Posición de Apertura y cierre de válvulas del sistema de bombeo	83

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Caudal manejado por la planta de tratamiento de lixiviados con el sistema de bombeo original	94
Anexo B. Tiempo de retención manejado por es sistema de tratamiento original	94
Anexo C. Carga hidráulica manejada por el sistema de tratamiento original	95
Anexo D. Carga sobre el vertedero para el tanque 16B, sedimentador biológico	95
Anexo E. Carga volumétrica manejada por el sistema de tratamiento original	96
Anexo F. Eficiencia alcanzada por el sistema de tratamiento original	97
Anexo G. Área específica del geotextil tejido introducido en los tanques 15A y 15B del reactor	97
Anexo H. Perdidas hidráulicas y caudal de operación para el sistema de bombeo implementado por el autor en el proceso de optimización al reactor	98
Anexo I. Carga hidráulica manejada por el reactor en la actualidad	99
Anexo J. Tiempo de retención manejado por el reactor en la actualidad	99
Anexo K. Carga volumétrica manejada por el reactor en la actualidad	100
Anexo L. Actividad metanogénica especifica lodos colanta planta UHT	100
Anexo M. Actividad metanogénica especifica lodos planta de tratamiento de lixiviados de Don Juanito	101
Anexo N. Metodología de laboratorio	103

	Pág.
Anexo Ñ. Preservación de muestras	103
Anexo O. Requerimientos nutricionales del sistema	104
Anexo P. Estimación de biogás producido por el reactor	105
Anexo Q. Estimación de lodos producidos por el reactor	106

LISTA DE PLANOS

Plano 1. Tanque 14 de homogeneización de caudales

Plano 2. Diseño de estructura de soporte para medio de soporte Biológico (Geotextil tejido)

Plano 3. Plano general planta de tratamiento de lixiviados, reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP)

GLOSARIO

ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECÍFICA (AME): capacidad de las bacterias metanogénicas para convertir un sustrato orgánico en metano y dióxido de carbono, a partir de cantidades conocidas de biomasa y de sustrato durante un periodo determinado.

AFLUENTE: liquido que ingresa en el proceso de tratamiento.

ÁREA DE DISPOSICIÓN: lugar diseñado geométricamente para contener un volumen estimado de residuos sólidos.

ÁREA ESPECÍFICA: esto es los metros cuadrados de superficie de medio de soporte biológico por metro cúbico de volumen total del mismo.

ASPERSORES: instrumentos para el riego del lixiviado sobre las áreas clausuradas por medio de orificios menores a 5 milímetros que permiten que el líquido sea evacuado en partículas muy pequeñas para facilitar la evaporación.

BIOFILTRACIÓN: la biofiltración es sin duda alguna la tecnología de tratamiento biológico de gas más utilizada. Esta caracterizada por el uso de un soporte orgánico compuesto por aserrín, *cosmpost*, entre otros materiales que proveen los nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos, transformando el soporte orgánico en un filtro biológicamente activo. al pasar el aire contaminado a través del lecho, los microorganismos presentes en la superficie del soporte degradan los contaminantes.

BIOGÁS: mezcla de gases, producto del proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica biodegradable de las basuras, cuyo contenido oscila entre un 65-70 % de metano, 25-30 % de CO_2 y pequeñas cantidades de oxígeno, nitrógeno, óxidos de carbono, hidrocarburos y ácido sulfhídrico.

BIOMASA: masa total de todos los organismos de un determinado tipo y/o en un área determinada.

COMPACTACIÓN: transformación de los materiales en una masa de textura apretada poco porosa. el índice de compactación que se maneja en un relleno sanitario hace referencia a la cantidad de residuos en peso, que ocupa un volumen determinado (kg/m^3).

CONDUCTO DE VENTEO O CHIMENEA: estructura de ventilación que permite la salida del biogás producidos por la descomposición de los residuos sólidos municipales. Esto no asegura una desgasificación completa en rellenos sanitarios.

DBO₅: demanda bioquímica de oxígeno; Corresponde a la cantidad de oxígeno requerida para degradar biológica y químicamente la materia orgánica (mg/l).

DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA: proceso que transforma la materia orgánica en elementos de más fácil procesamiento.

DIGESTIÓN ANAEROBIA (D/A): se denomina el proceso en virtud del cual la materia orgánica es convertida en metano, dióxido de carbono e hidrogeno, en ausencia de oxígeno y a causa de la acción combinada de diferentes poblaciones bacterianas.

DIQUE DE CONTENCIÓN: estructura civil perimetral en material arcilloso que sirve de soporte al área que contienen los residuos sólidos

DOMOS DE CLAUSURA: es la estructura que se conformó con los residuos en la parte superior del área colmatada entre los diques perimetrales.

EFICIENCIA: esta determinada por la remoción de contaminantes que presenta el proceso de tratamiento al final del mismo.

EFLUENTE: líquido que sale de un proceso de tratamiento.

GEOMEMBRANA: material de polietileno de alta densidad de diferentes calibres que se utiliza para la impermeabilización de un terreno.

GEOTEXTIL: material utilizado para la protección de la geomembrana.

INOCULACIÓN: proceso mediante el cual se utiliza lodo con una alta actividad metanogénica específica, proveniente de un reactor anaerobio, que maneja aguas de calidad similar, objeto de inoculación, para ser introducidos en otro reactor, con el fin de acelerar el proceso de arranque.

LIXIVIADO: líquido generado por la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos sólidos y por la precolación e infiltración de agua lluvia dentro del relleno sanitario o sitio de disposición final.

LODOS: el lodo es el producto final semisólido de la depuración de aguas residuales. La mayoría de las aguas residuales tratadas son urbanas o industriales. El fango procedente de las depuradoras de aguas residuales urbanas se denomina biosólido.

MATERIAL PÉTREO: es el material extraído de río con un tamaño mayor a dos pulgadas de diámetro para evitar que se introduzca por la tubería.

MEDIO DE SOPORTE BIOLÓGICO: es el relleno que se ubica dentro de la planta de tratamiento: de un material especial que permite la adherencia de los microorganismos para la conformación de una biopelícula.

METANOGENÉISIS: spone la conversión bacteriana de los compuestos intermedios en productos finales más simples, principalmente metano y dióxido de carbono.

MONITOREO: proceso por medio del cual se lleva a cabo el control de los factores que pueden determinar el comportamiento del sistema de tratamiento

PANTALLAS: se determinan como pantallas a los muros que se encuentra ubicados dentro de cada una de las estructuras con el fin de disipar a velocidad, incrementar la sedimentación y darle el sentido al flujo.

PERMEABILIDAD: capacidad de un material para permitir que un fluido lo atravesase sin alterar su estructura interna. se dice que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende del tipo de material, de la naturaleza del fluido, de la presión del fluido y de la temperatura.

PROCESO ANAEROBIO: proceso desarrollado en ausencia de oxígeno.

DQO: demanda química de oxígeno. Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica presente en el agua (mg/l).

RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS: sistema de pretratamiento que consiste en verter los lixiviados que han sido extraídos en el relleno sanitario sobre áreas con desechos dispuestos con el fin de homogenizar los compuestos presentes en los mismos, evitando así la generación de un vertimiento sin tratamiento.

RELLENO SANITARIO: técnica de disposición final para el manejo de los residuos sólidos, la cual esta diseñada, construida, operada y clausurada bajo optimas condiciones, reduciendo al mínimo los posibles riesgos de contaminación e impactos negativos al medio ambiente.

RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS Y COMERCIALES: excluyendo los residuos especiales y peligrosos. Consisten en residuos orgánicos e inorgánicos de zonas residenciales y de establecimientos comerciales. la fracción de residuos orgánicos esta formada por materiales como residuos de comida, tipo de papel, textiles, goma, cuero, cerámica, latas, plástico, aluminio. si los componentes

anteriormente mencionados no se separan cuando se desechan se conocen como su domésticos y comerciales no seleccionados.

ZONA CLAUSURADA: zona de disposición final que ha cumplido con la vida útil para cual fue diseñada y por lo tanto es impermeabilizada y cubierta con material vegetal de tal forma que sea un impacto positivo en el paisaje.

Tiempo de retención: El tiempo de retención se define como el tiempo que tarda una partícula en pasar del reactor desde la entrada hasta la salida del mismo.

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo principal evaluar el comportamiento de un reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP), para el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario Don Juanito de la ciudad de Villavicencio.

Para empezar se adquirió geotextil tejido como medio de soporte biológico, luego de un proceso de selección, pues cumplía con la mayoría de los requerimientos para este tipo de tratamiento.

Para llevar a cabo el proceso de inoculación del sistema, se adquirieron lodos del reactor anaerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales de Colanta S.A. Enseguida se optimizó el sistema de bombeo, con lo cual se aumentó el tiempo de retención y disminuyeron las cargas hidráulica y volumétrica en el reactor para procurar condiciones mas estables.

Luego se prosiguió con la evaluación del sistema, para lo cual se midió la eficiencia del reactor en términos de DQO; arrojando como resultado un incremento en la eficiencia del 11.32 % en tan solo un mes, después de arrancado el reactor. En cambio, para los Sólidos Suspendidos la eficiencia se vio afectada negativamente debido a sobrecargas de caudal ocasionadas por la operación de una segunda bomba y asociadas a la falta de un sistema de aliviadero de lixiviados para las épocas de altas precipitaciones.

De acuerdo a la eficiencia en cuanto a la DQO, se pudo evidenciar que se logra efectuar el proceso de metanogénesis por parte de los microorganismos, y que el geotextil tejido funciona satisfactoriamente como medio de soporte biológico probado también por la presencia de microorganismos hallados en el análisis microbiológico efectuado al geotextil tejido.

Palabras clave: RAP, lixiviado, medio de soporte biológico, inoculación, metanogénesis, DQO.

ABSTRACT

This project had as main objective to evaluate the development of a Plug Flow Anaerobic Reactor (PFAR) to treat leachate coming from Villaviencio's landfill "Don Juanito".

To start, a woven geotextile was acquired as a biological support media according to a selection process, because it fulfilled most of the requirements for this kind of treatments.

To carry out the inoculation process of the system, sludge was acquired from the anaerobic reactor of Colanta's wastewater treatment plant.

Following, an optimization of the pumping system was done, so that the retention time was increased and the hydraulic and volumetric loads reduced to give the reactor more stable conditions.

Afterwards, the evaluation continued measuring the efficiency with respect to COD giving back as result an increase in efficiency of around 11.32% just in one month after the start up of the reactor. But the efficiency for suspended solids was affected negatively because of the operation of a second pump that caused overflow and also by the absence of an excess device for the high precipitation season.

According to the COD efficiency results we can say that the methanogenic process is being done by microorganisms and that the woven geotextile has a good performance as a biological support media as proved by the microbiological analysis where those microorganisms were found in a geotextile sample.

Keywords: PFAR, Leachate, Biological support media, inoculation, methanogenesis, COD.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia del reactor biológico (RAP) de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Don Juanito, una vez implementado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un acompañamiento en la finalización de la construcción del reactor biológico para la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Don Juanito.
2. Evaluar el comportamiento del medio de soporte biológico propuesto por Bioagrícola del Llano S.A. para el reactor, en cuanto a su adherencia de biomasa y eficiencia en la remoción de la materia orgánica.
3. Verificar la eficiencia del reactor biológico mediante la determinación de DQO, y sólidos suspendidos tanto a la entrada como a la salida del mismo, así como el tiempo de retención dentro del reactor.
4. Elaborar el manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Don Juanito.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el manejo y tratamiento de los lixiviados generados en la disposición final de los residuos sólidos es un tema de gran importancia debido al elevado impacto que éstos generan al ser vertidos en las fuentes receptoras, lo que se evidencia en los diferentes tratamientos que se están implementando en los rellenos sanitarios del país.

El relleno sanitario de Don Juanito, de la ciudad de Villavicencio, cuenta con un sistema de tratamiento primario de lixiviados, el cual no garantiza una reducción considerable de la carga contaminante del mismo. Debido a esto se pretende implementar un sistema de tratamiento secundario que disminuya esta carga.

Este proyecto constituye una primera etapa en el proceso de optimización de la planta de lixiviados del relleno sanitario Don Juanito, ya que a partir de él se pueden proponer nuevas tecnologías de manejo de lixiviados, como lo es la implementación de humedales artificiales como tratamiento terciario, que podrán permitir un vertimiento con concentraciones de contaminantes menores, de tal forma que se logre cumplir con la normatividad ambiental vigente.

Los primeros estudios realizados para determinar las tecnologías más idóneas para el manejo y tratamiento de los lixiviados del Relleno Sanitario Don Juanito, fueron realizados por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de La Universidad De Los Andes¹; en el cual se estimó la cantidad de lixiviados generados durante la operación del relleno sanitario, a través del desarrollo de un modelo de producción de biogás y lixiviados. Además de esto, se determinaron las características de calidad de los mismos. Esta sección permitió identificar parcialmente el tipo de necesidades en términos de tratamiento que pueden llegar a requerir los lixiviados en cuestión.

Continuando con estos trabajos se realizó un estudio de prefactibilidad (costo/beneficio) de alternativas para la optimización de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Don Juanito² por parte de la ingeniera Nury Jaimes, egresada de la Universidad de la Salle, en el desarrollo de su pasantía. En este análisis de alternativas, se seleccionó un reactor anaerobio de flujo a Pistón (RAP) con medio plástico de alta área específica para mejorar la separación de gases y biomasa y propiciar una mezcla sin adherencia.

¹ Estudio De Alternativas Tecnológicas Para El Tratamiento De Los Lixiviados Generados En El Relleno Sanitario De Villavicencio

² JAIMES NURY Optimización De La Planta De Tratamiento De Lixiviados Del Relleno Sanitario De Villavicencio Don Juanito. 2004.

Para lograr esto, se valoraron varias clases de medios, según estudios realizados anteriormente, tomando como referencia las características de adherencia por parte de los microorganismos a los medios y su área de contacto.

Como ingeniero ambiental, el propósito de este proyecto es mejorar el estado de las fuentes hídricas receptoras de este efluente y por consiguiente, mejorar la calidad de vida de los habitantes, que viven en las inmediaciones de dichas fuentes.

Este proyecto tiene como objeto evaluar la eficiencia del reactor biológico (RAP) propuesto para la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Don Juanito, una vez implementado. Para llevar a cabo este objetivo se hizo necesario realizar un acompañamiento en la finalización de la construcción del reactor por medio del seguimiento en el momento de la construcción con el fin de cumplir las especificaciones técnicas del proyecto de optimización de la planta de tratamiento correspondiente.

Además de esto se evaluó el medio de soporte biológico que se instaló en el reactor, el cual fue propuesto por bioagrícola del Llano. En este proceso se realizó una asesoría a la empresa para hacer la selección del medio de acuerdo a las características técnicas que corresponden a los medios de soporte biológico encontrados en la literatura.

También se verificó la eficiencia del reactor mediante la determinación de parámetros tales como DQO, y sólidos suspendidos tanto para el afluente como para el efluente de la planta, así como el tiempo de retención óptimo para la operación del reactor.

Por último se elaboró el manual de operación y mantenimiento de la planta el cual establece los procedimientos que se deben seguir para hacer un correcto funcionamiento en el arranque de la planta y la estabilización del tratamiento mediante la medición y seguimiento de parámetros de control para operación normal y de emergencia de la planta.

Esta investigación tiene como resultado un gran avance en el estudio y aplicación de nuevas tecnologías en el tratamiento anaerobio aplicadas para aguas diferentes a las domésticas ya que nunca antes se habían tratado lixiviados procedentes de un relleno sanitario por medio de un reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP), así como tampoco el uso de geotextil tejido como medio de soporte biológico.

1. DESCOMPOSICION DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN UN RELLENO SANITARIO³

El proceso de degradación biológica de la materia orgánica se realiza principalmente por vía anaerobia, la cual se divide en dos etapas que constituyen el proceso general de la degradación: etapa hidrolítica y etapa fermentativa (fase acetogénica y fase metanogénica).

1.1 FASE HIDROLÍTICA

La etapa hidrolítica se inicia con la solubilización de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos en presencia de agua, por medio de enzimas que desdoblán a las largas y complejas cadenas de compuestos orgánicos tales como, proteínas, carbohidratos y grasas, a compuestos solubles como aminoácidos, azúcares simples, glicerol y ácidos grasos de cadena larga.

La etapa hidrolítica resulta indispensable para lograr la ruptura de los polímeros complejos a polímeros o monómeros debido a que los microorganismos de las próximas etapas solamente pueden asimilar materia orgánica disuelta. La velocidad de las reacciones depende del proceso de hidrólisis ya que hay que considerar si la materia orgánica se encuentra en condiciones ambientales favorables para llevar a la descomposición total. En estos casos, esta etapa resulta limitante y por lo tanto controla la velocidad del proceso.

1.2 FASE FERMENTATIVA

Las moléculas simples producidas en la etapa anterior experimentan ahora procesos de fermentación ácida; en el caso de los azúcares y aminoácidos sufren oxidación anaerobia como ocurre con los ácidos grasos de cadena larga. Los productos de esta etapa son ácidos volátiles como el acético, propiónico, butírico y valérico y ciertos ácidos orgánicos como lactosa y succinato. Alcoholes CO_2 y H_2 .

Las bacterias envueltas en este proceso obtienen la energía para el crecimiento de esas reacciones químicas y una porción de la materia orgánica es convertida en material celular. La etapa fermentativa es generalmente la más rápida de todo el proceso, desarrollando la degradación de los compuestos solubles o hidrolizables en dos fases a saber:

³ SAMUEL IGNACIO PINEDA M .Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Primera edición. Santa fe de Bogotá D.C: Panamericana formas e impresos, 1998. p 233

1.3 FASE ACETOGÉNICA

La materia orgánica compleja es biodegradada a materia orgánica simple, como ácido acético (CH_3COOH), propiónico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$), pirúvico (CH_3COCOOH) alcoholes y ácidos orgánicos simples.

Aquí actúan dos tipos diferentes de microorganismos que producen acetato: bacterias homoacetogénicas y bacterias acetogénicas. Durante esta fase se produce dióxido de carbono e hidrogeno y el nitrógeno disminuye considerablemente.

Las bacterias homoacetogénicas se caracterizan por la formación de azúcares y a partir de la fermentación de éstos en compuestos como el formiato y la mezcla gaseosa de H_2CO_3 . Las bacterias acetogénicas metabolizan los productos terminales de la etapa acidogénica, es decir, alcoholes, ácidos grasos volátiles y algunos componentes aromáticos que son convertidos en acetato, CO_2 e hidrogeno.

De esta forma, el metabolismo acetogénico se caracteriza por una absoluta dependencia de la eliminación de hidrogeno, por lo que es necesario una asociación con las bacterias consumidoras de hidrogeno, función que desarrollan las bacterias metanogénicas o sulforeductoras en presencia de sulfatos.

1.4 FASE METANOGÉNICA

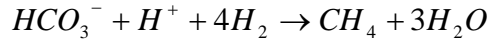
Esta etapa se realiza por un tipo de bacterias estrictamente anaerobios, responsables de la formación del metano a partir de acetato, H_2 más CO_2 y marginalmente de ácido fórmico.

Si se quiere asegurar la producción de metano es recomendable que existan elementos químicos tampón en el relleno sanitario que mantenga el medio neutro o ligeramente alcalino. Las bacterias metanogénicas trabajan con un pH neutro y son muy sensibles a los ambientes ácidos. Si esto se produce el pH del lixiviado será cercano a 7. Diversos autores señalan que aproximadamente un 70% del metano se procede de la descarboxilación del ácido acético.

Existen tres tipos de bacterias productoras de metano y se les puede clasificar de acuerdo al componente que utilizan para producirlo.

1.4.1 Bacterias metanogénicas hidrogenofílicas. Producen el metano de acuerdo a la reacción simplificada indicada a continuación. Su tiempo de duplicación es de unas 6 horas. Estas bacterias ejecutan una tarea doble: primero producen metano y segundo eliminan el hidrogeno gaseoso producido, por lo que se mantiene baja la presión de este elemento, lo que

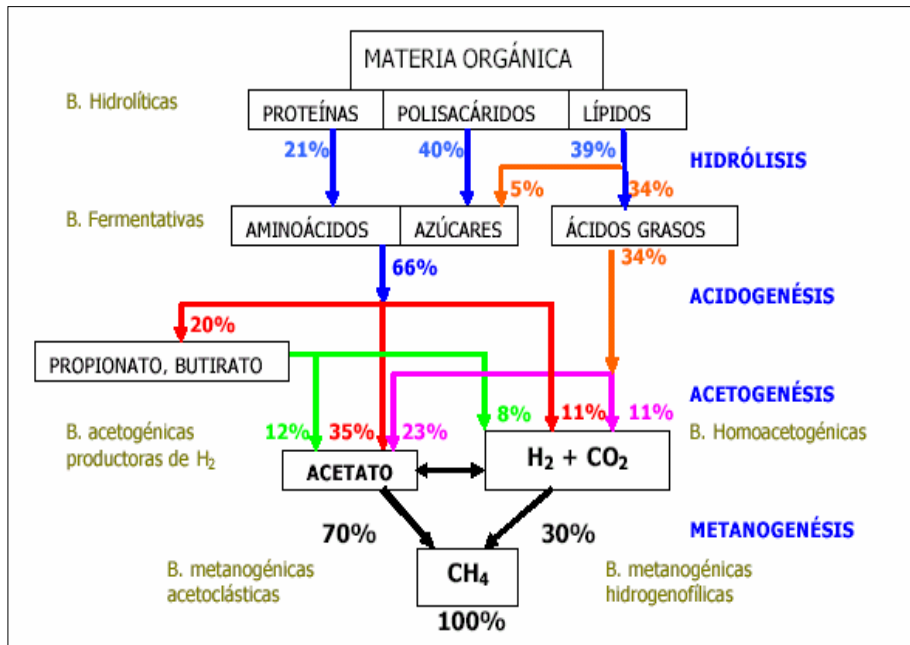
permite la existencia de condiciones termodinámicas favorables para las bacterias productoras de hidrogeno.



1.4.2 Bacterias metanogénicas metanofílicas. Estas bacterias utilizan etanol y metilamidas para producir metano. Su importancia en la producción de metano no es considerable en comparación con los dos anteriores tipos.

En la metanogénesis también actúan bacterias sulforeductoras (reducen sulfatos a sulfuros), las cuales pueden competir con los anteriores grupos por los substratos acetato e hidrogeno, impidiendo la formación de metano. Puede darse el caso que para el pH de lixiviado inferiores a 5.5 se produzca metano; esto obedece a la existencia de áreas que dependiendo de factores físicos y químicos forman ácidos, mientras otras áreas pueden tener un proceso metanogénico estable. La composición del gas generado en esta fase es usualmente 45% de metano y 40% de dióxido de carbono.

Figura 1. Proceso de biodegradación de los residuos sólidos orgánicos



Fuente: MADIGAN, M. Mertinko, J, y parker, J. Biology of Microorganisms. Prentice may. New Jersey, USA: 1997

2 LIXIVIADOS

Se puede definir el lixiviado como el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión.⁴

Cuando llueve una cierta cantidad de agua entra en el relleno sanitario debido a que una parte se pierde en la escorrentía superficial y evapotranspiración, el agua restante se filtra a través de los residuos en el relleno sanitario y es contaminada con diversos componentes orgánicos e inorgánicos. La generación del lixiviado ocurre cuando las características absorbentes de los residuos son excedidas, produciéndose la percolación.

Las características de los lixiviados esta íntimamente relacionada con la cantidad producida, de la naturaleza de los residuos y de la etapa de estabilización en que se encuentra variando de un relleno sanitario a otro y de la estación del año.⁵

2.1 PROCESO DE FORMACIÓN DEL LIXIVIADO

La cantidad de lixiviado producido por un relleno sanitario depende fundamentalmente de las precipitaciones registradas en la zona, de la humedad y composición de los residuos, al igual que de la capacidad de campo que alcance el relleno sanitario.

Una forma de estimar la cantidad de lixiviados que se van a producir es mediante un balance de aguas, es decir, la sumatoria de toda el agua que entra al relleno sanitario menos la que sale, será el volumen de lixiviado producido.⁶

Una segunda manera de estimar la cantidad de lixiviados producidos es mediante el aforo en la última caja recolectora de los mismos, siempre y cuando exista condiciones apropiadas de impermeabilización en el relleno que los genere.

2.2 COMPOSICIÓN DEL LIXIVIADO⁷

Al filtrarse el agua a través de los residuos sólidos en descomposición, se lixivian en solución materiales biológicos y constituyentes químicos. Hay que resaltar que la composición química de los lixiviados variará mucho según la antigüedad del

4 TCHOBANOGLIOUS GEORGE. Gestión integral de residuos sólidos. Madrid: Mc Graw Hill, 1994 p. 469.

5 PINEDA . Op cit., p 235.

6 TCHOBANOGLIOUS ,op cit.,p.23.

7 Ibid., p. 469-473.

relleno. En la tabla 1 se presentan las características para el lixiviado, dependiendo de la edad del relleno sanitario.

La composición química de los lixiviados variará mucho según la antigüedad del relleno sanitario y la historia previa al momento del muestreo.

Por ejemplo si se recoge una muestra de lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, el pH será bajo y las concentraciones de DBO_5 , COT, Y DQO, nutrientes y metales pesados serán altas. Por otro lado, si se recoge una muestra de los lixiviados durante la fase de fermentación del metano, el pH estará dentro del rango de 6.5 a 7.5 y los valores de concentración de DBO_5 , COT, DQO y de los nutrientes serán significativamente más bajos. Similarmente, serán más bajas las concentraciones de metales pesados porque la mayoría de los metales son menos solubles para valores de pH neutros.

El pH del lixiviado dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del CO_2 en el gas del relleno.

La biodegradabilidad del lixiviado variará con el tiempo. Se pueden supervisar los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado mediante el control de la relación DBO_5/DQO . Inicialmente, las relaciones estarán en el rango de 0.5 o más. Las relaciones en el rango de 0.4 a 0.6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los rellenos sanitarios antiguos, la relación DBO_5/DQO está a menudo en el rango de 0.05 a 0.2. La relación cae porque los lixiviados procedentes de rellenos antiguos normalmente contienen ácidos húmicos y fúlmicos, que no son fácilmente biodegradables.

Como resultado de la diversidad en las características del lixiviado, el diseño de los sistemas de tratamiento del lixiviado es complicado. Por ejemplo, una planta de tratamiento diseñada para tratar un lixiviado con las características presentadas por un relleno sanitario nuevo sería bastante diferente de una diseñada para tratar el lixiviado procedente de un relleno sanitario antiguo. El problema de interpretación de los resultados analíticos es todavía más complicado, por el hecho de que el lixiviado que esta generándose en un momento dado es una mezcla del lixiviado derivado de residuos sólidos de distintas edades.

Tabla 1. Características de los lixiviados según la edad del relleno sanitario.

CONSTITUYENTE	EDAD DEL RELLENO SANITARIO		
	MENOS DE 10 AÑOS		MAYOR DE 10 AÑOS
	Rango(mg/l)	Típico(mg/l)	
DBO	2.000 - 30.000	10.000	100 - 200
COT	1.500 - 20.000	6.000	80 - 160
DQO	3.000 - 60.000	18.000	100 - 500
Total de sólidos en suspensión	200 - 2.000	500	100 - 400
Nitrógeno Orgánico	10 - 800	200	80 - 120
Nitrógeno Amoniacal	10 - 800	200	20 - 40
Nitrato	5 - 40	25	5-10
Total fósforo	5 - 100	30	5 - 10
Ortofosfato	4 - 80	20	4 - 8
Alcalinidad como CaCO ₃	1.000 - 10.000	3.000	200 - 1.000
PH	4.5 - 7.5	6	6.6 - 7.5
Dureza total como CaCO ₃	300 - 10.000	3.500	200 - 500
Calcio	200 - 3.000	1.000	100 - 400
Magnesio	50 - 1.500	250	50 - 200
Potasio	200 - 1.000	300	50 - 400
Sodio	200 - 2.500	500	100 - 200
Cloro	200 - 3.000	500	100 - 400
Sulfatos	50 - 1.000	300	20 - 50
Total Hierro	50 - 1.200	60	20 - 200

Fuente: Tchobanoglous et al. "Gestión Integral de Residuos Sólidos",2002.

2.3 PROBLEMÁTICA PARA EL MANEJO DE LOS LIXIVIADOS⁸

La variabilidad en cuanto a la cantidad y la calidad del lixiviado de un lugar a otro, en cada relleno a medida que las estaciones cambian y el relleno envejece, hace del tratamiento del lixiviado un problema mucho más difícil que el tratamiento de aguas residuales municipales.

Existe una gran variedad de razones por las que el tratamiento de lixiviados, es mucho más complicado que el tratamiento de aguas residuales urbanas; entre otras razones podemos mencionar las siguientes:

- Los lixiviados presentan valores de DQO hasta 200 veces mayores, que los correspondientes a las residuales urbanas.
- La eficacia de los tratamientos biológicos y otros procesos físicos favorables, tales como, la evaporación, se ven reducidos por las temperaturas bajas de invierno, precisamente cuando la producción de lixiviados es mayor.
- Cuando se tratan los lixiviados de un relleno sanitario joven, la eficiencia del tratamiento va disminuyendo a medida que el relleno sanitario envejece.
- El diseño de un método general para el tratamiento de lixiviados, se ve impedido por su gran variabilidad, ya que técnicas que se han desarrollado en un determinado lugar, con cierto éxito no sean aplicables en otro.

2.4 TRATAMIENTOS PARA EL MANEJO DE LIXIVIADOS⁹

A través del tiempo el manejo de lixiviados ha sido un tema que la gente ha querido evitar debido a la presencia de altas cargas contaminantes que se presentan en ellos y la tendencia principal ha sido la de recircularlos, pues en realidad viene a ser la técnica más fácil, pero no la más viable.

A continuación se presentan diferentes técnicas de tratamiento para los lixiviados y al final se resumen sus ventajas y desventajas. (Ver tabla 2.)

2.4.1 Recirculación de lixiviados. Un método efectivo para el tratamiento de lixiviados consiste en recogerlos y recircularlos a través del relleno sanitario. Durante las primeras etapas del funcionamiento del relleno sanitario, el lixiviado contendrá cantidades importantes de STD^Y , DBO_5 , DQO, nutrientes y metales pesados. Cuando se recircula el lixiviado se atenúan y diluyen los compuestos producidos por la actividad biológica, y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del relleno sanitario. Por ejemplo, los ácidos orgánicos sencillos presentes en el lixiviado se convertirán en CH_4 y CO_2 . Por el incremento

⁸ J.GLINN HENRY GARY W. HEINKE. Ingeniería ambiental. México: Prentice Hall, 1999. p.607

⁹ PINEDA M, Op cit., p 240-429

^Y Sólidos disueltos totales.

del valor del pH dentro del relleno sanitario cuando se produce CH_4 , los metales se precipitan y serán retenidos dentro del relleno sanitario.

Un beneficio extra de los lixiviados es la recuperación del gas del relleno sanitario que contiene CH_4 ; de hecho, la tasa de producción de gas es mayor en sistemas para la recirculación de lixiviado. Para evitar la emisión incontrolada de gases mientras se recicla el lixiviado para su tratamiento, se debe equipar el relleno con un sistema para la recuperación del gas.

La recirculación, supone el uso del relleno sanitario como un filtro anaerobio para el tratamiento de los lixiviados. Además del contenido del agua, es necesario el control del pH, el cual debe mantenerse próximo a la neutralidad, ya que una variación del mismo originaría una caída de la actividad microbiana y por tanto una disminución del tiempo para la estabilización biológica. Otro factor que debe tenerse en cuenta, es la hidrología del relleno sanitario, debiéndose realizar medidas para asegurar una distribución uniforme del lixiviado recirculado y prevenir la formación de canales preferenciales a través de los residuos.

El lagunaje con recirculación también suele ser utilizado y consiste en tener una laguna anaerobia capaz de procesar $0.3 \text{ Kg de DBO/m}^2$. El volumen de recirculación se determina en función de las condiciones de mezcla, al fin de alcanzar una degradación óptima. Se utilizan tres o cuatro lagunas facultativas que actúan como reguladores de las fluctuaciones estacionales en la producción de lixiviados. Con este método se han alcanzado reducciones de hasta un 90% en DBO y un 95% en coliformes.

2.4.2 Evaporación de lixiviados. Uno de los sistemas más sencillos para la gestión de lixiviados implica el uso de estanques recubiertos para la evaporación de lixiviados. El lixiviado que no se evapora se riega de las porciones del relleno sanitario. En lugares lluviosos la instalación para el almacenamiento de lixiviados se cubre durante el invierno con una geomembrana para excluir las aguas lluvias. Se evacua el lixiviado acumulado mediante evaporación durante los meses calidos del verano, destapando la instalación de almacenamiento y regando el lixiviado sobre la superficie del relleno sanitario en activo. Los gases olorosos que puedan acumularse bajo la capa superficial se pueden extraer hacia un filtro de compost o suelo. Si el estanque no es grande se puede dejar tapado durante todo el año. Otro ejemplo implica el tratamiento del lixiviado (por lo general biológicamente) con el almacenamiento invernal y evacuación por riego sobre terrenos cercanos durante el verano.

2.4.3 Tratamiento conjunto con las aguas residuales. El tratamiento consiste en evacuar el lixiviado por la red de alcantarillado o transportarlo en caminos hasta la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), si las normas municipales los permiten, en este sentido abría que destacar las dificultades en la

explotación de las conducciones de alcantarillado, ya que en función de la distancia, se podría producir sedimentaciones, posibles obstrucciones y producción de gas.

Una ventaja de este tratamiento conjunto consiste en que al contener los lixiviados normalmente un exceso de nitrógeno, y las aguas residuales un exceso de fósforo del que generalmente son deficitarios los primeros. Ninguno de estos dos elementos necesita ser suministrado en la planta de tratamiento.

Una de las dificultades que puede esperarse son las altas concentraciones de componentes orgánicos e inorgánicos aportados por el lixiviado. Solamente cuando los lixiviados constituyen menos del 5% del total del agua residual a tratar en la planta y el contenido de DQO es menor que 100 mg/l el tratamiento conjunto es aceptable. De cualquier manera, el lixiviado podría ser diluido antes de ser descargado para el proceso en la planta de tratamiento y el tiempo de retención del agua residual podría aumentarse (Boyle Y Ham, 1974).

Otros problemas que pueden presentarse consiste en la corrosión, reducción de la sedimentabilidad del lodo y problemas operacionales en la planta debido a la precipitación de óxidos de hierro (Cossu, 1982). Además, la alta concentración de metales puede inhibir la actividad biológica del lodo y reducir o eliminar la posibilidad de su posterior aplicación como fertilizante (Bekkers y Kasper, 1981).

La consecuencia general de la adición de altas cantidades de lixiviado al agua residual, es la descarga final de una afluyente poco clarificado y con altas concentraciones de NH_3 .

2.4.4 Proceso Biológico Biomembrat. El proceso biológico biomembrat es un método patentado por "WEHRLE WERKAG"

Para el tratamiento de lixiviados y aguas altamente contaminadas; se caracteriza por la activación biológica bajo presión con retención total de la biomasa en el sistema.

En el proceso Biomembrat se realiza la digestión de la materia orgánica en reactores anóxicos y aeróbicos bajo presión. El lixiviado entra en el proceso de los reactores de desnitrificación y nitrificación en los cuales se transforma la materia orgánica de los microorganismos. La separación entre el agua regeneradora y la masa biológica se realiza por medio de una ultrafiltración, consiguiéndose una retención total de la biomasa. El oxígeno necesario en el reactor aerobio de nitrificación se aporta mediante aire comprimido. La misión de compresor es doble: suprimir las necesidades de oxígeno y mantener una presión de operación constante en el proceso.

Los lixiviados son introducidos en el reactor anóxico desnitrificación en el cual el nitrato aportado por el reactor aeróbico de nitrificación se transforma microbacteriológicamente en nitrógeno molecular.

Le desnitrificación tiene lugar cuando desaparecen las últimas trazas de oxígeno disuelto y las bacterias heterófitas, anaerobias respiran el oxígeno combinado en nitritos y nitratos, liberando moléculas de nitrógeno.

La nitrificación tiene lugar en el reactor aerobio. El nitrógeno orgánico y amoniacal se oxida transformándose en nitrito por acción de bacterias nitrosomas y posteriormente, éste se transforma en nitrato por acción de bacterias nitrobacter. Ambas son bacterias autótrofas muy especializadas con una tasa de crecimiento menos que las bacterias heterógrafas (responsables de la degradación de la materia orgánica), y por lo tanto necesitan más tiempo para desarrollarse.

La separación entre biomasa y líquido depurado se realiza por filtración con membranas en un equipo de ultrafiltración consiguiéndose una filtración total de la biomasa y una retención casi total de las impurezas no solubles hasta tamaños de partículas del orden de $0.01 \mu\text{m}$ teniendo edades del lodo superiores a 30 días, triplicando el tiempo de actuación de los microorganismos respecto a procesos de lodos activados.

Los lodos se bombean desde los reactores biológicos a los módulos de ultrafiltración a una velocidad tal que se evita la formación de capa sucia sobre la superficie de los módulos. Los lodos concentrados retenidos, se recirculan continuamente al reactor, disponiéndose en el toda la biomasa.

El permeado se recoge en un depósito desde donde el que puede ser circulado al proceso y evacuado al exterior.

2.4.5. Tratamientos biológicos anaerobios. Los tratamientos anaerobios son ampliamente utilizados en el tratamiento de lixiviados; esto se debe a que soportan muy bien las sobrecargas puntuales de contaminación que arrastra el lixiviado. En los procesos anaerobios la materia orgánica es convertida en biogás, una mezcla que contiene principalmente CO_2 y CH_4 y en menor medida lodos biológicos.

Un importante hecho derivado del tratamiento anaerobio es la posibilidad de usar el metano producido para calentar el digestor, ya que usualmente trabaja a 35°C , o bien bajo condiciones favorables usarlo para otros propósitos externos.

Ha sido probado en digestores de tipo UASB a escala de laboratorio y en una planta piloto, obteniendo buenos porcentajes de eliminación para metales

pesados, especialmente Zinc, resultando el proceso económicamente rentable desde concentraciones de 7 g/L de DQO en el lixiviado.

Una desventaja para la utilización de este tipo de reactores en el tratamiento de lixiviados, es que no resulta eficaz para lixiviados procedentes de rellenos sanitarios maduros; reportándose altos porcentajes de eliminación solo para lixiviados de rellenos sanitarios jóvenes e intermedios.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los tratamientos para el manejo de lixiviados

TRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Recirculación	<ul style="list-style-type: none"> • Los metales son precipitados y retenidos dentro del relleno sanitario • Recuperación del gas del relleno sanitario • Usa los residuos sólidos dispuestos como filtro. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene una mayor producción de biogás. • Deben realizarse medidas para asegurar la distribución del lixiviado recirculado. • Debe controlarse permanentemente el pH, para no afectar la actividad microbiana.
Evaporación	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de fácil implementación. • Especial para evacuar grandes cantidades de lixiviados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se presentan malos olores por los gases de la evaporación. • Presentan problemas de mezclas de los lixiviados con aguas lluvias.
Conjunto con aguas residuales	<ul style="list-style-type: none"> • No necesita adición de nutrientes en la planta de tratamiento de aguas residuales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Evidencia sedimentaciones, obstrucciones y gas en los conductos hacia la planta de tratamiento. • El efluente contiene altas concentraciones de componentes orgánicos e inorgánicos, así como altas concentraciones de NH₃.
Biomembrat	<ul style="list-style-type: none"> • Usado con lixiviados altamente contaminados. • Posibilidad de combinación con otros tratamientos. • Aumento de solubilidad del oxígeno • Ahorro de espacio 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos elevados de instalación • Necesidad de un tratamiento de apoyo como carbón activado, o nano filtración.

TRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p style="text-align: center;">Biológico anaerobio</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa baja de síntesis celular y por consiguiente poca producción de lodo. • El lodo producido es estable y puede secarse y disponerse por métodos convencionales. • No requiere oxígeno, por tanto usa poca energía eléctrica. • Es adaptable a aguas residuales tanto de alta como de baja concentración orgánica. • Produce metano, el cual puede ser útil como energético. • Tiene requerimientos nutricionales bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para obtener grados altos de remoción requiere temperaturas altas. • Existe gran cantidad de tóxicos e inhibidores del proceso que pueden hacerlo no viable para determinados sustratos. • Generación de olores ofensivos por la producción de H₂S, ácidos grasos y amidas. • Exige un intervalo de operación de pH bastante restringido. • Es sensible a la contaminación con oxígeno. • No resulta eficaz para lixiviados procedentes de rellenos sanitarios maduros.

Fuente: El autor, 2006.

3. TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES

En los procesos anaerobios la digestión de la materia orgánica soluble se lleva a cabo por vía biológica, los microorganismos utilizan la materia orgánica como fuente de energía y carbono, y generan CH₄ y CO₂.

La utilización de reactores anaerobios para el tratamiento de aguas residuales ha crecido desde 1982 orientándose principalmente al tratamiento de aguas residuales agroindustriales. La importancia económica de este sector, la susceptibilidad de estos efluentes al tratamiento anaerobio y las condiciones de temperatura de los países del trópico han favorecido la operación de este tipo de reactores.

Se conocen aproximadamente 396 reactores anaerobios para América Latina, de ellos el 82% corresponden a reactores UASB, 14% a filtros anaerobios y el 4 % a los sistemas señalados como híbridos.

Se calcula que en Colombia existen más de 80 reactores anaerobios los cuales tratan un caudal aproximado de 855 L/seg. Estas instalaciones se utilizan para el tratamiento de efluentes de procesos industriales, agroindustriales, y aguas residuales domésticas.¹⁰

Los rellenos sanitarios del país cuentan con diversos tratamientos para el manejo de los lixiviados, entre estos tenemos: en el relleno sanitario de Popayán¹¹ existen filtros y lagunas anaerobias, en Barranquilla se usan pozos de recolección, en puerto Boyacá se recircula el lixiviado sobre el área de disposición final, en Pereira se están implementando técnicas de fitoremediación por medio de humedales artificiales, en la Dorada utilizan un sistema de lagunaje; una para sedimentación, otra laguna para aplicación de floculante y una mas para hacer la evaporación del lixiviado¹² y Villavicencio contaba con un sistema de recirculación y aspersion antes del inicio del presente proyecto.

3.1 REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO A PISTÓN (RAP)

Es un sistema de tratamiento de aguas residuales con una configuración similar a la de un filtro anaerobio ya que el agua pasa a través de un medio sólido o lecho filtrante sobre el cual se adhiere una biopelícula formada por una comunidad microbiana anaerobia.

10 DIAZ-BAEZ MARIA CONSUELO. Digestión anaerobia. Colombia: Unibiblos, 2002. p. 17-19

11 http://popayan.gov.co/apc-afiles/relleno_sanitario.doc

12 Información suministrada por funcionarios del Relleno Regional Doña Juana de la Dorada(Caldas).

La principal característica de este sistema esta dada por el flujo a pistón que se presenta debido a que la remoción de la materia orgánica se realiza progresivamente a medida que las aguas residuales pasan por cada una de las etapas, definidas por secciones o cámaras separadas por pantallas al interior del reactor y que acentúan el efecto de sedimentación en cada una de ellas. Además de esto, el régimen de flujo a pistón favorece el contacto del agua residual con la biomasa aumentando la eficiencia del tratamiento.

Debido a que la biomasa se encuentra adherida al medio de soporte, ésta no es arrastrada y permite operar esta clase de reactores con menores tiempos de retención hidráulico sin disminuir el tiempo de retención celular. Cabe anotar que este tipo de reactores tiende a presentar problemas de colmatación cuando se encuentran grandes cantidades de sólidos suspendidos y no se cuenta con un buen sistema de pretratamiento.

Estos sistemas han sido probados en lugares con climas fríos como el de la sabana de Bogota; sin embargo es importante resaltar que definitivamente las bondades de estos sistemas radican principalmente en el medio de contacto que se utilice ya que se ha probado que a mayor área superficial específica del medio, mayor es la eficiencia de remoción del sistema¹³, así como se discutirá mas adelante.

Una ventaja muy importante es que esta tecnología no requiere estructuras complejas para su construcción, lo que lo hace de fácil implementación y mantenimiento, comparado con otros tratamientos como los aerobios.

3.2 MEDIOS DE SOPORTE FIJO

Los medios de soporte tienen un papel de gran importancia en el tratamiento biológico de aguas residuales bien sea de tipo aerobio o anaerobio; su función es la de proveer de un lugar donde asirse a las comunidades de microorganismos que llevaran a cabo la digestión de la carga orgánica presente en el agua residual. Una de las principales funciones del medio de soporte biológico es mantener un mayor contacto del sustrato (agua residual) y la biomasa inmersa dentro del reactor.

Estos medios deben cumplir con una serie de condiciones básicas que aseguren su correcto funcionamiento sin que interfieran en el desarrollo de la biopelícula; debe ser química y biológicamente inerte a fin de evitar la desviación de la acción microbiana sobre el residuo.

13 MENDEZ y RODRIGUEZ. Análisis comparativo entre medios de soporte fijo de plástico, grava y guadua, en reactores anaerobios de flujo a pistón para el tratamiento de aguas residuales domesticas. En tesis de grado para optar el título de Ingenieros ambientales y sanitarios, Universidad de La Salle, 2004.

La característica más importante que debe tener un buen medio de soporte biológico es el área de específica, esto es los metros cuadrados de superficie de medio por metro cúbico de volumen total del mismo.

Para que un medio de soporte biológico tenga buenos resultados y pueda alcanzar los objetivos esperados debe cumplir con una serie de condiciones que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Requerimientos y objetivos de un medio de soporte biológico.

REQUERIMIENTO	OBJETIVO
Poseer elevada porosidad y área superficial	Permitir la adherencia de microorganismos y reducir la posibilidad de colmatación.
Ser estructuralmente resistente	Evitar su desintegración y soportar el propio peso, adicionado al peso de los sólidos biológicos adheridos a su superficie.
Ser biológica y químicamente inerte	Evitar la reacción entre el lecho y los microorganismos
Ser suficientemente liviano	Evitar la necesidad de estructuras complejas, así como permitir la construcción de unidades de tratamiento de mayor altura para reducir áreas de tratamiento.
Permitir la rápida proliferación de microorganismos	Disminuir el tiempo de arranque del reactor
No presentar superficie lisa	Garantizar la porosidad y fácil adhesión de la película biológica.
Precio reducido	Viabilizar económicamente el proceso
Presentar espacios entre las superficies adyacentes	Permitir el crecimiento de la película sin bloquear los intersticios.

Fuente: MENDEZ y RODRIGUEZ, 2004.

En cuanto a medio de soporte existe una gran variedad de opciones que van desde medios artificiales con relación área-volumen muy alta, hasta alternativas mucho más económicas y de fácil acceso como son la guadua e incluso recortes de embalajes plásticos para botellas (canastas de gaseosa).

Existen dos formas de disponer los medios dentro del reactor, una al azar que presenta mayor área específica debido a su tamaño y otra ordenada, que es de menor área específica de manera que se tenga una buena distribución del fluido sobre el medio. Cabe anotar que la forma de disponer el medio depende del criterio del diseñador y/o del constructor considerando aspectos como: eficiencia, facilidad de instalación, costos del medio, entre otros.

3.3 PUESTA EN MARCHA DE REACTORES ANAEROBIOS¹⁴

Se denomina puesta en marcha, al periodo de tiempo durante el cual la biomasa anaerobia se adapta a la cantidad y calidad de las aguas residuales que debe tratar. Es una etapa inestable y critica cuya duración puede oscilar entre un mes y un año o más, dependiendo del inoculo, las características del agua residual y de la estrategia de arranque utilizada.

La duración de la etapa de arranque está definida por el periodo de tiempo necesario para obtener una calidad constante del efluente y una masa de lodo que no varíe cualitativamente con el tiempo.

La mayoría de los autores identifican el final del proceso de arranque en lo que respecta a la biomasa, con la aparición del fenómeno de granulación y/o la formación de biopelícula estable.

Se han podido definir tres etapas en el proceso de arranque de las unidades anaerobias:

- Adaptación primaria y crecimiento de bacterias degradadoras de los ácidos acético y propiónico.
- Formación de una biomasa anaerobia metanogénica activa.
- Formación de un lodo granular, si las condiciones del sustrato lo permiten

3.3.1 Factores que inciden sobre el arranque de los reactores. El arranque y operación de un reactor son procesos complejos que involucran simultáneamente los siguientes factores:

3.3.1.1 Factores ambientales. Entre los factores ambientales que afectan la operación de un reactor anaerobio se encuentran, la temperatura de operación, los nutrientes disponibles, el pH, la relación alcalinidad/ácidos grasos volátiles (AGV) entre otros.

- **Temperatura.** La mayoría de los reactores anaerobios operan entre 30-35°C, porque la formación de metano a 20°C es baja. El aumento de la temperatura permite incrementar la producción de metano, comparativamente, los reactores que son operados en el intervalo termófilo (55-60°C) muestran el doble de la producción de metano que a 35°C, lo cual disminuye el tiempo de retención y volumen de reactor.

- **Nutrientes.** Los requerimientos nutricionales de las bacterias durante el proceso de degradación anaerobia son bajos; la mayoría de las aguas residuales

¹⁴ DIAZ, Op.cit., p.89-95.

no presentan tal deficiencia. Se espera que el reactor en estudio presente buenas condiciones nutricionales. Vale la pena mencionar que este valor tiene generalmente una relación con la DQO. Este valor es para microorganismos anaerobios, por el orden de los 350:5:1; es decir, por cada 350 partes (o kg/d), por ejemplo) de DQO, debe haber 5 partes (o Kg/d) de N y 1 parte (o kg/d) de P. Adicionalmente, la adición de nitrógeno y fósforo incrementa la eficiencia del proceso por los requerimientos nutricionales de todo ser vivo.

- **pH.** El reactor debe operar en un intervalo de pH entre 6.8-7.5, porque la actividad de la población metanogénica es altamente vulnerable a los cambios de pH comparada con las demás poblaciones presentes en el lodo.
- **Relación ácidos grasos volátiles / alcalinidad.** La relación AGV/alcalinidad es un parámetro de utilidad para controlar la acumulación de AGV en reactores anaerobios: un valor de 0.2 indica una excelente capacidad buffer del sistema, con un máximo valor de 0.4. Así, esta relación es utilizada como un indicador temprano de acidificación y de esta manera se puede controlar.

3.3.1.2 Tipo de inóculo. El tiempo para que el arranque del reactor sea corto, se hace mediante el proceso de inoculación, este inóculo debe tener una alta actividad metanogénica específica, medida por y estar adaptado a los sustratos presentes en el agua residual.

En países donde la tecnología anaerobia es ampliamente utilizada (Europa, USA, China), la consecución de lodos como inóculos para las plantas de tratamiento normalmente se realiza a partir de otros reactores o éstos son suministrados por compañías privadas; sin embargo, en los países de América Latina que han venido utilizando esta tecnología, la consecución de lodos como inóculos no es una labor fácil, ya que no existen suficientes reactores anaerobios que suministren inóculos de calidad.

La actividad metanogénica es una característica que indica la capacidad de la biomasa para transformar la materia orgánica en metano; se define como la masa de sustrato en forma de DQO que es convertida a metano por unidad de biomasa y por unidad de tiempo, lo cual se expresa con las siguientes unidades: gDQO/gSSVdía. Los valores recomendados para que un lodo tenga una buena actividad metanogénica y puedan servir como inóculo oscilan entre 0.2-1.0 gDQO/SSVdía.

4. RELLENO SANITARIO DON JUANITO

El relleno sanitario Don Juanito se encuentra ubicado en la ciudad de Villavicencio departamento del Meta a 7 Km. del área urbana y a 2 Km. de un área suburbana llamada Kirpas. Don Juanito se localiza entre las coordenadas 948.270 a 947.700 Norte y 1.056.850 a 1.056.550 Este, a una altura de 467 m.s.n.m., con una temperatura media de 28 °C y precipitación media anual de 4059 mm/año.

Corresponde geográficamente a una zona de alta escorrentía, con una topografía plana en su mayor extensión, que no permite elaborar rellenos sanitarios convencionales.

El relleno sanitario Don Juanito recibe diariamente más de 250 toneladas de residuos provenientes de los usuarios de la ciudad de Villavicencio, algunos municipios aledaños como Paratebuena, Medina, Cumaral, Restrepo y los servicios de recolección, transporte y disposición de San Martín de los Llanos.

Las características topográficas y físicas de la zona hacen de Don Juanito un relleno de alta complejidad e inversión. Conformado mediante la técnica dique – área, el sitio de disposición final cumple con todas las reglamentaciones ambientales y sanitarias vigentes.

Además, ha sido avalado por distintas entidades de orden regional y nacional como uno de los mejores del país por su manejo técnico y paisajístico.

El Relleno Sanitario Don Juanito opera con un plan de manejo ambiental acogido y aprobado mediante la resolución N° 604 del 23 de Diciembre de 1999, el cual fue modificado para adoptar la nueva capacidad técnica ya que fue diseñado para 365.750 m³ y una compactación máxima de 0.7 Ton/m³; al entrar en funcionamiento el 22 de noviembre de 2001 un compactador, se generó el aumento de la vida útil del Relleno Sanitario en un 53% al incrementar el grado de compactación a 1.2 Ton/m³ y la capacidad técnica para 557.219 m³ de residuos sólidos.¹⁵

Don Juanito, convertido hoy en el Parque Ecológico Recicante, ha obtenido reconocimientos a nivel nacional por los avances efectuados en materia de disposición final y compensación ambiental.

¹⁵ Bioagrícola del Llano S.A. ESP. Informe de capacidad y condiciones de operación del sitio de disposición final de residuos sólidos a Julio de 2005.

5. LIXIVIADOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO DON JUANITO

La cantidad y características de los lixiviados generados en el relleno sanitario Don Juanito obedecen a varios factores dentro de los que se pueden destacar los siguientes:

- El régimen de lluvias presentado sobre el relleno sanitario
- La composición física de los residuos sólidos dispuestos
- Evapotranspiración
- Infiltración de aguas lluvias
- Humedad de los residuos

Las principales causas de generación de lixiviados en el relleno sanitario es el fuerte régimen de lluvias que se presenta sobre la ciudad, y el alto % de residuos orgánicos dispuestos en el relleno. Esto se debe a que la ciudad de Villavicencio no está catalogada como una ciudad industrializada y por ende no se genera grandes cantidades de residuos inorgánicos.

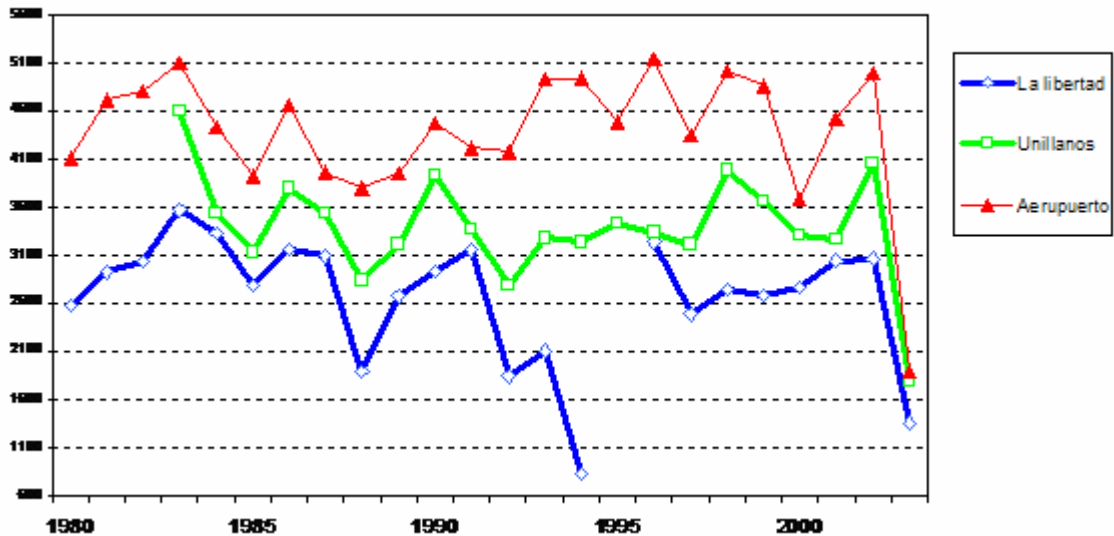
Estos dos factores son determinantes para la calidad de los lixiviados, por cuanto las lluvias pueden producir diluciones cambiando las características de los mismos; de igual modo la descomposición de los residuos orgánicos presentan mayores cargas orgánicas dentro de los lixiviados.

5.1 RÉGIMEN DE LLUVIAS PRESENTADO SOBRE EL RELLENO SANITARIO¹⁶

De acuerdo a los datos históricos recopilados de los últimos 20 años de precipitación de las tres estaciones meteorológicas del IDEAM mas próximas al relleno sanitario Don Juanito; Aeropuerto Vanguardia, Unillanos y la Libertad el valor de la precipitación media anual hallado para el relleno sanitario Don Juanito, corresponde a cuatro mil cincuenta y nueve milímetros por año (4059 mm/año). Sin embargo si se observa el promedio de los últimos años descendió notoriamente hasta los mil ochocientos milímetros por año (1800mm/año). La figura 2 muestra el nivel de precipitación para las estaciones vecinas al Relleno Sanitario Don Juanito.

¹⁶ Centro de investigaciones en ingeniería ambiental, Departamento de ingeniería ambiental de la universidad de los Andes. Estudio de alternativas tecnológicas para el tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de Villavicencio. Bogota: 2004. p.7-9.

Figura 2. Nivel de precipitación – estaciones vecinas al relleno sanitario Don Juanito



Fuente: JAIMES, 2004.

5.2 COMPOSICIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS DISPUESTOS EN EL RELLENO SANITARIO DON JUANITO

Como ya se había mencionado anteriormente, gran parte de la cantidad de lixiviados generados dentro del relleno sanitario obedece al número de constituyentes orgánicos presentes en los residuos dispuestos que finalmente sufren un proceso de degradación anaerobia y que, en su etapa final, produce agua en forma de lixiviados y biogás como CH₄ (metano).

En la tabla 3 se puede observar la composición física de los residuos para el caso específico de la ciudad de Villavicencio. Además permite apreciar que más del 57.42 % de la totalidad de los residuos sólidos corresponden a componentes orgánicos.

Tabla 4. Caracterización física de los residuos sólidos de la ciudad de Villavicencio

COMPONENTE	FRACCIÓN (%)
Residuo orgánico de plaza*	13.9
Residuo de comida*	38.06
Residuo de jardín*	5.46
Papel de oficina	1.49
Papel periódico	2.11
Cartón	3.56
Recipientes y frascos plásticos	1.51
Bolsas plásticas	8.11
Textiles	2.52
Caucho	0.30
Cuero	0.80
Madera	1.41
Vidrio plano	0.29
Vidrio frascos y otros	1.59
Hojalata	0.30
Aluminio	0.15
Chatarra	0.54
Platos y Envases Desechables	1.36
Papel Higiénico	2.45
Pañales Desechables	3.54
Icopor	0.10
Tarros insecticidas	0.00
Baterías carros	0.11
Pilas	0.04
Esmaltes	0.01
Medicamentos	0.12
Tarros pintura	0.10
Tarros aceite	0.03
Huesos	0.10
Residuos hospitalarios y/o cenizas	0.79
Otros no clasificados	6.03
Empaques	0.37
Escombros y tierra	2.07
Vasijas de pasta y loza	0.07
Fibras sintéticas	0.37
Cenizas	0.06
Aserrín	0.05
Radiografías	0.01
Residuos de taller	0.11
Alambre	0.01

*Residuos orgánicos

Fuente: Bioagrícola Del Llano S.A. E.S.P .2005

5.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN¹⁷

La cantidad de humedad disponible en el relleno sanitario para el proceso de evapotranspiración esta directamente afectada por el tipo de superficie, suelo y vegetación. Incrementar la evapotranspiración en un relleno sanitario es algo muy deseable para reducir la cantidad de lixiviado producido.

Así pues la evapotranspiración es la combinación de la evaporación de la superficie del suelo y de la transpiración de la vegetación.

Para realizar la medición de la evaporación medida anual para el relleno sanitario se tomó del promedio de la información suministrada por las tres estaciones meteorológicas vecinas al relleno sanitario.

De acuerdo al comportamiento de los datos históricos recopilados de los últimos 20 años de evaporación de las tres estaciones meteorológicas del IDEAM más próximas al relleno sanitario Don Juanito; Aeropuerto Vanguardia, Unillanos y la Libertad el valor de evaporación media anual hallado para el relleno sanitario Don Juanito es de Mil Ciento Sesenta y Siete milímetros por año. (1167 mm/año).

5.4 INFILTRACIÓN DE AGUAS LLUVIAS¹⁸

La cantidad de escorrentía superficial depende de factores como la duración e intensidad de la precipitación, la inclinación y tipo de superficie, la permeabilidad y porosidad del material y de la cantidad y tipo de vegetación. El valor de escorrentía superficial media anual para esta zona del país y para el relleno sanitario Don Juanito es de tres mil ciento veintidós milímetros por año (3122 mm/año).

5.5 HUMEDAD DE LOS RESIDUOS¹⁹

Este factor es muy importante debido a que representa cerca del 40% del peso común de los residuos, con un margen que puede situarse entre el 25 y el 60%. La máxima aportación la proporcionan las fracciones orgánicas y la mínima, los productos sintéticos.

Esta característica debe tenerse en cuenta por la importancia en los procesos de compactación de residuos, producción de lixiviados, transporte, procesos de transformación, tratamiento de incineración y recuperación energético y procesos de separación de residuos y planta de reciclaje. El contenido de humedad de los residuos contenidos en el relleno sanitario, varía constantemente debido al incremento y disminución en la cantidad de agua infiltrada y evapotranspirada.

¹⁷ Ibid., p. 9-12

¹⁸ Ibid., p. 12-15..

¹⁹ www.ambientum.com/enciclopedia/residuos.html.

5.6 CUANTIFICACION DE LIXIVIADOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO DON JUANITO

Para determinar los caudales de lixiviados que llegan a la planta de tratamiento provenientes del relleno sanitario, el autor tomó muestras de lixiviados hora a hora durante 8 horas continuas a la entrada del tanque 14, que es el que recibe todos los lixiviados generados por el relleno sanitario y que son manejados en la planta de tratamiento. Dicha medición se realizó el 25 Enero de 2005.

La medición del caudal se realizó de forma manual utilizando el método volumétrico;²⁰ consistió en tomar un volumen de muestra cualquiera y medir el tiempo transcurrido desde que se introdujo a la descarga hasta que se retiró de ella. Este método tiene la ventaja de ser el más sencillo y confiable, siempre y cuando el lugar donde se realice el aforo garantice que al recipiente llegue todo el volumen de agua que sale por la descarga.

De acuerdo a los aforos realizados por el autor, en el tanque 14, se pudo evidenciar que la cantidad de lixiviados que llegan a la planta de tratamiento de lixiviados se encuentra en un rango de 1.2 a 1.5 litros por segundo con un promedio de 1.34 LPS. (Ver tabla 5).

Tabla 5. Aforo de lixiviados generados en el relleno sanitario para Enero de 2005.

Punto	Hora	Caudal (LPS)
Tanque 14	1	1.20
Tanque 14	2	1.30
Tanque 14	3	1.35
Tanque 14	4	1.45
Tanque 14	5	1.40
Tanque 14	6	1.25
Tanque 14	7	1.50
Tanque 14	8	1.30

Figura 3 Lixiviados generados en el relleno sanitario Don Juanito, tanque 14.



Fuente: El autor, 2004

²⁰ IDEAM. Protocolos para análisis de aguas, toma y preservación de muestras; p.2.

5.7 CARACTERIZACION DE LOS LIXIVIADOS EN DON JUANITO

Para realizar la caracterización de los lixiviados generados en el relleno sanitario Don Juanito se tuvo en cuenta el protocolo para análisis de aguas del IDEAM²¹, el tipo de muestra manejado fue el compuesto, dicho método es usado para observar concentraciones promedio, además de ser usado para evaluar eficiencias en plantas de tratamiento de aguas residuales.

El punto seleccionado en donde se realizó la caracterización fue en el tanque 14, a la llegada de la planta, dicho punto da una idea general de cuales son las características del lixiviado que se va a tratar en la planta, e indica que parámetros se deben controlar para garantizar la eficiencia de la misma.

Tabla 6. Características de los lixiviados generados en el relleno sanitario Don Juanito

Parámetro	Unidad	TK 14 llegada PTL*
DBO	mg/L	1700
DQO	mg/L	3200
pH *		7.46
Temperatura Muestra*	°C	32.7
Conductividad *	ms/cm	14.54
Detergentes (MBAS)	mg/L	0.2
Turbidez	UNT	463
Sólidos Sedimentables	ml/L	2
Disueltos	mg/L	2053
disueltos fijos	mg/L	570
disueltos volátiles	mg/L	1483
sólidos totales	mg/L	2272
totales fijos	mg/L	620
totales volátiles	mg/L	1652
Sólidos suspendidos	mg/L	219
Aceites y grasas	mg/L	68.4
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	10643
Ácidos grasos Volátiles	mg/L CH ₃ COO H	4267
Relación Ácidos grasos Volátiles/alcalinidad	-----	0.4

*Parámetros medidos in situ.

Fuente: El autor, 2005.

²¹ Estudio de alternativas tecnológicas para el tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de Villavicencio, Op. cit., p. 1.

* Planta de tratamiento de lixiviados.

5.8 MANEJO Y TRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO DON JUANITO

El manejo y tratamiento que se le ha venido dando a los lixiviados en el relleno sanitario Don Juanito consta de tres procesos consecutivos que se explican a continuación y al final se representa todo el proceso en conjunto. (Ver figura 8.)

5.8.1 Recirculación. Los lixiviados jóvenes son captados en el área de disposición final por medio de filtros contruidos en bolo de río y gavión y conducidos por una tubería enterrada de ocho (8) pulgadas y a su vez son transportados hasta unos tanques contruidos en mampostería que sirven para recibir y almacenar el lixiviado. Desde estos tanques, los lixiviados son bombeados hacia unos tanques plásticos que se encuentran enterrados en la parte superior de los domos que han sido clausurados.

Figura 4. Tanques de recirculación del lixiviado



Fuente: El autor, 2004.

Estos tanques tienen una capacidad de diez (10) metros cúbicos y en la parte inferior tienen cuatro perforaciones que están protegidas por un filtro con el fin de evitar el paso de objetos extraños en el tanque.

Estas perforaciones permiten la evacuación del líquido que ha sido bombeado, de tal forma que el lixiviado joven es recirculado sobre los residuos.

El lixiviado joven se convierte en lixiviado intermedio después de atravesar los residuos que se encuentran dispuestos en el domo clausurado. Este proceso de recirculación permite que los residuos se comporten como un filtro disminuyendo la carga contaminante del líquido.

5.8.2 Planta de tratamiento. El lixiviado que ha bajado por gravedad hacia las tuberías enterradas en el domo, en el proceso de recirculación, es recolectado y transportado por el sistema de alcantarillado perimetral que conduce hacia la planta de tratamiento.

Antes de que la Universidad De la Salle estuviera involucrada en el proceso de optimización de la planta de tratamiento de lixiviados para el relleno sanitario Don Juanito el sistema consistía de las siguientes estructuras:

5.8.2.1 Tanque de homogeneización de caudales. Esta era la primera estructura de la planta de tratamiento de lixiviados denominada desde entonces tanque catorce (14); esta estructura recibe todos los lixiviados producidos en el relleno sanitario, todos los lixiviados son mezclados, por esta razón es denominado de homogeneización de caudales.

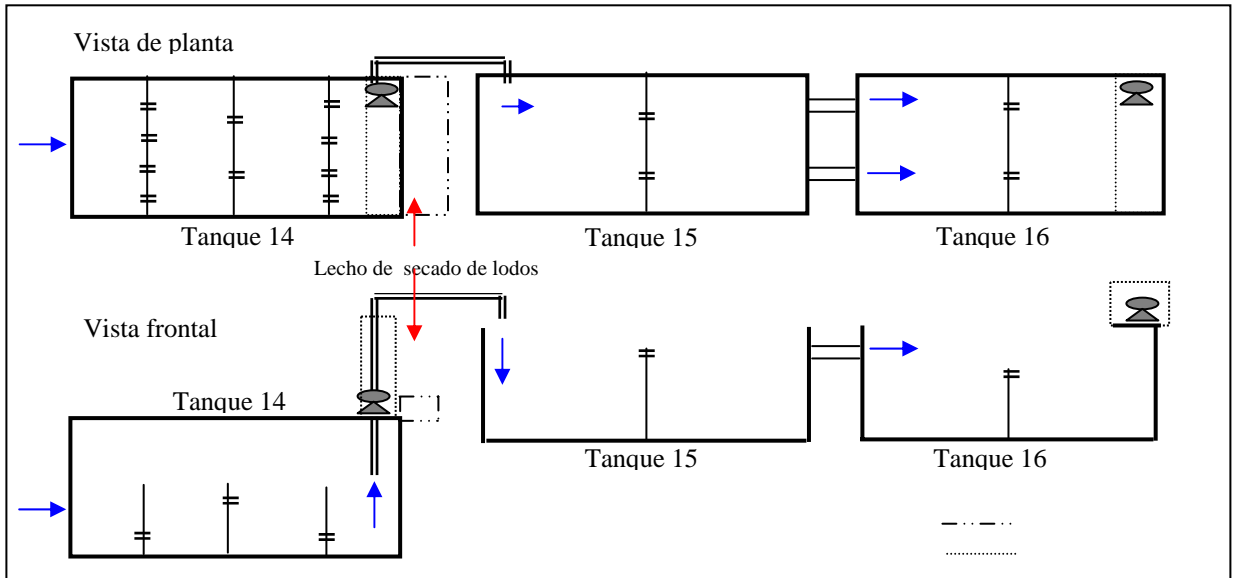
5.8.2.2 Tanque 1 de sedimentación. Esta era la segunda estructura de la planta de tratamiento de lixiviados que fue denominada para ese entonces tanque 15, el cual poseía en su interior una pantalla que dividía la estructura en dos partes para aumentar el proceso de sedimentación como su nombre lo indica.

5.8.2.3 Tanque 2 de sedimentación. Esta era la última estructura de la planta de tratamiento de lixiviados que para ese entonces fue denominado tanque 16. Al igual que la anterior estructura, contaba con una pantalla en su interior la cual acrecentaba el proceso de sedimentación para así obtener un lixiviado mayor disminución de sólidos y por ende una disminución en la DBO_5 ; desde esta estructura el lixiviado era conducido a irrigación para hacer su tratamiento final por medio de bombeo.

Cabe anotar que el lixiviado pasaba de una estructura a otra a través de vasos comunicantes por medio de tubería incrustada a las paredes de las estructuras.

5.8.2.4 Lecho de secado de lodos. Además de lo anterior, la planta contaba con un lecho de secado para los lodos que se producían en este tratamiento, éste se encontraba ubicado en lo que hoy día el autor del presente proyecto denomina trampa de grasas, o tanques 14A y 14B. La figura 5 muestra cada una de las estructuras anteriormente mencionadas.

Figura 5. Estructura original planta de tratamiento de lixiviados



Fuente: JAIMES, 2004.

5.8.3 Recirculación por aspersion. El lixiviado que se obtiene como resultado del tratamiento dentro de la planta es conducido por medio de bombeo hacia un sistema de tubería que se encuentra en la zona clausurada hace más de ocho años.

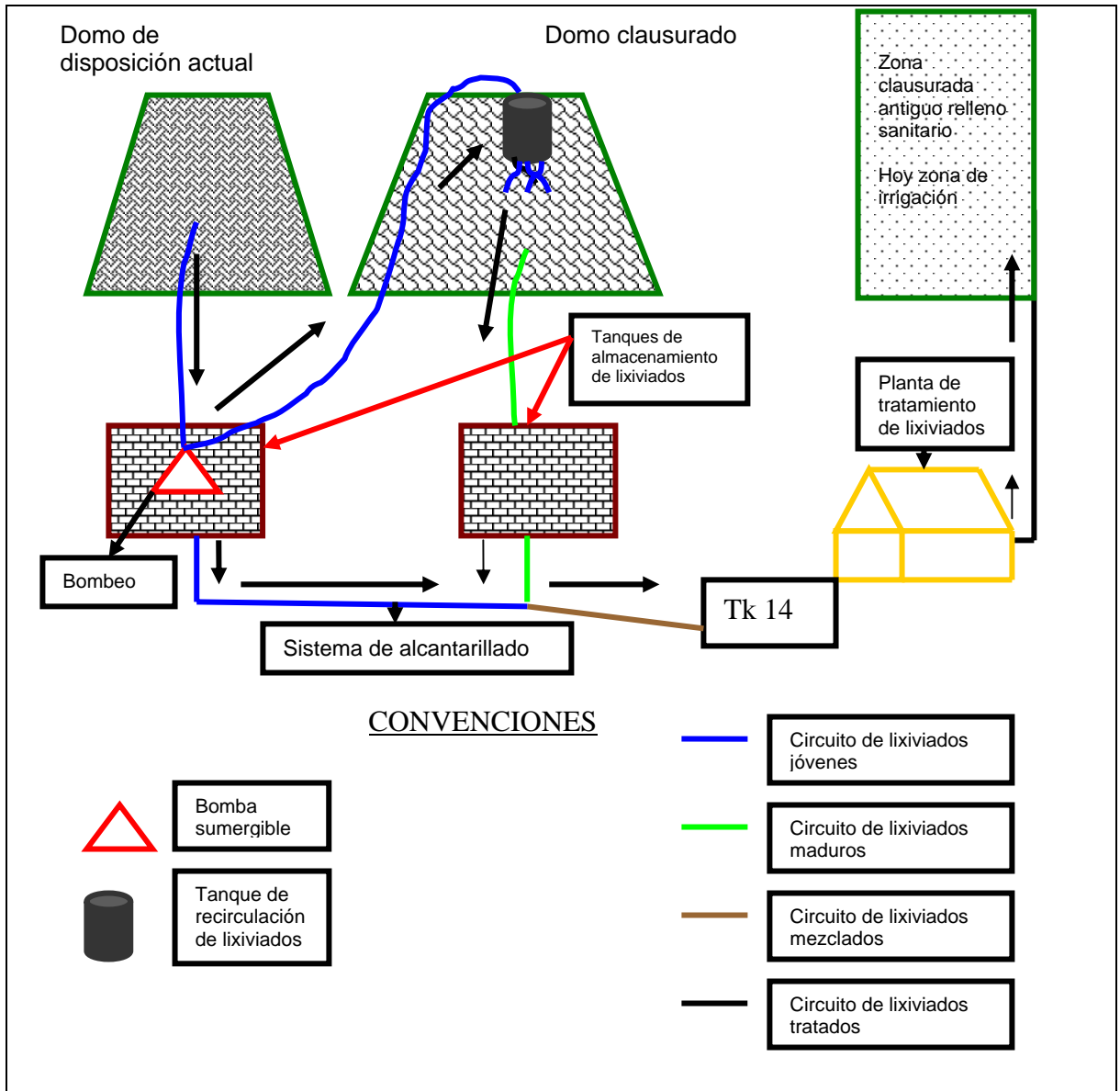
Figura 6. Recirculación por aspersion



Fuente: Archivo Fotográfico. Bioagrícola del Llano S.A. ESP.

El operario que se encuentra en el turno de bombeo se encarga de conectar la tubería a los aspersores, para de esta manera completar el tratamiento de los mismos a través de la evaporación.

Figura 7. Manejo y tratamiento de los lixiviados en el Relleno Sanitario Don Juanito



Fuente: El autor, 2006.

6. DESEMPEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO*

Al iniciar el presente proyecto, el autor encontró una serie de obras de construcción que obedecieron a las recomendaciones efectuadas por la ingeniera Nury Jaimes²².

A continuación se presenta la verificación del desempeño de cada una de estas estructuras (en construcción) con fines de hacer mejoras y reducir los costos de implementación, como se presenta en el capítulo siguiente.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO RECOMENDADO INICIALMENTE

Desde el momento en que arrancaron las obras correspondientes a la construcción de la nueva infraestructura de tratamiento de los lixiviados de Don Juanito, ésta ha sufrido varios cambios que obedecen a las directrices originadas a partir del presente proyecto de pasantía.

Luego de una serie de recomendaciones y reformas como se apreciará mas adelante, las estructuras con las que cuenta la planta en la actualidad son las siguientes:

6.1.1 Homogeneización. Es la primera estructura de la planta de tratamiento de lixiviados, es el denominado tanque14 o de homogeneización los lixiviados llegan a través del sistema de alcantarillado que los conduce por una tubería de seis pulgadas hasta su descarga en este tanque.

El tanque 14, se encuentra enterrado, tiene tres metros de profundidad, doce metros de longitud y tres metros de ancho; cuenta internamente con tres pantallas que separan a su vez cuatro secciones dentro del mismo tanque, dichas secciones se comunican a través de unas tuberías de 10 pulgadas incrustadas en las pantallas; la primera pantalla posee cuatro tuberías a una altura de 0.71 metros del nivel de la base del tanque, la segunda dos a una altura de 0.83 metros y la tercera cuatro a una altura de 0.83 metros. Ver plano 1.

El tanque 14 podría considerarse como un tratamiento primario ya que en esta unidad se hace una buena retención de sólidos debido a la disminución de la velocidad del flujo que se logra a través del choque de los mismos con las

* Desempeño de las estructuras encontradas al iniciar el presente proyecto

22 JAIMES, Nury. Optimización De La Planta De Tratamiento De Lixiviados Del Relleno Sanitario De Villavicencio Don Juanito.

pantallas. Además de lo anterior este tanque funciona como una unidad de homogeneización, ya que recibe tanto los lixiviados maduros como los intermedios que han sido recirculados sobre las zonas clausuradas.

Figura 8. Tanque de homogeneización



Fuente: El autor, 2004.

6.1.2 Trampa de grasas. Son los denominados por el autor en del presente trabajo tanques 14A y 14B y corresponden a la segunda estructura de la planta de tratamiento de lixiviados. Anteriormente sobre esta estructura funcionaba el lecho de secado para los lodos provenientes de la planta. Dentro del proyecto de optimización de la planta de tratamiento de lixiviados desarrollado por la ingeniera Nury Jaimes su estructura fue modificada convirtiéndola en lo que hoy día funciona como una trampa de grasas. Se denomina una trampa de grasas debido a que se espera que los sólidos más gruesos sean retenidos en la unidad anterior y en esta sección solo se haga una separación clara de los contenidos grasos emulsionados que puedan llegar con los lixiviados.

El trampa de grasas, recibe por bombeo los lixiviados del tanque de homogeneización, y esto depende de la cantidad generada de ellos, por lo que todo el sistema funcionaba por cochadas.

Del tanque de homogeneización los lixiviados son bombeados al tanque 14 A y 14 B (trampa grasas) de acuerdo a la cantidad de lixiviados recibidos por éste, es decir, se maneja un bombeo por cochadas.

Dicha estructura fue construida hasta 2.7 metros de altura, conservando el mismo ancho de 3 metros para toda la planta en general, este conjunto de tanques en su

interior contiene una pantalla que las separa dejando en su parte inferior un espacio de 0.46 metros que obliga a seguir un flujo ascensional de régimen a pistón, lo cual se hace indispensable para así asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas para el proyecto. (Ver plano 3.)

Figura 9. Tanques 14 A Y 14B



Fuente: El autor, 2006.

Figura 10. Régimen de flujo a pistón tanques 14 A, 14 B y paso al reactor biológico



Fuente: El autor, 2005.

6.1.3 Reactor biológico anaerobio. La tercera estructura de la planta de tratamiento de lixiviados, denominada por el autor reactor biológico anaerobio, compuesta por los tanques 15A y 15B ya que en esta estructura se pretende introducir un medio de soporte biológico para ayudar a la proliferación de microorganismos y con ello el proceso de degradación de la materia orgánica presente en los lixiviados según el objetivo del proyecto de optimización.

Esta unidad tiene una longitud de 11.81 metros, se encuentra a una profundidad de 0.8 metros del suelo alcanzando una altura de 3.65 metros, conserva el mismo ancho de toda la planta en general y consta de dos tanques separados por una pantalla a una distancia de 5.88 metros de la primera sección. Los lixiviados llegan a esta unidad desde el trampa grasas por la parte superior y por rebose continúan con el régimen de flujo a pistón que se estableció en el proyecto de optimización. El lixiviado pasa del tanque 15 A al 15B por debajo de la pantalla que los separa a 0.54 metros del suelo obedeciendo también el régimen de flujo a pistón establecido para el proyecto. (Ver plano 3.)

Figura 11. Pantalla interna tanques 15A, 15B y flujo a pistón



Fuente: El autor, 2005.

6.1.4 Tanque de paso. Es el tanque 15C, cuya función es conducir los lixiviados del reactor biológico anaerobio al sedimentador final. Los lixiviados llegan a este pequeño tanque por la parte superior y por rebose; este a su vez lleva los lixiviados al sedimentador final por la parte inferior a 0.46 metros del suelo siguiendo como es normal, el régimen de flujo a pistón según las especificaciones técnicas del proyecto. (Ver plano 3.)

Figura 12. Tanque 15C, de paso, al sedimentador final



Fuente: El autor, 2005.

6.1.5 Sedimentador final. Esta es la última estructura de la planta de tratamiento de lixiviados, compuesta por los tanques 16A y 16B. Se denomina sedimentador final por el autor del presente proyecto, ya que se espera que a esta sección lleguen los sólidos que no fueron retenidos en las secciones anteriores y principalmente los del reactor biológico anaerobio.

Esta estructura posee una longitud de 13.65 metros; sigue conservando un ancho de tres metros y cuenta con una altura de 3.06 metros; además internamente tiene una pantalla que obliga a los lixiviados a pasar por debajo con un espacio entre el suelo y ésta, de 0.46, metros continuando con el régimen de flujo a pistón, como lo indicó el tratamiento según el proyecto de optimización propuesto por Nury Jaimes.²³

Figura 13. Tanques 16A y 16B, sedimentador final



Fuente: El autor, 2005.

²³ Ibid., pág.59.

6.2 DIMENSIONES Y CAPACIDAD DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Antes de realizar el proyecto de optimización de la planta de tratamiento de lixiviados²⁴, ésta contaba con una capacidad de tratamiento para los lixiviados de 166.7 m³. Una vez evaluada la nueva capacidad se calculó un valor de 284.46 m³ sin contar con el tanque 14 de homogenización, puesto que en este no se realiza un tratamiento como tal sino mas bien resulta ser una unidad de almacenamiento de lixiviados. La tabla N.6 muestra claramente las dimensiones con las que cuenta la planta de tratamiento actualmente (Ver plano 3.)

Tabla 7. Dimensiones de la planta de tratamiento en la actualidad

TANQUE	LONGITUD (m)	ALTURA EFECTIVA(m)	ANCHO (m)	VOLUMEN (m ³)
14A	2.77	2.29	3.0	19.02
14B	2.76	2.13	3.0	17.63
15A	5.88	3.15	3.0	55.56
15B	5.93	3.20	3.0	56.92
15C	1.46	1.71	3.0	7.48
16A	5.9	3.15	3.0	55.75
16B	7.63	3.15	3.0	72.10
TOTAL				284.46

Fuente: El autor, 2005.

6.3 PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y CONTROL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO RECOMENDADA INICIALMENTE²⁵

Un buen diseño de cualquier unidad de tratamiento no resulta exitoso si la operación y control de la misma no se hace de manera consecuente y sistemática, por lo tanto, a continuación se presentan los principales parámetros de control y operación que se tuvieron en cuenta antes del desarrollo del presente proyecto.

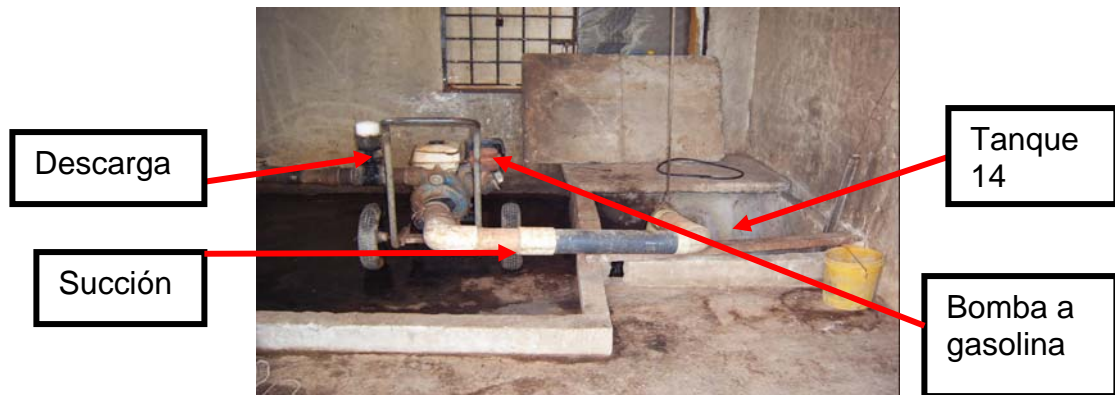
6.3.1 Caudal de operación. La planta de tratamiento de lixiviados manejaba un caudal de operación de acuerdo a la cantidad de lixiviados que llegaban al tanque 14. Como se ha mencionado, éste tanque recibe todos los lixiviados generados en el relleno sanitario; por esta razón se manejaba un sistema de bombeo por cochadas; a medida que este tanque se iba llenando se bombeaba directamente al tanque 14A que es la primera estructura de la planta. (Ver anexo A.)

²⁴ Ibid., p. 40.

²⁵ Ibid., p. 44.

Los equipos utilizados para bombear los lixiviados tanto del tanque 14 a la planta de tratamiento como del tanque 16 al sistema de aspersión, consistían en unas motobombas que funcionaban a gasolina, las cuales según aforos realizados por el autor arrojaban un caudal de 9 litros por segundo a la primera estructura de la planta.

Figura 14. Sistema de bombeo original.



Fuente: El autor, 2004.

6.3.2 Tiempo de retención. Para el reactor en estudio se calculó el tiempo de retención total para toda la planta, teniendo en cuenta, para esto, los volúmenes de cada estructura de la planta.

El tiempo de retención para toda la planta se cálculo de acuerdo al caudal de lixiviado que es bombeado actualmente, dependiendo de los volúmenes de cada una de las cámaras del reactor. De acuerdo a los cálculos realizados el tiempo de retención para toda la planta fue de 8.7 horas. (Ver anexo B.)

6.3.3 Carga hidráulica. La carga hidráulica se calculó con el objeto de prevenir arrastre de la biomasa que se fuera a formar en el medio de soporte biológico, dicha carga debe encontrarse en un rango de $(0.4-1.3) \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$, para que se cumpliera esta condición.

Según las condiciones existentes de bombeo y dimensiones de la planta, el resultado de la carga hidráulica fue de $1.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$.

De esta manera se puede evidenciar claramente que el caudal bombeado a la planta de tratamiento de lixiviados estaba por encima del rango, hecho por el cual se decidió que habría que hacer una mejora al actual sistema de bombeo. (Ver anexo C.)

6.3.4 Carga sobre el vertedero para el tanque 16B, sedimentador biológico.

La carga sobre el vertedero se calculó para determinar la longitud mínima que debe tener el vertedero en el sedimentador final para evitar levantamiento de sólidos en el efluente clarificado.

De acuerdo a las dimensiones para el vertedero que posee el sedimentador diseñado se tiene una carga sobre el vertedero de 0.78 m.

Con lo anterior se evidencia que la longitud con la que cuenta el vertedero proporciona la longitud suficiente para evitar dichos levantamientos, ya que se cuenta con una longitud interna de 3.06m. (Ver anexo D)

6.3.5 Carga volumétrica. La carga volumétrica se calculó con el fin de determinar la cantidad de carga orgánica máxima que se puede aceptar por unidad de volumen efectivo del reactor; es decir el volumen ocupado por el medio de soporte biológico disponible para degradar la materia orgánica. Para los tratamientos anaerobios se permite una carga máxima de 35 Kg DQO /m³-día* siempre y cuando se trate de reactores de lecho expandido y de alta tasa, porque para reactores anaerobios convencionales las cargas deberán ser menores[£]; sin embargo, para el reactor del presente estudio y debido al alto caudal manejado, se presentó una carga volumétrica de 44.78 Kg DQO /m³-día, considerando toda la capacidad efectiva del reactor. (Ver anexo E).

Debido a que el reactor estaba recibiendo una sobrecarga mucho mayor de la permitida (conforme a otras experiencias) para tratamientos anaerobios convencionales y de lecho expandido, el sistema no estaba en capacidad de hacer una digestión completa de la materia orgánica presente en el lixiviado. Lo anterior ratifica que se debe mejorar el actual sistema de bombeo al que opera la planta y disminuir el caudal de operación de la misma. Con esto se mejoraría, tanto la carga hidráulica como la carga volumétrica máximas permitidas para un buen desempeño del sistema, además de aumentar el tiempo de retención en el reactor, lo cual favorece el proceso de metanogénesis.

6.3.6 Relación ácidos grasos volátiles / Alcalinidad. Los resultados de las pruebas en laboratorio efectuadas por el autor en cuanto a la relación ácidos grasos volátiles/alcalinidad, en el afluente al reactor, mostraron valores no muy alejados de los recomendado por la literatura (0.2-0.4)²⁶, lo cual indica que los lixiviados presentaban un comportamiento adecuado “Buffer”, lo que permite una metanogénesis satisfactoria. (Ver tabla 8.)

* El volumen efectivo del reactor para ese momento consideraba toda la capacidad efectiva del mismo.

£ IV Semana Ambiental. En Conferencia dictada por Roberto Balda. 2003.

26 DIAZ, Op.cit., p.90.

Tabla 8. Relación ácidos grasos volátiles / alcalinidad encontrados en la planta original

Caracterización	Parámetro	Valor	Relación
Primera	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	9987	0.38
	Ácidos grasos volátiles (mg/L CH ₃ COOH)	3825	
Segunda	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	11300	0.41
	Ácidos grasos volátiles (mg/L CH ₃ COOH)	4710	
Tercera	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	10643	0.4
	Ácidos grasos volátiles (mg/L CH ₃ COOH)	4267	

Fuente: El autor, 2005.

6.3.7 Eficiencia alcanzada por la planta. Para el monitoreo de los parámetros de control no se incluyó la DBO, debido a que ésta solo mide la fracción biodegradable de la materia orgánica mediante el cálculo del oxígeno necesario por los microorganismos para realizar dicha labor, mientras que la DQO mide también la fracción no biodegradable mediante reacciones de oxidación químicas. Es por esto que en tratamientos anaerobios, como en éste caso, sólo se tiene en cuenta la medición de DQO como indicador de la eficiencia en el proceso.

De acuerdo al promedio de las caracterizaciones realizadas por el autor, para el reactor en estudio se obtuvo una DQO promedio a la entrada de la planta de 3199 mg/L y a la salida 1103 mg/L; por lo tanto, el porcentaje de DQO removido es del 65.5 %. (Ver anexo F.)

7. ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE LA EJECUCIÓN DEL PRESENTE PROYECTO

El presente proyecto se desarrolló a partir de la adecuación de la estructura física interna de la planta, con el fin de asegurar un régimen de flujo a pistón en todas las secciones del reactor. Todo este proceso, para cumplir con las especificaciones técnicas consideradas a continuación.

En virtud de lo anterior se programaron una serie de actividades las cuales se describen a continuación:

7.1 SEGUIMIENTO EN LA FASE DE CONSTRUCCIÓN

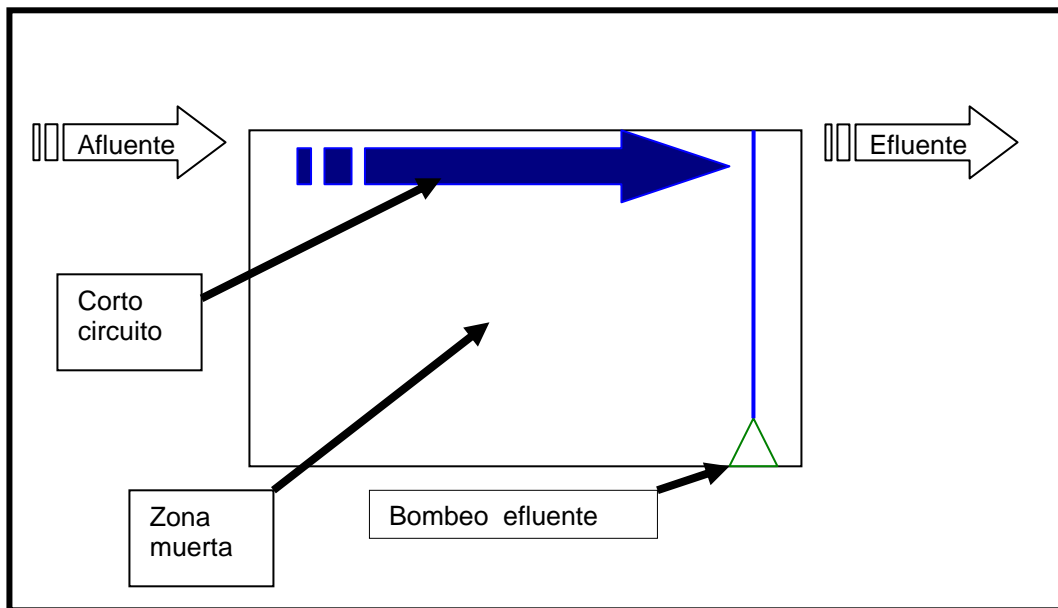
Para hacer el acompañamiento necesario en la fase de finalización de la construcción de la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Don Juanito, se programaron una serie de inspecciones rigurosas que comenzaron y terminaron con la ejecución de la obra. Este seguimiento se realizó con el fin de supervisar las obras y satisfacer las expectativas de la empresa.

Las visitas arrojaron como resultado una serie de recomendaciones para el proceso constructivo de la planta. Dentro de los aspectos más relevantes se encuentran:

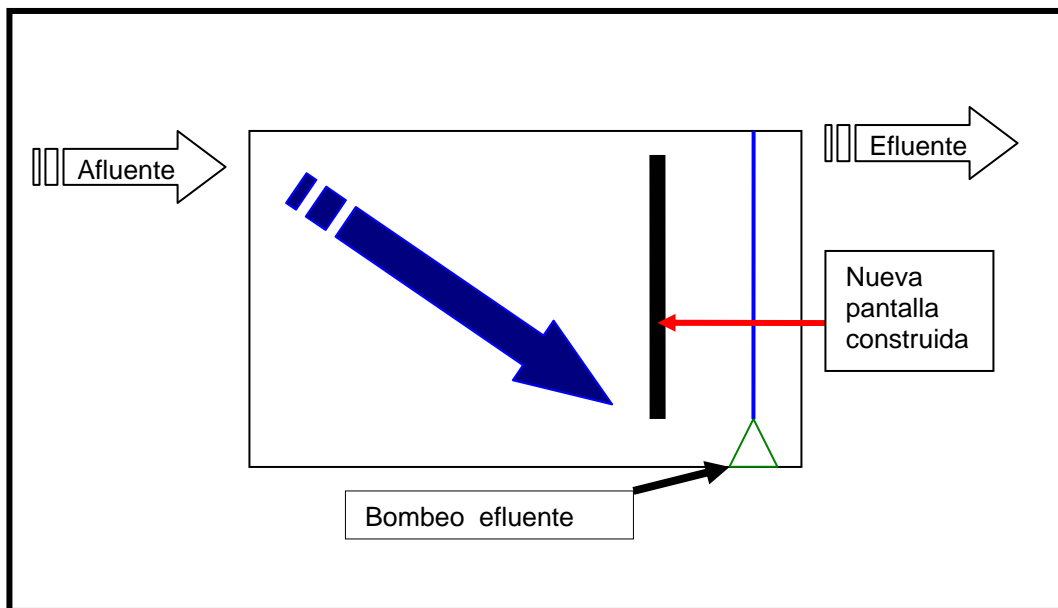
- Construcción de una pantalla al interior del tanque 16B (sedimentador final), ya que se estaba presentando un corto circuito al interior de esta sección, lo cual hacía difícil la extracción de un efluente con eficiencias de remoción satisfactorias* (Ver figura N. 15).
- Construcción de tolvas para facilitar la extracción de los lodos producto del proceso biológico.
- Adecuación de Los muros internos para garantizar el flujo a pistón en el reactor, sin introducir incrementos o disminuciones en las velocidades del flujo (lixiviado).

* Se puede considerar una eficiencia satisfactoria, cuando se cumple como mínimo lo requerido por el decreto 1594 de 1984 (Minagricultura).

Figura 15. Sedimentador original tanque 16B y sedimentador con nueva pantalla construida tanque 16B.



Sedimentador con nueva de pantalla tanque 16B



Fuente: El autor, 2006

7.1.1 Construcción de pantalla en el sedimentador. Para facilitar la extracción del efluente clarificado del reactor, se levantó una pantalla al interior del tanque 16B, ésta pantalla cuenta con 50 centímetros de espacio libre en la parte inferior para realizar dicha extracción, continuando con el régimen de flujo a pistón, previsto para el tratamiento. (Ver plano 3).

Aunque se logró construir la pantalla en el sedimentador final, las tolvas no se construyeron debido a políticas económicas internas de la empresa y se decidió construir otro sistema para extraer los lodos (Ver figura16), como se explica en el siguiente numeral.

Figura 16. Sistema construido para retirada de lodos, tanques 15Ay 15B.



Fuente: El autor, 2005.

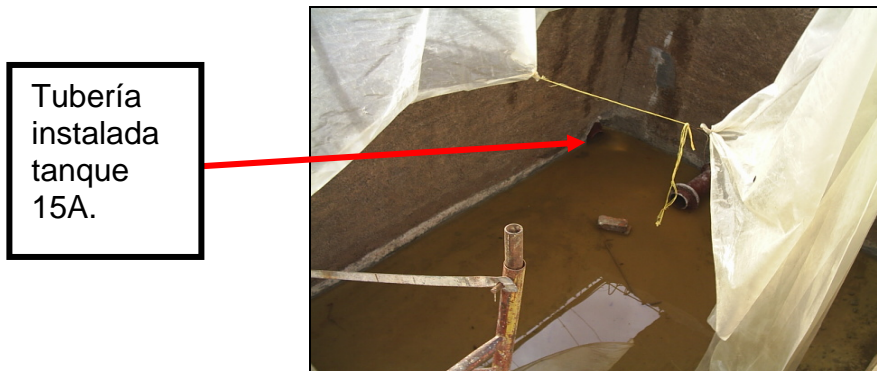
7.1.2 Sistema de extracción de lodos. Como se tenía concebido inicialmente por los funcionarios de Bioagrícola del Llano S.A E.S.P, tanto el sedimentador final como las otras unidades de tratamiento no contaban con un buen sistema de extracción. Siempre que se quería realizar la labor de remoción de los lodos de la planta, se tenía que desocupar toda la unidad para extraer los lodos, manualmente, ayudados con palas y baldes. Por último, éstos eran dispuestos en las zonas de disposición final del relleno sanitario.

Por lo tanto se montaron tuberías de seis pulgadas en la parte inferior interna de los tanques 14B, 15A, 15B, 16A, y 16B, con el fin de conducir los lodos por ellas hasta unas cajas para su extracción. Cabe anotar que a cada caja se le instaló válvulas tipo mariposa. En total se construyeron tres cajas para toda la planta. (Ver figuras 16 y17).

A pesar de no haberse construido las tolvas recomendadas, se hizo énfasis en el desarrollo de esta actividad para facilitar la extracción de los lodos, sin ningún éxito por los motivos antes expuestos, ya que el sistema construido no es el más

apropiado para retirarlos, debido a la formación de puentes de lodos en el sistema. (Ver figura 18.) Esto evitará una sedimentación eficiente de los sólidos suspendidos en el sedimentador final debido a la generación de gas desde el fondo y el consecuente arrastre de partículas hacia la superficie.

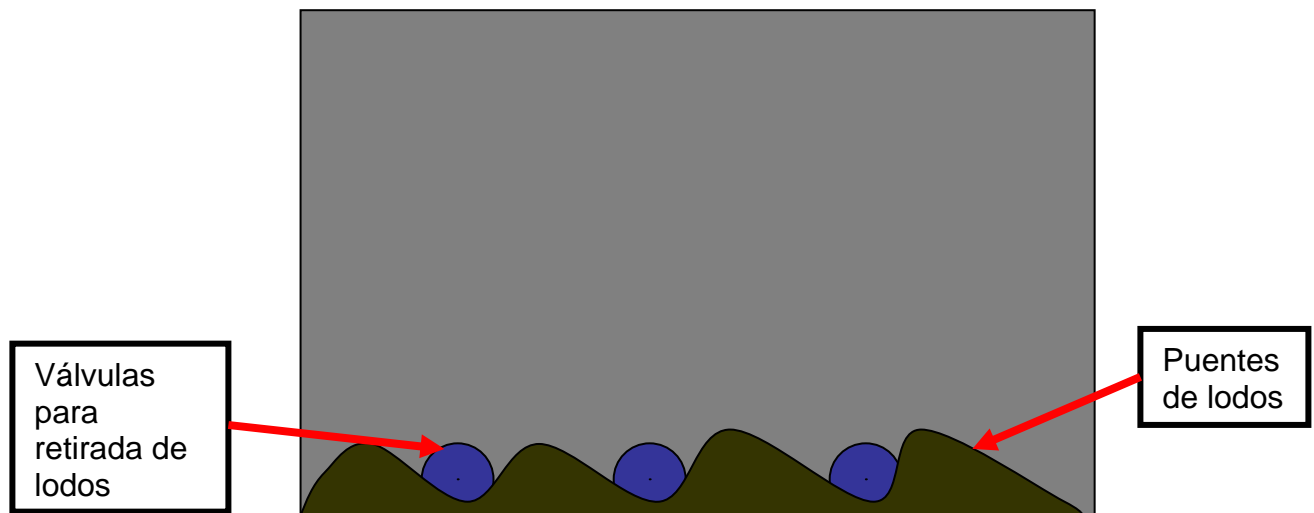
Figura 17. Tubería de extracción de lodos ubicadas dentro de las cámaras*



Tubería instalada tanque 15A.

Fuente: El autor, 2005.

Figura 18. Desempeño del sistema sin el tolvaje implementado



Válvulas para retirada de lodos

Puentes de lodos

Fuente: autor, 2005.

7.1.3 Adecuación de muros internos. Para realizar la modificación de los muros internos, se tuvo que demoler de 45 a 50 centímetros de cada muro en la parte superior cuando el flujo ascendía y de igual manera, en la parte inferior para

* Las lonas blancas que aparecen en la figura, son simplemente plásticos como protección del concreto ya fundido durante la construcción.

cuando el flujo descendía. De esta forma se garantizó que las velocidades por los tanques no tuvieran fluctuaciones. (Ver plano 3.y figuras 19 y 20.)

Figura 19. Adecuación de muros en concreto



Fuente: El autor, 2005.

Figura 20. Finalización adecuación de muros, vista interna del reactor.



Fuente: El autor, 2005.

7.2 SELECCIÓN DEL MEDIO DE SOPORTE BIOLÓGICO

Se prestó asesoría a la empresa Bioagrícola del Llano para realizar la selección del medio de soporte biológico en cuanto a las especificaciones técnicas que éste debe cumplir, así como su respectiva instalación dentro la planta; todo lo anterior acomodándose a las políticas económicas de la empresa.

7.2.1 Proceso de selección. El proceso de selección del medio de soporte biológico comenzó con la búsqueda de mercados para la adquisición de los materiales recomendados por la literatura como medios de soporte biológico.

Primero que todo se calculó la cantidad de medio que se necesitaba introducir, dentro del reactor biológico, es decir en los tanques 15A y 15B de tal manera que se pudiera cumplir con las especificaciones técnicas establecidas para el proyecto de optimización.(Ver tabla 9.)

Tabla 9. Volumen efectivo a ocupar por el medio de soporte biológico

Tanque	Volumen efectivo (m ³)
15A	46,92
15B	47,32
Total	94,24

Fuente: El autor, 2005.

La altura del medio, podrá ser función de la altura del tanque que se tenga disponible, para éste caso, la altura de este tanque es de 3.15 metros, por lo que se asumió una altura de 2.5 metros

Después de esto se calculó el volumen de los medios seleccionados para cumplir con el volumen efectivo establecido y así generar las cotizaciones correspondientes.

7.2.2 Alternativas de selección. Dentro de las alternativas seleccionadas para hacer dichas cotizaciones se tuvieron en cuenta tres diferentes tipos de materiales, y al final de esta sección se hace una comparación entre los tres materiales. (Ver figura 10)

7.2.2.1 Guadua Angustifolia, alternativa N. 1. Esta fue la primera alternativa que se tuvo en cuenta para hacer la selección del medio, debido a los resultados obtenidos en el proyecto desarrollado por Méndez y Rodríguez (2004).

Dentro de este proceso se consultó con diferentes empresas del eje cafetero, ya que es en esta región, donde se obtiene la mayor producción de esta especie vegetal en el país. Debido al alto volumen de guadua requerido; fue necesario proceder a contactar esos proveedores para suplir las necesidades proyectadas.

Dentro de las principales consideraciones que se tuvieron en cuenta están: Como el medio tenía que ser dispuesto de manera desordenada, surgió la necesidad de cortar las varas de guadua, (que es como se consigue comercialmente), en trozos de 5 a 10 centímetros para poder introducirlas dentro del reactor. (Ver figura 21.) Este hecho aumentó de manera considerable la cantidad de guadua que se necesitaba para satisfacer el volumen efectivo del reactor biológico.

Figura 21. Guadua *Angustifolia*



Fuente: El autor, 2006.

Esta alternativa se desechó debido a los elevados costos que se presentaron para poder cumplir con las especificaciones. Las empresas tenían que cortar las varas de guadua ya que éstas se encuentran en la naturaleza con longitudes mayores de seis metros, dificultando su transporte hasta la ciudad de Villavicencio.

El proveedor presentó un costo de diecisiete millones cuatrocientos treinta y siete mil quinientos pesos (17.437.500) para entregar el producto solicitado por lo que Bioagrícola optó por no realizar esta inversión. Adicionalmente, se argumentó que la guadua no había sido probada antes para este tipo de tratamientos.

7.2.2.2 Roseta plástica de polipropileno, alternativa N. 2. El segundo medio de soporte biológico que se tuvo en cuenta en el proceso de selección, fue un medio sintético de plástico (polipropileno) llamado comercialmente “Roseta” para filtros percolador.

La forma de introducir este tipo de medio de soporte biológico, al igual que el anterior, es de manera desordenada; hecho por el cual también se tuvo que consultar la cantidad de rosetas que debían obtenerse para satisfacer las necesidades del volumen efectivo del reactor. En total tenían que suministrarse 480 unidades por metro cúbico.* (Ver figura 22.)

Figura 22. Rosetas plásticas de polipropileno.



Fuente: Balda, 2004.

Se consultó con varias empresas reconocidas en este campo, se encontró que el valor por metro cúbico de este medio era de trescientos noventa y seis mil pesos 396.000; luego para poder cumplir con el volumen de medio solicitado para éste proyecto se requería invertir treinta y siete millones trescientos diecinueve mil cuarenta pesos (37.319.040). Por lo tanto, la empresa decidió no adquirir este tipo de medio.

7.2.2.3 Geotextil tejido, Alternativa N. 3. El tercer medio de soporte biológico que se tuvo en cuenta para la selección fue el geotextil tejido 1050 de PAVCO. (Ver figura 23.)

Se escogió este material, ya que cumplía con la mayoría de los requerimientos descritos para este tipo de tratamientos, en cuanto a medios de soporte biológico, como se mencionará en el próximo numeral. De acuerdo al volumen efectivo solicitado para el reactor, se necesitaban 693 metros de geotextil para suplir esta necesidad. De aquí que la inversión para la consecución de este material fue de cuatro millones de pesos (4.000.000), para adquirir cuatro rollos de geotextil de 200 metros de largo, que es como se consigue comercialmente.

* Información suministrada por el proveedor de las rosetas.

Tabla 10. Comparación de los materiales en el proceso de selección del medio de soporte biológico.

Material Características	Guadua	Roseta plástica	Geotextil tejido T 1050 PAVCO
Costo (\$)	17.437.500	37.319.040	4.000.000
Área específica (área/ Volumen)	40 m ² /m ³	100 m ² /m ³	39.33 m ² /m ³
Estructuralmente resistente	Si	si	si
Biológica y químicamente inerte	Si	si	si
Liviano	Si	si	si
No presentar superficie lisa	Si	si	si
Precio reducido	No	no	si

Fuente: El autor, 2006.

7.3 ALTERNATIVA SELECCIONADA

La alternativa seleccionada para usar como medio de soporte biológico fue la alternativa numero 3, considerada dentro del proceso de selección, es decir el Geotextil tejido 1050 PAVCO, aunque no se había probado antes para este fin, se decidió hacer la inversión y ponerlo a prueba.

Figura 23. Geotextil tejido 1050 PAVCO



Fuente: El autor, 2005.

Dentro de los parámetros que cumplía este material se encuentran los siguientes:

- Ser estructuralmente resistente
- Ser biológica y químicamente inerte
- Ser suficientemente liviano
- No presentar superficie lisa
- Presentar espacios entre las superficies adyacentes
- Precio reducido

Para poder evaluar este soporte posteriormente, se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Área específica.
- Adherencia de biomasa.

7.3.1 Área específica del geotextil tejido²⁷. De acuerdo a los resultados obtenidos en experiencias similares en las que se han encontrado buenas eficiencias de remoción de materia orgánica, un buen medio de soporte biológico debe contar con una alta relación área/Volumen, superior a $80 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Para el reactor en estudio y según el área de los tanques en los que se instaló el geotextil tejido, (tanques 15A y 15B) y el volumen efectivo ocupado por el medio de soporte biológico dentro de estos tanques, se calculó un área específica de $39.33 \text{ m}^2/\text{m}^3$. (Ver anexo G.) Esto implica que el geotextil tejido no tiene suficiente área de contacto para permitir la adherencia de los microorganismos necesarios para llevar a cabo una buena digestión anaerobia, ya que lo recomendado para medios sintéticos es contar con un área específica superior a los $80 \text{ m}^2/\text{m}^3$ como se mencionó anteriormente, encontrándose en algunos casos valores de hasta de $240 \text{ m}^2/\text{m}^3$.²⁸

7.3.2 Instalación del medio de soporte biológico. Como este medio se encuentra comercialmente en forma de láminas de 200 metros de largo por 3.85 metros de ancho, no se pudo introducir en el reactor de forma desordenada, hecho por el cual se elaboró un diseño en forma de cortinas o acordeón para ser dispuesto de manera ordenada dentro del reactor. (Ver plano 2 y figura 24.)

²⁷ GULLICKS, Hanks. And CLEASBY, Jim, Water Pollution Control Federation, Tricking Filters and Rotating Biological Contactors. Virginia. 1986.

²⁸ Ibid., p.19.

Figura 24. Diseño para la instalación del geotextil tejido



Fuente: El autor, 2005.

Para sostener el geotextil internamente se instalaron soportes en hierro, anclados a las paredes de los tanques por medio de varillas con forma de bastón, ubicadas cada cinco centímetros a lo largo de los soportes para facilitar la introducción de las varillas.

Se instalaron cuatro soportes en ángulo de 2"x2"x1/4" de pulgada para cada tanque; dos por cada costado de la pared, uno en la parte superior y otro en la parte inferior; cada soporte contaba con 59 orificios de media pulgada para introducir las varillas. (Ver figura 25.)

Figura 25. Soportes para varillas antes y después de ser instalados en el tanque 15A



Fuente: El autor, 2005.

Tanto el soporte, como las varillas se pintaron con epóxica para evitar la oxidación temprana de estos materiales. (Ver figura N 26.)

Figura 26. Protección de las varillas con pintura epóxica



Fuente: El autor, 2005.

La instalación del geotextil tejido se llevó a cabo por parte de los trabajadores de la empresa en un periodo de dos semanas. Para evitar que éste se descolgara de las varillas, se amarró el medio a los bastones, (extremo superior de las varillas) que a su vez sujetaban los soportes metálicos. (Ver figura 27.)

Figura 27. Instalación del geotextil tejido y asegurado contra descolgamiento.



Fuente: El autor 2005.

7.4 SELLAMIENTO CON GEOMEMBRANA

Para garantizar las condiciones anaerobias del tratamiento, se sellaron los tanques 15A y 15B, es decir el reactor biológico; donde se da el crecimiento de microorganismos anaerobios.

Para esto se ancló a las paredes laterales de la planta, geomembrana calibre 30 mil a lo largo de los tanques 15A y 15B. (Ver figura 28).

Figura 28. Anclaje de la geomembrana a las paredes laterales de la planta



Fuente: El autor, 2005.

Se eligió este material porque se adquiere constantemente en grandes cantidades en el relleno sanitario, ya que es usado en las actividades de clausura para los domos de disposición, y fue una manera rápida para hacer dicho sellamiento. (Ver figuras 29 y 30).

Figura 29. Instalación de geomembrana tanques 15A y 15B



Fuente: El autor, 2005.

Figura 30. Sellamiento total, tanques 15A y 15B (Reactor biológico)



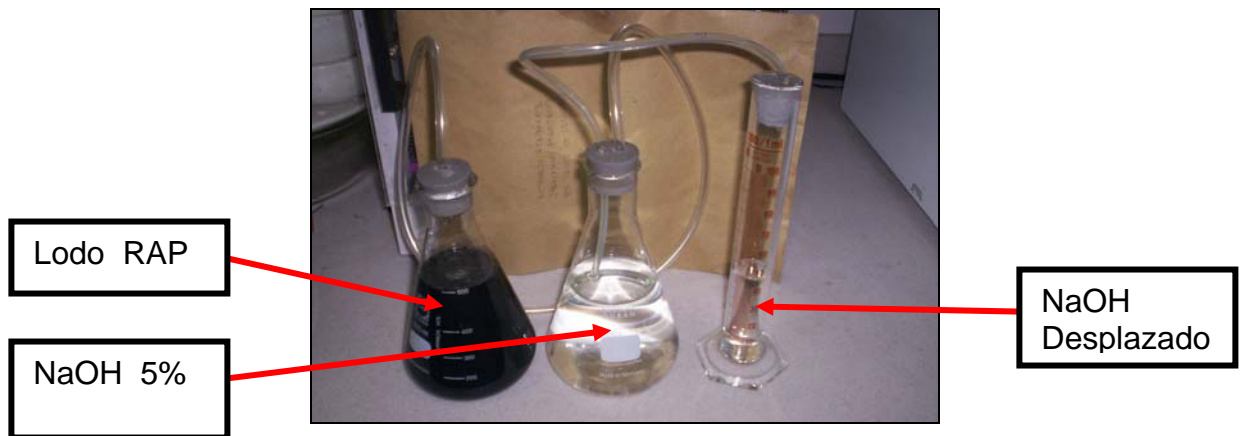
Fuente: El autor, 2005.

7.5 INOCULACIÓN

Para reducir el tiempo de arranque del reactor, fue necesario llevar a cabo el proceso de inoculación. Como el lodo utilizado para tal fin tiene que presentar una actividad metanogénica específica dentro de los rangos recomendados, (Ver numeral 3.3.1.2) se tomaron lodos producto de la planta de tratamiento de lixiviados en operación, para conocer su potencialidad, realizando para ello los ensayos correspondientes.

De esta manera se determinó la calidad del lodo y por lo tanto, el comportamiento metanogénico del sistema; esto permitió proyectar su desempeño futuro y definir la potencialidad de la biomasa como fuente de inóculo (Ver figura 31.)

Figura 31. Montaje para actividad metanogénica específica lodos reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP) Don Juanito.



Fuente: El autor, 2005.

De acuerdo a los ensayos realizados por el autor se tiene que los lodos producidos en la planta de Don Juanito, cuentan con una actividad metanogénica específica de 0.1 gDQO/SSVdía, con lo que se pudo probar que los lodos producidos en la planta de tratamiento de lixiviados de Don Juanito requerían de un inóculo más eficiente para acelerar las reacciones de digestión anaerobia y con ello reducir el tiempo de puesta en marcha de la unidad. (Ver anexo M.)

En virtud de lo anterior, se consultó con varias empresas que tuvieran instalado un reactor anaerobio, preferiblemente para tratar aguas residuales con características similares a las del reactor del presente proyecto. Sin embargo, el conseguir un reactor que maneje aguas residuales de calidad equivalente a las del presente proyecto no es común encontrar, por lo que se recurrió a la industria Colanta S.A. en su planta UHT con sede en Funza (Cundinamarca), con el fin de extraer lodo producido en su reactor Anaerobio para el tratamiento de sus vertimientos

industriales. Esta decisión fue tomada bajo recomendación del director del presente proyecto, dada su vasta experiencia en el manejo de reactores anaerobios.

La recolección de los lodos se llevó a cabo en la parte inferior del reactor. Luego, fueron llevados al laboratorio, donde se les realizó pruebas de actividad metanogénica específica para conocer su potencial como fuente de inóculo. (Ver figura 32.)

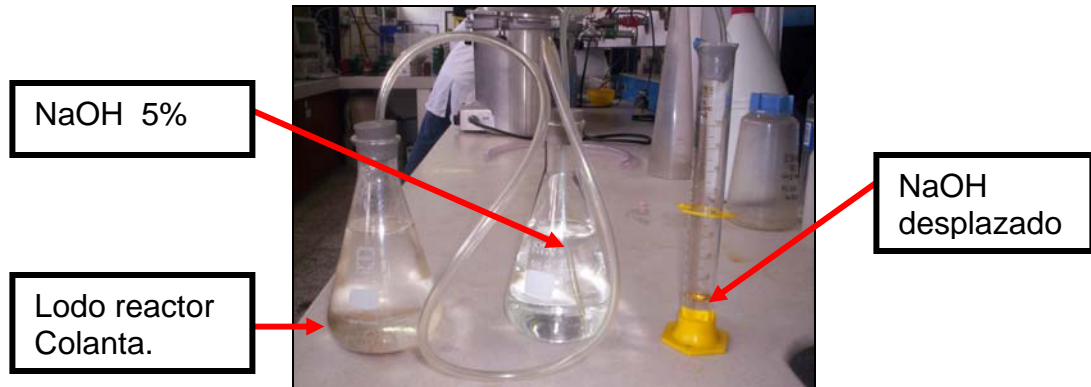
Figura 32. Purga de lodos reactor; Colanta planta UHT.



Fuente: El autor, 2005.

De acuerdo a los resultados de laboratorio obtenidos por el autor, se encontró que el lodo proveniente del reactor anaerobio de Colanta S.A, contaba con una actividad metanogénica de 0.23 gDQO/SSVdía, lo que significa que estos lodos presentan un buen desempeño ya que se ajustan a los rangos establecidos por la literatura para un buen lodo objeto de inoculación. (Ver anexo L y Figuras 33-34). Entonces, se procedió a su adquisición, con la condición de entregarles los resultados de la AME.

Figura 33. Montaje de actividad metanogénica específica lodos reactor anaerobio, Colanta.



Fuente: El autor, 2005.

Figura 34. Montaje en incubadora a 35°C. - lodos reactor anaerobio, Colanta



Fuente: El autor, 2005.

Para inocular el reactor anaerobio de flujo a pistón de Don Juanito, se tomaron 5 canecas de 55 galones de este lodo, los cuales fueron transportados desde la planta UHT de Colanta en Funza (Cundinamarca) hasta el relleno Sanitario Don Juanito de la ciudad de Villavicencio (Ver figura 35.)

Figura 35. Canecas de 55 galones con lodo anaerobio de Colanta S.A.



Fuente: El autor, 2005.

La inoculación se procedió sobre el tanque 14A, es decir, en la primera cámara donde llegan las aguas bombeadas del tanque 14. (Ver figura 36.)

Figura 36. Inoculación al tanque 14A (trampa-grasas)



Fuente: El autor, 2005.

Una manera de garantizar homogeneidad y una correcta distribución de los lodos dentro del reactor desde el momento en que se inició su inoculación, fue el de alimentar el reactor por cochadas para evitar un bombeo continuo que arrastrara el lodo inoculado hasta la última cámara (sedimentador), toda vez que para ese momento la bomba de alimentación al reactor manejaba un caudal elevado de 9

LPS. En la medida en que se bombeaba se iba inoculando paulatinamente sobre el tanque 14 A.

7.6 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

Como se había mencionado anteriormente, el caudal de lixiviados manejado por la planta obedece al bombeo que se realiza en el relleno sanitario. Se estima que el caudal de entrada varía de acuerdo al periodo de bombeo durante cada uno de los turnos dependiendo de la cantidad de lixiviados recibidos por el tanque 14. De acuerdo a lo anterior se hace necesario mantener las bombas en constante funcionamiento para mantener condiciones físico químicas homogéneas.

Sumado a lo anterior, las bombas que realizan dicho bombeo no generan un caudal óptimo de operación, debido a su sobredimensionamiento, toda vez que los aforos realizados por el autor, fueron de aproximadamente 9 L/s durante el bombeo y por consiguiente disminuyen el tiempo de retención y, aumentan la carga hidráulica y volumétrica sobre el reactor.

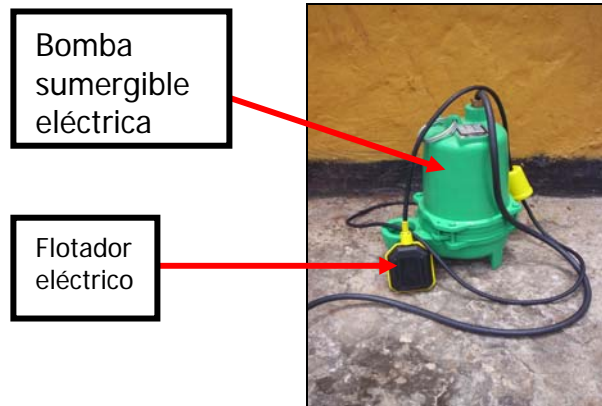
Para evitar sobre cargas en el reactor y aumentar el tiempo de retención en el mismo, se hizo necesario cambiar el sistema de bombeo que se venía manejando para la operación de la planta de tratamiento.

7.6.1 Equipo seleccionado. Para desarrollar la optimización del sistema de bombeo, los equipos de bombeo utilizados anteriormente fueron reemplazados, por electrobombas sumergibles que manejan un caudal de operación menor apropiado para el sistema.

Con el fin de seleccionar el equipo que garantizara las condiciones anteriormente mencionadas, se calculó el caudal y al cual debía operar la bomba para evitar sobre cargas en el reactor. (Ver anexo H.)

7.6.2 Descripción del equipo de bombeo. Los equipos seleccionados fueron bombas sumergibles para aguas negras, marca Barnes, modelo Sc-31, construidas en hierro, de dos pulgadas de descarga, acople con motor eléctrico monofásico de 0.4 HP, para conexión a 110 voltios. (Ver figura 37.)

Figura 37. Equipo seleccionado para la optimización del sistema de bombeo



Fuente: El autor, 2006.

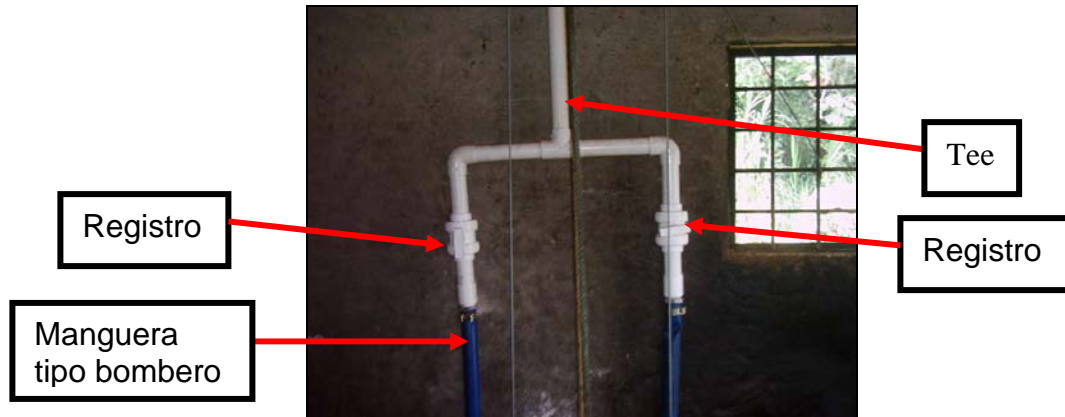
Para la propuesta de optimización del sistema de bombeo, el caudal de descarga calculado para adquirir las bombas, fue de 2.6 Litros por segundo, (Ver anexo H) con una altura dinámica total de 5.02 metros. Lo anterior, de acuerdo a cálculos realizados por el autor teniendo en cuenta las pérdidas hidráulicas del sistema.

7.6.3 Descripción del sistema implementado. El sistema implementado para la optimización del bombeo consta de dos bombas sumergibles, escogidas para la optimización del sistema de bombeo. Éstas se introdujeron al interior del tanque 14, lugar donde se efectúa el bombeo a la planta.

Las bombas en cuestión se conectaron a un sistema de tubería PVC presión, rígida, de dos pulgadas, a través de unas mangueras tipo bombero, para facilitar la extracción de las mismas en labores de mantenimiento.

Como se pusieron en funcionamiento los dos equipos, se decidió trabajar las bombas por turnos, para lo cual fueron conectadas a través de una tee de PVC, que a su vez tiene en cada brazo un registro (válvula tipo bola) para limitar el paso del lixiviado en el momento en que se ponga en funcionamiento una de las dos bombas, y de esta manera evitar que el lixiviado sea devuelto al tanque 14 ver figura.38)

Figura 38. Sistema implementado.



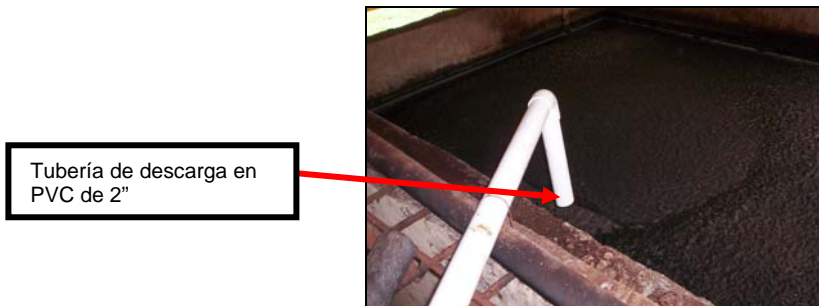
Fuente: El autor, 2006.

Con el fin de descargar el lixiviado a la planta, se unió en la parte superior de la tee, un tramo de tubería de dos pulgadas en el mismo material, el cual llega hasta el tanque 14A, que corresponde a la primera sección del reactor. (Ver figura 39.)

Sumado a lo anterior se adquirieron dos arrancadores termomagnéticos directos marca Siemens de 7/10 amperios a 110 voltios para cada bomba, los cuales se conectaron externamente al tablero eléctrico existente debido a la falta de espacio en éste.

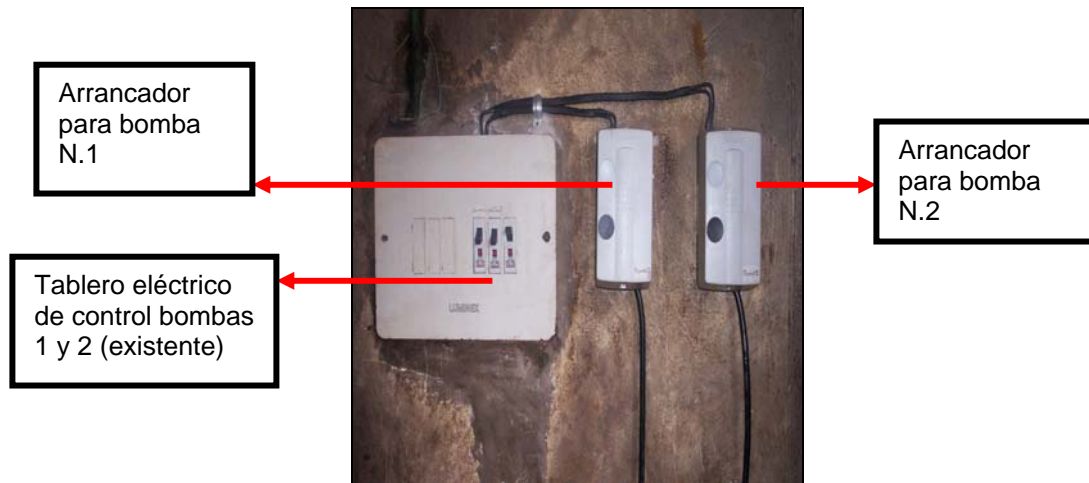
Adicionalmente se instalaron flotadores eléctricos acompañados a cada bomba, para controlar el bombeo de acuerdo al nivel de lixiviado alcanzado en el tanque 14. Todo lo anterior con el fin de automatizar el sistema y evitar la presencia de un operador las 24 horas del día. (Ver figuras 37 y 40.)

Figura 39. Descarga de lixiviado proveniente del tanque 14 al reactor



Fuente: El autor, 2006

Figura 40. Arrancadores directos.



Fuente: El autor, 2006.

8. DESEMPEÑO ACTUAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DON JUANITO

Una vez realizadas las mejoras en el diseño, la construcción, la optimización del bombeo y la puesta en marcha de la planta se presentan a continuación las mejoras obtenidas para el tratamiento.

8.1 MEJORAS AL SISTEMA A TRAVÉS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL BOMBEO

Como se ha venido mencionando, la optimización del sistema de bombeo implementado por el autor del presente documento, para la planta de tratamiento de lixiviados trajo consigo varios beneficios para el sistema implementado por el autor, entre los que se pueden destacar los siguientes:

8.1.1 Tiempo de retención. El caudal actual arrojado por las bombas sumergibles a la planta de tratamiento de lixiviados es de 2.6 litros por segundo; con esto y según las dimensiones del reactor en la actualidad, tenemos un tiempo de retención de 30.39 horas, con lo que se aumentó el tiempo de retención del reactor considerablemente, ya que originalmente se tenía un tiempo de retención de 8.7 horas con el anterior sistema de bombeo. Sumado a esto y a la alta carga volumétrica manejada por el reactor, éste no lograba completar la digestión esperada, lo cual se reflejaba por la baja eficiencia alcanzada por el sistema hasta ese entonces. (Ver anexo J.)

8.1.2 Carga hidráulica. Como el caudal bombeado originalmente a la planta proporcionaba un valor de carga hidráulica que estaba por encima del valor recomendado para evitar arrastre de biomasa, esta condición se vio beneficiada con la disminución del caudal luego de optimizado el bombeo.

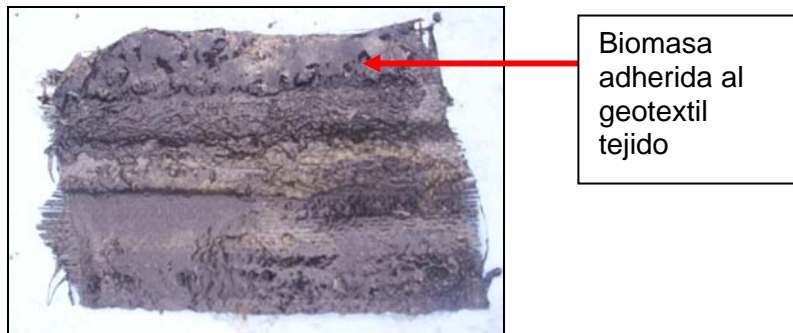
Es así como, con un caudal de operación para el reactor de 2.6 litros por segundo, se tiene una carga hidráulica de $0.52 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$, encontrándose dentro de los rangos aceptados para este tipo de tratamiento. (Ver anexo I).

8.1.3 Carga volumétrica. Con la optimización del sistema de bombeo se mantienen condiciones apropiadas para lograr estabilizar el sistema, ya que anteriormente la carga volumétrica (Kg DQO /m³-día) no estaba siendo digerida completamente por los microorganismos, debido a que le entraba más sustrato que el recomendado para este tipo de tratamiento. El valor de carga volumétrica en la actualidad es de 16.30 Kg DQO /m³-día. Con este valor se podrían mantener condiciones satisfactorias para el buen desempeño del sistema, favoreciendo la metanogénesis. Sin embargo es recomendable bajar este valor para garantizar las reacciones de digestión, y esto se podría lograr, diluyendo el afluente con la misma agua tratada, ó bien disminuyendo el caudal de tratamiento. (Ver anexo K.)

8.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL GEOTEXTIL TEJIDO

Como se mencionó antes, el proceso de inoculación, además de acelerar el proceso de arranque en el reactor, procuró la proliferación de los microorganismos sobre el geotextil tejido (medio de soporte biológico), con el ánimo de evaluar su comportamiento para el fin propuesto. Adicionalmente, para evaluarlo se tomaron muestras seis (6) meses después de inoculada la planta, para verificar el contenido de biomasa adherida una vez puesto en marcha el reactor. (Ver figura 41.)

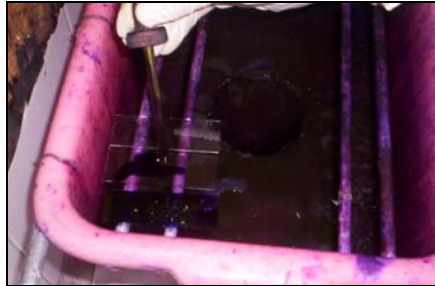
Figura 41. Recorte de geotextil tejido instalado en el RAP



Fuente: El autor, 2006.

Después de realizar diluciones del raspado de la biomasa formada en el geotextil tejido, se hizo una tinción de Gram para identificar morfológicamente los tipos de microorganismos presentes en éste. (Ver figura 42.)

Figura 42. Laboratorio de Tinción de Gram para identificación de biomasa adherida al geotextil tejido.



Fuente: El autor, 2006.

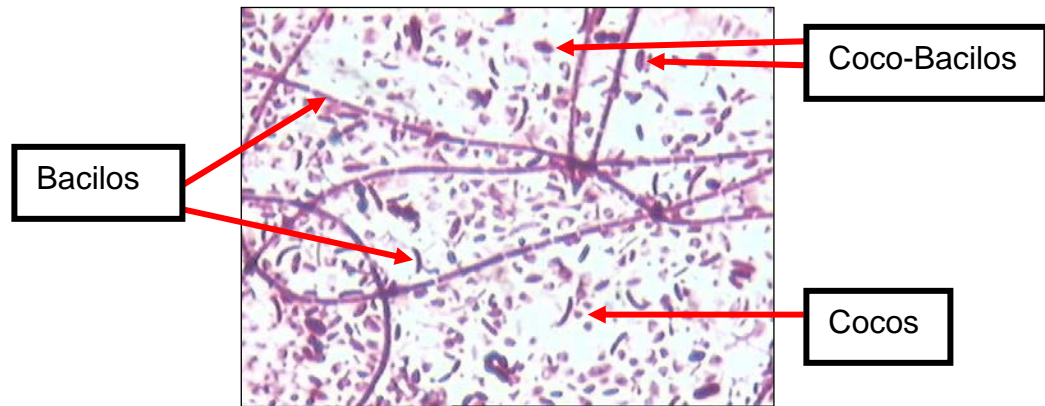
De acuerdo al análisis microscópico realizado se hallaron cocos, bacilos, cocobacilos de tipo Gram positivos y Gram negativos. Su presencia refleja su fácil adaptación al medio de soporte biológico implementado en el presente proyecto (geotextil tejido), pues éste suministró las condiciones básicas para la fijación y crecimiento de la biomasa (Ver figuras 43 y 44.)

Figura 43. Análisis microscópico de la biomasa adherida al geotextil



Fuente: El autor, 2006.

Figura 44. Microorganismos identificados en el medio de soporte biológico (geotextil tejido).



Fuente: El autor, 2006.

9. EVALUACIÓN DEL REACTOR

Para verificar la eficiencia de remoción del reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP), se realizaron los siguientes análisis *in-situ*: pH, temperatura y, en el laboratorio, se determinaron parámetros físico-químicos tales como DQO, SS, alcalinidad, ácidos grasos volátiles, Nitrógeno total y fósforo total.

9.1 METODOLOGÍA DEL MONITOREO²⁹

Para poder evaluar correctamente la eficiencia del reactor, fue necesario realizar un muestreo compuesto tanto a la entrada del reactor (Tanque 14, o de homogeneización de caudales), como a la salida del mismo (tanque 16B, o sedimentador final), comenzando por el tanque 14 (entrada) y finalizando en el tanque 16B (salida). Para esto se tuvo en cuenta el tiempo de retención del reactor, que para este caso fue de 30.1 horas.

Se tomaron porciones individuales del lixiviado en botellas cada hora y se mezclaron al final del periodo de muestreo. Algunas veces fue necesario combinarlas en una sola botella, de tal manera que todas las porciones de la composición fueran preservadas al momento de recolectarse.

Se combinaron las muestras individuales en volúmenes proporcionales al caudal. Fue suficiente un volumen final de muestra de 2 a 3 L para hacer todos los análisis pertinentes. (Ver figura 45.) La metodología para el análisis de laboratorio y la de preservación de muestras se presentan en el anexo 14 y 15 respectivamente. (Ver figura 46.)

Figura 45. Análisis *in-situ*



Fuente: El autor, 2006.

²⁹ IDEAM, Op. Cit., p.11.

Los monitoreos se realizaron periódicamente después de efectuado el arranque de la planta de tratamiento de lixiviados; esto con el fin de comparar entre la eficiencia alcanzada por la planta original con la planta una vez puesta en marcha con todas las mejoras realizadas en el presente proyecto. Al mismo tiempo se llevó un registro de los datos obtenidos para tener un control del comportamiento del reactor y, de esta manera, determinar la evolución del proyecto.

Figura 46. Análisis físico-químico de laboratorio



Fuente: El autor, 2006.

9.2 CORROBORACION DE LOS CAUDALES DE LIXIVIADOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO

Para la determinación de los caudales de lixiviados que llegan a la planta de tratamiento provenientes del relleno sanitario, y con el animo de hacer una comparación de las mediciones efectuadas el año pasado, se realizaron los aforos en el tanque 14, de acuerdo al procedimiento descrito en el numeral 5.6 del presente proyecto. (Ver tabla 11).

Se realizó una medición para los periodos de altas precipitaciones hacia mediados del mes de mayo de 2005, en la que se encontró, un caudal de 6 LPS a la llegada a la planta (tanque 14), hecho por el cual es recomendable manejar un sistema de alivio de caudales, para el almacenamiento de los lixiviados diluidos en periodos de fuertes lluvias.

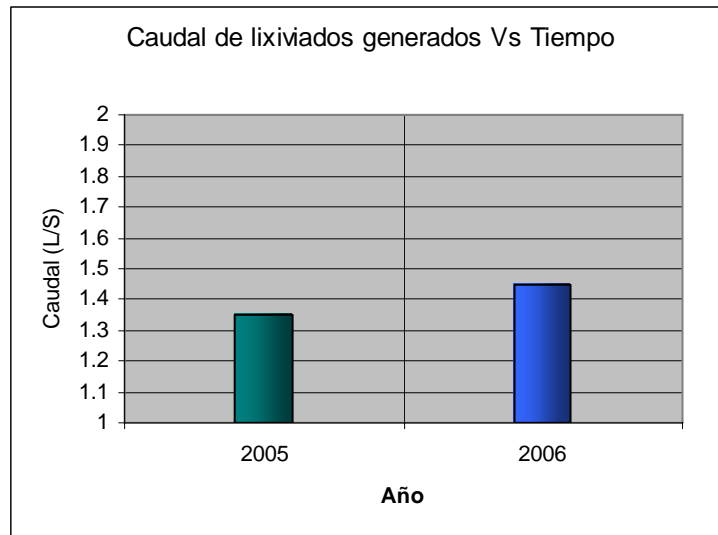
Tabla 11. Aforo de lixiviados generados en el relleno sanitario Enero de 2006.

Punto	Hora	Caudal (LPS)
Tanque 14	1	1.45
Tanque 14	2	1.38
Tanque 14	3	1.38
Tanque 14	4	1.4
Tanque 14	5	1.6
Tanque 14	6	1.55
Tanque 14	7	1.5
Tanque 14	8	1.6

Fuente: El autor, 2006.

De acuerdo a los aforos realizados por el autor en Enero del presente año para el tanque 14, se pudo evidenciar que la cantidad de lixiviados que llegan a la planta de tratamiento de lixiviados no ha variado mucho desde el último aforo realizado en Enero de 2005; se obtuvo un promedio de caudales para este año de 1.48 litros por segundo. La figura 47 muestra claramente la similitud que hay entre los años 2005 y 2006 en cuanto a la generación de lixiviados por el relleno sanitario.

Figura 47. Caudal de lixiviados generados en el relleno sanitario para los años 2005 y 2006.



Fuente: El autor, 2006.

9.3 PRESENTACION DE RESULTADOS

Conforme a lo expuesto anteriormente, se presentan a continuación los resultados obtenidos por el autor en los ensayos de laboratorio citados. Vale la pena recordar que éstos corresponden a los análisis realizados una vez la planta comenzó a operar normalmente, es decir en el momento en el que ésta ya contaba con las mejoras propuestas por el autor. (A partir del 20 de abril del 2006).

Tabla 12. Primera caracterización 20 abril de 2006

PARÁMETRO	UNIDAD	TK 14 IGUALACION PTAR	TK 16B SEDIMENTADOR FINAL
DQO	mg/L	11030	2260
pH **	----	7.27	7.8
Temperatura muestra**	°C	34	31
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	5925	5725
Ácidos grasos volátiles	mg/L CH ₃ COOH	7020	4035
Relación AGV/ALK	----	1.18	0.7

Fuente: El autor, 2006.

Tabla 13. Segunda caracterización 12 de mayo de 2006

PARÁMETRO	UNIDAD	TK 14 IGUALACION PTAR	TK 16B SEDIMENTADOR FINAL
DQO	mg/L	5830	1475
Nitrógeno total	mg/L	13	-----
Fósforo total	mg/L PO ₄ ⁻³	69	-----
pH **	----	7.32	7.76
Temperatura muestra**	°C	33	31.6
Disueltos	mg/L	6374	5316
Disueltos fijos	mg/L	2246	516
Disueltos volátiles	mg/L	4128	4800
Sólidos totales	mg/L	6920	6296
Totales fijos	mg/L	2600	1370
Totales volátiles	mg/L	4320	4926
Suspendidos volátiles	mg/L	192	126
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	4800	6200
Ácidos grasos volátiles	mg/L CH ₃ COOH	2820	2640
Relación AGV/ALK	----	0.58	0.43
Sólidos suspendidos	mg/L	546	980

Fuente: El autor, 2006.

Tabla 14. Tercera caracterización 1 de junio de 2006

PARÁMETRO	UNIDAD	TK 14 IGUALACION PTAR	TK 16B SEDIMENTADOR FINAL
DQO	mg/L	6476	1520
pH **	----	7.05	7.81
Temperatura muestra**	°C	30.1	27
Disueltos	mg/L	7146	4834
Disueltos fijos	mg/L	3444	1166
Disueltos volátiles	mg/L	3702	3668
Sólidos totales	mg/L	7230	4872
Totales fijos	mg/L	3454	348
Totales volátiles	mg/L	3776	4524
Suspendidos volátiles	mg/L	74	46
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	37875	50625
Ácidos grasos volátiles	mg/L CH ₃ COOH	3585	1350
Relación AGV/ALK	----	0.1	0.02
Sólidos suspendidos	mg/L	84	38

Fuente: El autor, 2006.

9.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se discuten los resultados obtenidos en el anterior numeral mediante una comparación gráfica de los valores obtenidos para cada parámetro evaluado.

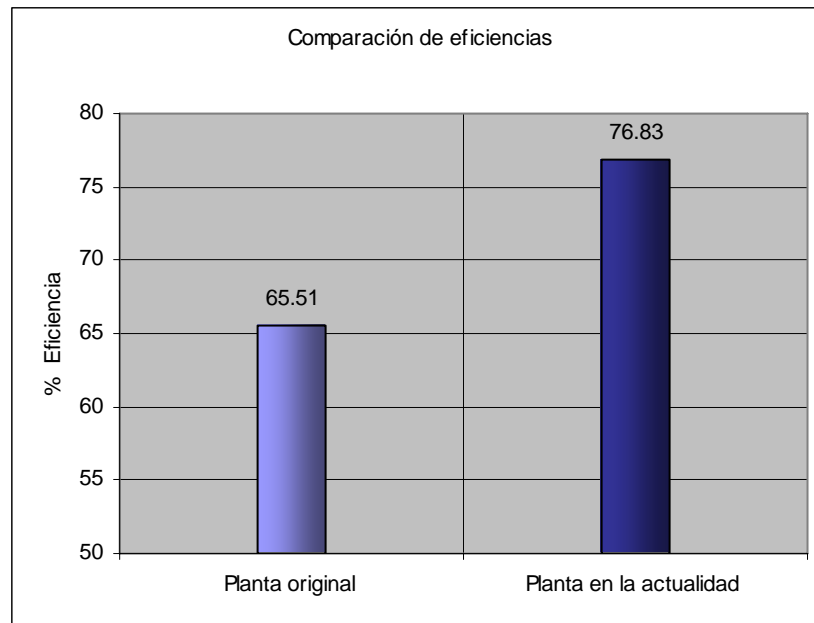
9.4.1 Eficiencia de remoción de materia orgánica de la planta con base en la DQO. La planta original para el tratamiento de lixiviados, funcionaba como un pozo séptico de acuerdo a las estructuras con las que contaba, las cuales consistían en una serie de cámaras sin ningún medio de soporte biológico, sin ninguna adecuación a la estructura interna y con un deficiente sistema de bombeo.

Conforme a lo anterior la eficiencia alcanzada por la planta bajo estas condiciones era de un 65% con relación a la DQO. (Ver figura 48.)

Una vez efectuadas todas las mejoras a la planta y realizado el arranque para la misma (adecuación de muros internos, instalación del medio de soporte biológico, optimización del sistema de bombeo e inoculación del reactor, entre otros), la eficiencia promedio alcanzada en la actualidad, de acuerdo a las tres caracterizaciones presentadas en el numeral 9.3, es del 76.83% con relación a la DQO. (Ver figura 48.)

Es notorio el ascenso en la eficiencia en remoción de materia orgánica en apenas un (1) mes de arrancado el sistema con las mejoras efectuadas. Generalmente, otras experiencias manifiestan periodos de arranque de seis (6) meses a un año conforme a lo enunciado en el numeral 3.3 del presente proyecto. (Ver figura 49.) Esto se debe a que el medio de soporte biológico, como su nombre lo indica agiliza la formación de más biomasa, además de retenerla en las cámaras correspondientes evitando su arrastre fuera del sistema.

Figura 48. Comparación de eficiencias planta original y planta en la actualidad



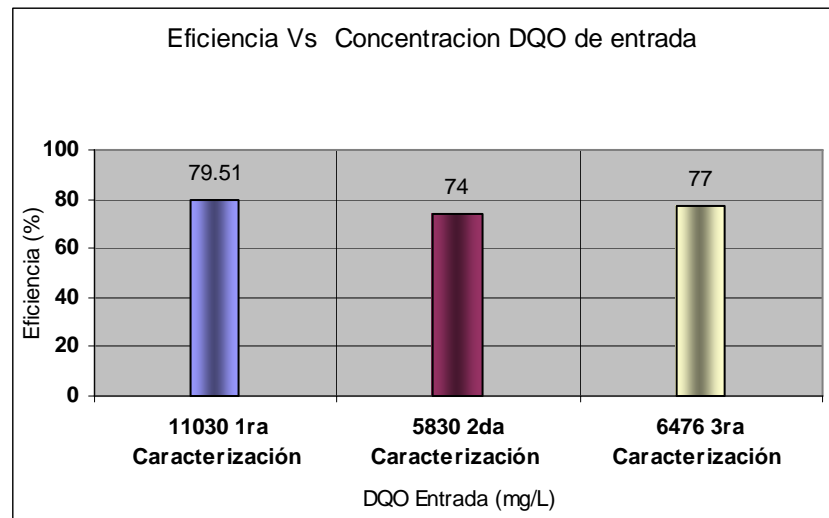
Fuente: El autor, 2006.

La figura 48, indica que en un periodo de tres meses las eficiencias de remoción de DQO, oscilaron entre el 74 y el 79 %. De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede decir que los porcentajes de eficiencia encontrados se mantienen en un mismo rango, independientemente de la concentración de DQO a la entrada del reactor.

9.4.2 Remoción de sólidos suspendidos. Conforme a la gráfica 50, los resultados de remoción para sólidos suspendidos en la segunda caracterización se vieron afectados, en gran medida, mostrando un aumento de los mismos a la salida del reactor, debido a que en determinadas oportunidades, los operarios de la planta, luego de arrancado nuevamente el sistema, bombeaban aleatoriamente mas caudal que el recomendado encendiendo la bomba de la unidad original cuyo caudal es de 9 LPS. Adicional a esto no existe en el momento ningún aliviadero o

sistema de *by-pass* que desvíe cualquier exceso de flujo superior al caudal de operación recomendado en éste documento, cual es como máximo de 2.6 LPS, es decir, el caudal máximo de las nuevas bombas instaladas. Esto genera un aumento tanto de las cargas contaminantes, como de las hidráulicas hacia el reactor. En el primer caso los volúmenes efectivos del reactor no alcanzan a retener los suficientes microorganismos que degraden la materia orgánica y, por otro lado, se ejerce un arrastre de la biomasa con el aumento de los caudales y por ende de la carga hidráulica. Lo anterior se pudo evidenciar en el descenso de la eficiencia para el reactor en términos de DQO, como lo muestra la figura 49.

Figura 49. Eficiencia obtenida por el reactor a diferentes concentraciones de DQO en el afluente.



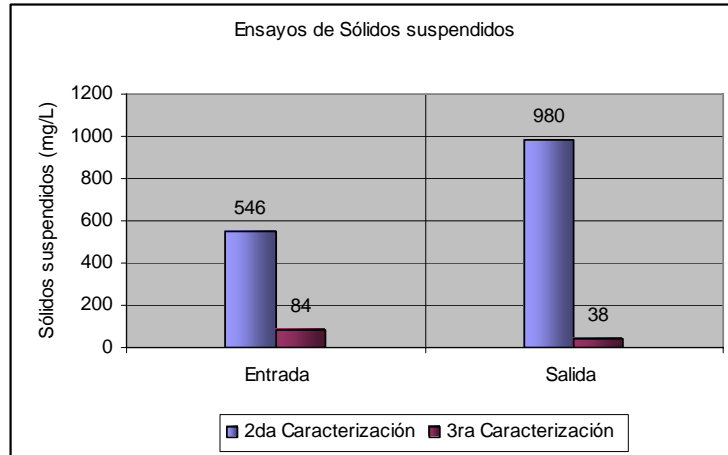
Fuente: El autor, 2006.

Para la tercera caracterización se observó, una disminución de sólidos suspendidos a la salida del reactor, a diferencia de los valores obtenidos en la segunda caracterización, en la cual éstos aumentaban. Los bajos valores de sólidos suspendidos a la entrada del reactor para esta caracterización obedecen a las razones expuestas en el párrafo anterior, sumado a una dilución en un periodo de altas precipitaciones, horas antes del muestreo. Si no se presentaron altas concentraciones de sólidos a la salida, se podría decir que momentos antes la dilución fue tal que desde el afluente se rebajaron los sólidos y hubo un gran arrastre inicial de ellos (lavado de biomasa)* de tal manera, que cuando se muestreo la concentración de este parámetro ya había bajado lo suficiente. Sin embargo se mantuvo una cierta concentración de microorganismos activos sobre

* Generalmente la biomasa arrastrada por efectos de altas cargas hidráulicas se presenta cuando ésta es débil, esta enferma o son simplemente sólidos suspendidos no volátiles.

el geotextil que lograron degradar la materia orgánica lo suficiente como para no disminuir notoriamente la eficiencia.

Figura 50. Comportamiento de los sólidos suspendidos para el reactor



Fuente: El autor, 2006.

9.4.3 Parámetros de control de operación. Como ya se mencionó en el numeral 3.3.1.1, entre los factores que afectan la operación normal de los reactores anaerobios se encuentran: el pH, la temperatura, los requerimientos nutricionales y la relación ácidos grasos volátiles/alcalinidad, indispensables para el buen desempeño del reactor; por lo tanto a continuación se hace un análisis de los resultados obtenidos de estos factores.

9.4.3.1 Relación ácidos grasos volátiles/alcalinidad. De acuerdo a la grafica N. 50, la relación AGV/ALK para el reactor en la primera caracterización, indica una acidificación dentro del mismo, con lo que se esperaba una caída en la eficiencia de acuerdo a lo expuesto en el numeral 3.3.1. Esto no es congruente con los resultados de eficiencia obtenidos en términos de DQO para esta misma caracterización, ya que se presentó la eficiencia más alta entre las tres caracterizaciones. (Ver gráfica 48.)

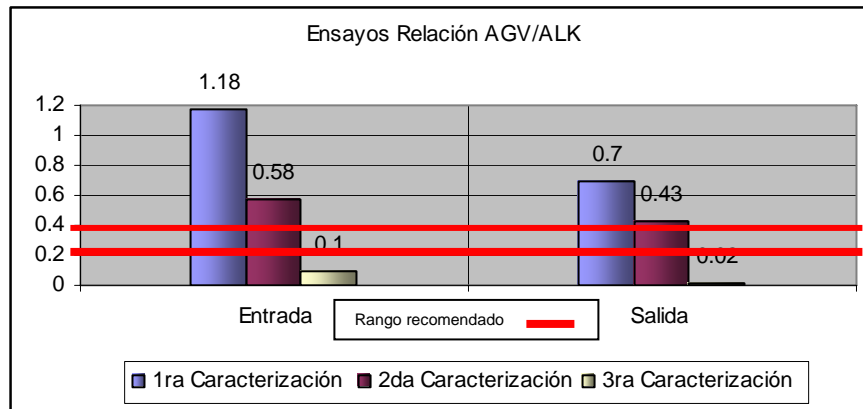
El hecho de que se haya presentado el mayor porcentaje de remoción de DQO en esta caracterización y bajo estas condiciones, puede ser atribuido a una estabilización propia del sistema, debido a un efecto de dilución, presentado por una sobrecarga de caudal sobre el reactor para un periodo de altas precipitaciones por la no existencia de un aliviadero como ya se explicó en el numeral anterior.

Esto se manifestó con un descenso notorio de la relación AGV/ALK en la salida del reactor lográndose un valor de 0.7, muy cercano al ideal conforme se explico en el numeral 3.3.1.1 del presente documento.

Por otra parte, para la segunda y tercera caracterización se obtuvo un comportamiento mas ajustado a la relación ideal AGV/ALK. De aquí que se tiene para la segunda caracterización valores ligeramente por encima de 0.4, con lo que la eficiencia disminuyo en tan solo un 4 %, lo cual no es significativo.

Para la tercera caracterización esta relación se mantuvo dentro del rango recomendado (0.2-0.4) por lo que se aumento levemente la eficiencia con respecto a la anterior caracterización en un 3%. (Ver figura 51.)

Figura 51. Relación ácidos grasos volátiles Vs alcalinidad en el afluente y efluente del RAP.

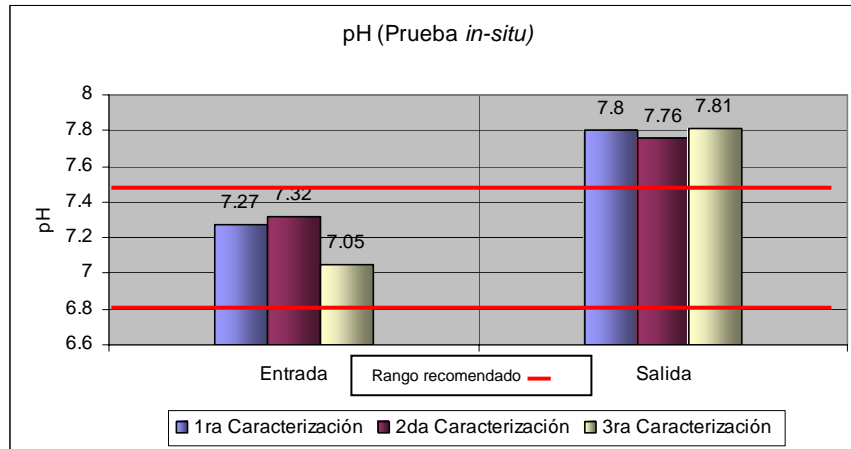


Fuente: El autor, 2006.

9.4.3.2 pH. Conforme a los datos recopilados de pH medidos *in-situ*, éstos se encuentran dentro de los rangos recomendados (6.8-7.5), por lo que no habría necesidad de agregar un álcali para evitar la acidificación del reactor. Las condiciones normales de pH para el buen funcionamiento del sistema se mantienen dada la característica *buffer* o tampón presentada, lo cual también se corrobora con la baja relación AGV/ALK, a partir de mayo de 2006 o sea, a los 30 días de arrancado el sistema con la unidad de bombeo optimizada.

Cabe anotar que dentro del proceso de digestión anaerobia un incremento del pH desde la entrada hasta la salida del reactor, obedece a la acción de las bacterias metanogénicas que fijan el hidrogeno libre en moléculas de metano, neutralizando así, su influencia del pH del efluente. (Ver figura 52.)

Figura 52. pH (Prueba *in-situ*)



Fuente: El autor, 2006.

9.4.3.3 Temperatura. Acorde a los valores obtenidos de temperatura, medidos *in-situ*, se puede decir que este factor estuvo siempre ajustado al rango mesófilo ideal donde las bacterias metanogénicas actúan mejor para realizar la digestión anaerobia, es decir, de 30 a 35°C, como ya se mencionó en el numeral 3.3.1.1 del presente proyecto. (Ver figura 53.)

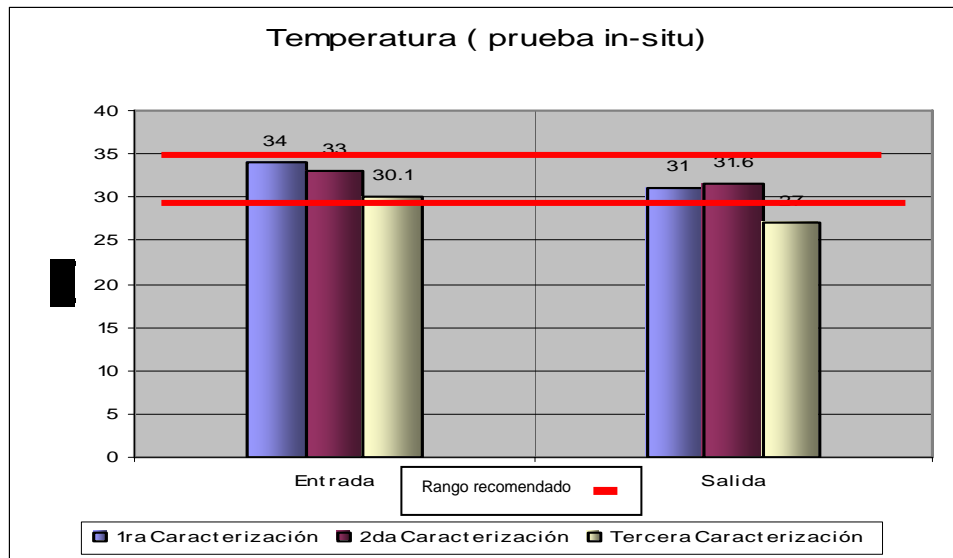
Cabe anotar que los valores de temperatura, tenderían a aumentar desde la entrada hasta la salida, debido a las reacciones bioquímicas que se dan durante el proceso de la digestión anaerobia de la materia orgánica presente en los lixiviados.

Durante la descomposición de los residuos sólidos al interior de los domos; se presenta un incremento considerable de la temperatura el cual es transferido a los lixiviados. Por tanto éstos mantienen una temperatura elevada al momento de ingresar a la planta.

Para la planta en estudio se presenta una temperatura elevada a la entrada y una disminución a la salida de la planta, ya que la ganancia de calor ocasionada por las reacciones bioquímicas que se dan en el reactor, no alcanzan a mostrar aumento de temperatura alguno debido al recorrido que maneja el lixiviado desde el reactor biológico, (tanques 15A, y 15B), hasta el sedimentador final (aproximadamente 15 metros), lo cual alcanza a generar una disminución de la temperatura en el efluente por el intercambio calórico con el entorno.

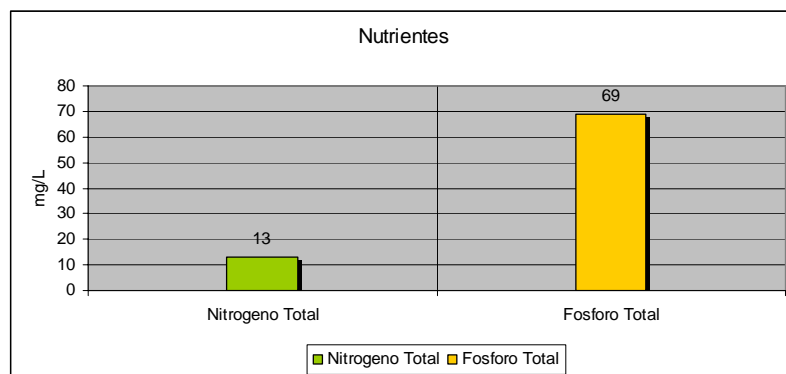
9.4.3.4 Nutrientes. El análisis de los requerimientos nutricionales para el desempeño de reactores anaerobios esta ligado a la concentración en mg/L de DQO, con respecto al fósforo y al nitrógeno en una relación por el orden de los 350:5:1; es decir, por cada 350 partes (o kg/d), por ejemplo de DQO, debe haber 5 partes (o Kg/d) de N y 1 parte (o kg/d) de P, como ya se mencionó en el numeral 3.3.1.1. Con base en lo anterior y de acuerdo a los cálculos realizados por el autor, para el reactor en estudio se tiene que éste presenta una deficiencia en nitrógeno y un buen contenido de fósforo. (Ver anexo 0 y figura 54.)

Figura 53. Temperatura (Prueba *in-situ*).



Fuente: El autor, 2006.

Figura 54. Requerimientos nutricionales del sistema 2da caracterización



Fuente: El autor, 2006.

9.4.4 Estimación de biogás producido por el reactor. Con el fin de estimar el biogás producido dentro del reactor, se llevó a cabo el cálculo de éste a partir de la carga orgánica removida por el reactor y la actividad microbiana lograda por las bacterias metanogénicas.

La estimación de biogás en forma de CH_4 , producido por el reactor se puede estimar partiendo de la siguiente relación: 1 kg DQO Removido= (0.35 m³ de CH_4)³⁰.

Con lo anterior y con las siguientes condiciones para el reactor en estudio se tiene una producción de 371.07 m³ CH_4 /día. (Ver anexo P.)

9.4.5 Estimación de lodos producidos por el reactor. La estimación de lodos producidos dentro del reactor, al igual que para el biogás obedece a la carga orgánica removida por éste y a la actividad microbiana lograda por las bacterias metanogénicas.

Según experiencias similares cuando un reactor se encuentra estabilizado, del 10 al 12 % de la DQO removida, representa la producción de lodos en base seca. Como el reactor en estudio está en la etapa de arranque aún sin estabilizar se puede asumir un 5% de la DQO removida como el lodo producido en base seca, debido a que no es un reactor estabilizado.

Como los lodos biológicos presentan un valor típico de humedad del 98 %, se puede decir que la fracción de DQO removida, que es convertida en lodo, es tan solo el 2% de la cantidad de lodo en base húmeda.

De acuerdo a lo anterior la cantidad de lodos en base seca, generados para el reactor es de 55.66 kg/día, y la cantidad de lodos producidos en base humedad es de 2783 kg/día, con lo que se espera un volumen de lodos de 2.5 m³/ día. (Ver anexo Q.)

30 DIAZ, Op. cit., p.115..

10. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS RELLENO SANITARIO DON JUANITO

El presente documento da a conocer el manejo y cuidados que se deben tener en cuenta para operar correctamente la planta de tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario Don Juanito. Las unidades de tratamiento del reactor implementado se pueden observar en el plano general del sistema que se presenta al final del presente manual.

10.1 ARRANQUE O PUESTA EN MARCHA

Se denomina puesta en marcha, al periodo de tiempo durante el cual la biomasa anaerobia se adapta a la cantidad y calidad de las aguas residuales que debe tratar. Es una etapa inestable y crítica cuya duración puede oscilar entre un mes y un año o más, dependiendo del inóculo, las características del agua residual y de la estrategia de arranque utilizada.

La duración de la etapa de arranque está definida por el periodo de tiempo necesario para obtener una calidad constante del efluente y una masa de lodo que no varíe cualitativamente con el tiempo.

Se identifican el final del proceso de arranque en lo que respecta a la biomasa, con la aparición del fenómeno de granulación y/o la formación de biopelícula estable.

Se pueden definir dos etapas en el proceso de arranque para este reactor:

- Adaptación primaria y crecimiento de bacterias degradadoras de los ácidos grasos volátiles.
- Formación de una biomasa anaerobia metanogénica activa.

10.1.1 Proceso de inoculación. El tiempo para el arranque del reactor será corto, si se hace un proceso de inoculación; este inóculo debe tener una alta actividad metanogénica específica, y estar adaptado a los sustratos presentes en el agua residual.

La actividad metanogénica es una característica que indica la capacidad de la biomasa para transformar la materia orgánica en metano; se define como la masa de sustrato en forma de DQO que es convertida a metano por unidad de biomasa y por unidad de tiempo, lo cual se expresa con las siguientes unidades: gDQO-

CH₄/gSSVdía. Los valores recomendados para que un lodo tenga una buena actividad metanogénica y puedan servir como inóculo oscilan entre 0.2-1.0 gDQO/SSVdía.

La inoculación se debe realizar sobre el tanque 14A, es decir, en la primera cámara donde llegan las aguas bombeadas del tanque 14. (Ver figura 36.)

Una manera de garantizar homogeneidad y una correcta distribución de los lodos dentro del reactor desde el momento en que se inicia su inoculación, es el alimentar el reactor por cochadas para evitar un bombeo continuo que arrastre el lodo inoculado hasta la última cámara (sedimentador). Se recomienda realizar el proceso de inoculación del reactor usando caudal de operación bajo. En la medida en que se bombee se va inoculando paulatinamente sobre el tanque 14 A.

10.1.2 Operación del reactor en el arranque. La etapa de arranque del reactor se inicia luego de inoculada la planta. La manera de operar el reactor después del proceso de inoculación, consiste en disminuir el caudal de operación a por lo menos la mitad (1.3 LPS) de manera tal que las cargas volumétricas se vean disminuidas para facilitar la adaptación de los microorganismos al sustrato (lixiviado) y su adherencia al geotextil (medio de soporte biológico). Una vez se haya arrancado el reactor se deben ir incrementando las cargas mes a mes, hasta alcanzar las cargas de diseño del reactor.

10.2 REARRANQUE

En caso de que el reactor llegue a sufrir una acidificación completa y sea necesario pararlo, se tendría que volver a arrancar el sistema de acuerdo a lo expuesto en el numeral 10.1.1 del presente manual.

10.3 PARÁMETROS DE CONTROL

Durante el arranque y operación normal del reactor se deben monitorear parámetros como: pH, DQO, alcalinidad, ácidos grasos volátiles, nitrógeno, fósforo, caudal de operación, actividad metanogénica específica del lodo, todo esto con el fin de asegurar condiciones ambientales propicias para garantizar el desarrollo y adaptación de los microorganismos. Cabe anotar que el monitoreo de estos parámetros se deben realizar en el tanque 14 (homogeneización de caudales), salvo la actividad metanogénica específica, ya que este control se realiza con una muestra de lodo tomada de la caja de recogida de lodos del reactor. Si la empresa no se cuenta con los medios para realizar estas pruebas, ésta debe contratar un laboratorio para que realice estas pruebas.

- **pH.** El reactor debe operar en un intervalo de pH entre 6.8-7.5, porque la actividad de la población metanogénica es altamente vulnerable a los cambios de

pH comparada con las demás poblaciones presentes en el lodo. Si no se cumplen los ciclos se puede estar presentando una acumulación de ácidos grasos volátiles lo que produciría una acidificación dentro del reactor lo cual no llevaría a cumplir el proceso de metanogénesis. Se recomienda que el operario de la planta mida este parámetro utilizando el multimetro con el que cuenta el relleno.

- **Nutrientes.** Los requerimientos nutricionales de las bacterias durante el proceso de degradación anaerobia son bajos; la mayoría de las aguas residuales no presentan tal deficiencia. Se espera que el reactor en estudio presente buenas condiciones nutricionales. Vale la pena mencionar que este valor tiene generalmente una relación con la DQO; para microorganismos anaerobios, se encuentra por el orden de los 350:5:1; es decir, por cada 350 partes (o kg/d), por ejemplo) de DQO, debe haber 5 partes (o Kg/d) de N y 1 parte (o kg/d) de P.

- **Relación ácidos grasos volátiles/alcalinidad.** La relación AGV/alcalinidad es un parámetro de utilidad para controlar la acumulación de AGV en reactores anaerobios: un valor de 0.2 indica una excelente capacidad buffer del sistema, con un máximo valor de 0.4. Así, esta relación es utilizada como un indicador temprano de acidificación.

Es importante mencionar que los parámetros anteriormente mencionados, (pH, nutrientes, ácidos grasos volátiles/ alcalinidad) deben ser medidos en el tanque 14, o de homogeneización de caudales, ya que es donde comienza el proceso de tratamiento y es el punto crítico para supervivencia de los microorganismos por la cercanía al reactor biológico (tanques 15A y 15B). Estas mediciones deben ser realizadas por el operario de la planta o por el laboratorio contratado por la empresa.

- **Actividad metanogénica específica.** Como se menciona en el proceso de inoculación, la actividad metanogénica es una característica que indica la capacidad de la biomasa para transformar la materia orgánica en metano; se define como la masa de sustrato en forma de DQO que es convertida a metano por unidad de biomasa y por unidad de tiempo, lo cual se expresa con las siguientes unidades: gDQO-CH₄/gSSVdía. Por lo tanto para este reactor el valor recomendado de la actividad metanogénica específica del lodo debe oscilar entre 0.2-1.0 gDQO/SSVdía.

- **DQO.** Ya que el tratamiento implementado es un sistema anaeróbico, la eficiencia del reactor se determina con el monitoreo de la DQO, por lo tanto es indispensable realizar esta medición para conocer el desempeño del mismo. Esta

medición debe también ser realizada por el laboratorio contratado por la empresa en caso de no contarse con los equipos necesarios para realizar esta prueba.

- **Carga volumétrica.** El monitoreo de este parámetro es importante, ya que determina la cantidad de carga orgánica máxima que puede aceptar por unidad de volumen efectivo el reactor. Para este tratamiento se permite una carga máxima de 12 Kg DQO /m³-día. Sin embargo es recomendable bajar este valor para garantizar las reacciones de digestión, y esto se podría lograr, diluyendo el afluente con la misma agua tratada, ó bien disminuyendo el caudal de tratamiento.

El monitoreo de los parámetros de control se debe realizar de acuerdo a lo presentado en la siguiente tabla.

Tabla 15. Parámetros de control para el buen desempeño del reactor

PARAMETROS	FRECUENCIA	VALOR RECOMENDADO	UNIDADES	SITIO
Alcalinidad	Diario	AGV/Alk (0.2-0.4)	mg / L CaCO ₃	Afluente y Efluente
Ácidos grasos volátiles	Diario		mg / L mg/L CH ₃ COOH	
Actividad metanogénica específica	Mensual	(0.2-1.0)	gDQO/SSVdía	Caja de recogida de lodos
DQO	Semanal	DQO : N : P 350 : 5 : 1	mg O ₂ / L	Entrada y Salida reactor
P total	Mensual		mg/L PO ₄ ⁻³	Afluente
N total	Mensual		mg N / L	Afluente
pH	Diario	(6.8 – 7.5)	Unidades	Afluente y Efluente
Temperatura	Diario	(30-35)	° C	Afluente
Caudal de operación	Diario	(2-6.5)	L/s	Afluente

10.4 OPERACIÓN DEL REACTOR

El sistema de tratamiento implementado no necesita de numerosas operaciones para su funcionamiento, ya que el sistema comienza a funcionar una vez se enciendan los equipos de bombeo, instalados en el tanque 14 o de homogeneización de caudales. Las operaciones más importantes para este tratamiento se basan en el control de los parámetros mencionados en la tabla 15.

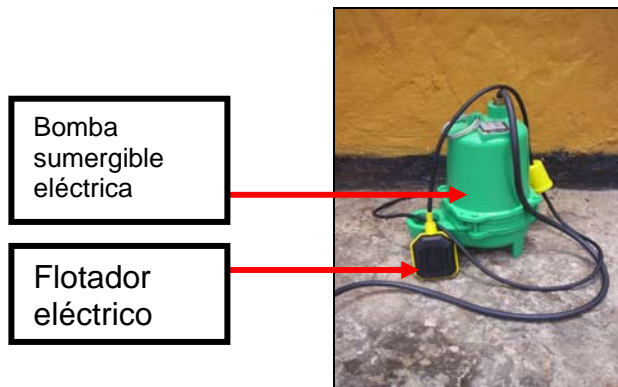
10.5 MANEJO DE PICOS ALTOS DE CAUDALES

En caso de presentarse altos picos de caudales dentro del tanque de homogeneización de caudales (14), en épocas de fuertes precipitaciones, se deben evacuar estos lixiviados en exceso fuera del tanque 14. Esta labor puede llevarse a cabo utilizando las bombas de gasolina (antiguo sistema de bombeo), para enviarlos hacia un sistema de aliviadero de caudales, utilizando para esto un conjunto de tanques plásticos de 10 m³ ubicados al costado del tanque 14, con el fin de almacenar estos lixiviados hasta cuando finalicen las precipitaciones para luego ser desalojados lentamente hacia el tanque de homogeneización de caudales (tanque 14).

10.6 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

Los equipos que realizan el sistema de bombeo hacia el reactor son bombas sumergibles para aguas negras, marca Barnes, modelo Sc-31, construidas en hierro, de dos pulgadas de descarga, acople con motor eléctrico monofásico de 0.4 HP, para conexión a 110 voltios.

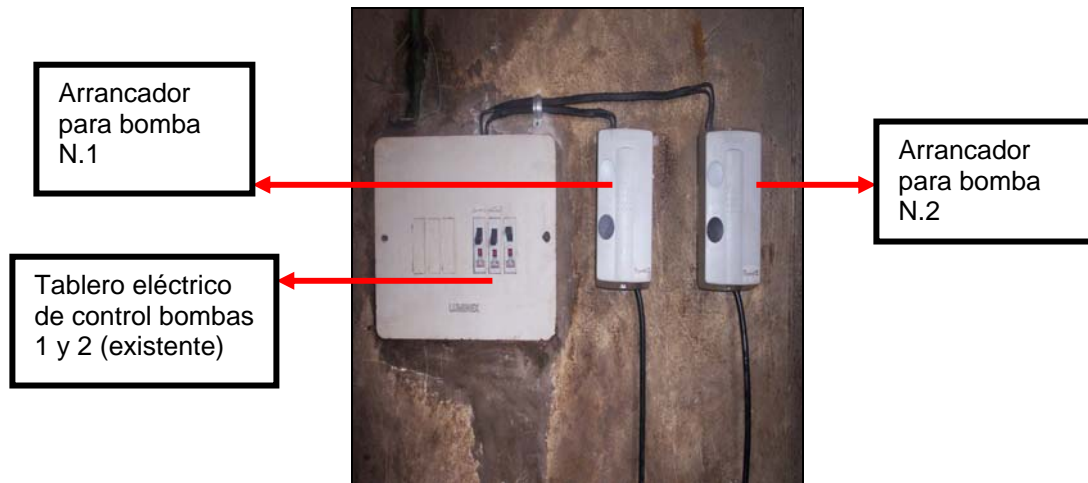
Figura 55. Descripción de los equipos de bombeo



Fuente: El autor, 2006.

Cada bomba cuenta con un arrancador termomagnético directo, marca Siemens de 7/10 amperios a 110 voltios, los cuales se encuentran conectados externamente al tablero eléctrico (Ver figura 56). Adicionalmente cuentan con flotadores eléctricos acompañados a cada bomba, para controlar el bombeo de acuerdo al nivel de lixiviado alcanzado en el tanque 14.

Figura 56. Descripción de los Arrancadores directos del equipo de bombeo.



Fuente: El autor, 2006.

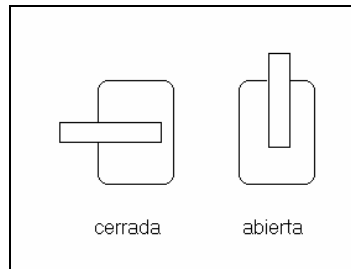
10.7 OPERACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

Como se mencionó en el numeral 10.9, el tratamiento inicia una vez se enciende el equipo de bombeo, por lo tanto representa la principal operación que se debe tener en cuenta para comenzar a operar el reactor.

10.7.1 Encendido de los equipos de bombeo. A continuación se presentan una serie de instrucciones para realizar el encendido de las bombas en el momento de operar la planta:

- Verificar que haya fluido eléctrico encendiendo la bombilla de luz que se encuentra en el cuarto de bombeo.
- Revisar si el taco se encuentra encendido (ON)
- Observar si las conexiones no están sueltas (tomas de seguridad), cables fracturados entre otros.
- Verificar que la manguera de bombeo no se encuentre doblada o enredada.
- Cerrar el registro de la bomba que no va a utilizar como lo indica la siguiente figura.

Figura 57. Posición de Apertura y cierre de válvulas del sistema de bombeo



Fuente: El autor, 2006.

- Por último encender la bomba desde los arrancadores, los cuales tienen un dispositivo de encendido con las descripciones ON y OFF, que se tienen para cada bomba; oprima ON a la bomba que desee utilizar, en caso de tener que parar el bombeo oprima OFF.

10.8 PLAN DE CONTINGENCIAS PARA LA OPERACIÓN DEL REACTOR

El plan de contingencias contiene las acciones correctivas que se deben implementar en caso de presentarse una situación desfavorable para el correcto desempeño de la planta de tratamiento de lixiviados. En virtud de lo anterior a continuación se presentan las acciones correctivas para los parámetros ambientales que se deben tener en cuenta en este tipo de tratamiento.

- **pH.** El reactor debe operar en un intervalo de pH entre 6.8-7.5, en caso de encontrarse un valor de pH mayor a 7.5 es recomendable agregar un agente ácido como por ejemplo ácido fosfórico o ácido sulfúrico siendo el primero el más recomendable por servir como fuente de fósforo, para cumplir la relación:

DQO: N: P \longrightarrow 350:5:1

En caso de encontrarse un valor de pH menor a 6.8, es aconsejable aplicar un agente álcali como soda cáustica (NaOH) hasta alcanzar el rango recomendado en la tabla 15.

Para calcular las cantidades que hay que agregar tanto de ácido como del álcali es necesario llevar a cabo un ensayo de Jarras para determinar las dosis que deben ser aportadas al sistema para mantenerlo dentro del rango deseado. El ensayo debe realizarse de la siguiente manera:

1. Tomar un volumen de muestra conocido del lixiviado (1 Litro) del tanque 14
2. Medir para esta muestra el pH

3. Una vez medido el pH, se determina el agente neutralizante a emplear soda cáustica (NaOH), si el pH se encuentra por debajo de 6.8, o bien, ácido sulfúrico (H₂SO₄), o fosfórico (H₃PO₄), si el pH se encuentra por encima de 7.5
4. Cuando se determine el agente neutralizante se comienza por agregar de apoco éste sobre la muestra de lixiviado tomada, mientras se agita y se mide el pH, hasta llegar al rango deseado (6.8-7.5)
5. Se debe anotar el valor de neutralizante gastado, con el fin de poder determinar la cantidad requerida para agregar al tanque 14.
6. Para calcular el volumen de neutralizante se emplea una regla de tres, sabiendo que :

$$VOLUMEN_{(NETRALIZANTE)} = VOLUMEN.TK.14.EN.EL.MUESTREO * VOL.AGENTE.CONSUMIDO.$$

Este ensayo deberá ser realizado por el operario de la planta con la orientación del ingeniero jefe de relleno.

- **Nutrientes.** Aunque se espera que el reactor presente buenas condiciones nutricionales puede presentarse déficit de nitrógeno o fósforo dependiendo de la variación en las características del lixiviado. Para determinar los requerimientos nutricionales del sistema se debe tener en cuenta la relación: 350:5:1; es decir, por cada 350 partes (o kg/d), por ejemplo de DQO, debe haber 5 partes (o Kg/d) de N y 1 parte (o kg/d) de P. En caso de presentarse un déficit de nitrógeno se hace necesario aplicar urea, por otra parte al encontrarse una deficiencia en fósforo, se debe agregar ácido fosfórico hasta satisfacer dicha relación.
- **Relación ácidos grasos volátiles/alcalinidad.** La relación AGV/alcalinidad es un parámetro de utilidad para controlar la acumulación de AGV en reactores anaerobios: un valor de 0.2 indica una excelente capacidad buffer del sistema, con un máximo valor de 0.4. En el caso de que se presente un valor de esta relación por encima del rango recomendado para este tratamiento, se puede diluir el afluente con la misma agua tratada usando un *By-pass* que recircule el agua tratada hasta el tanque 14 o de homogeneización de caudales.
- **DQO.** Ya que el tratamiento implementado es un sistema anaeróbico, la eficiencia del reactor se determina con el monitoreo de la DQO, por lo tanto es indispensable realizar esta medición tanto en el tanque 14 (de homogeneización de caudales) como en el 16B (sedimentador final) para conocer el desempeño del mismo.
- **Carga volumétrica.** El monitoreo de este parámetro es importante, ya que determina la cantidad de carga orgánica máxima que puede aceptar por unidad de volumen efectivo el reactor. Para este tratamiento se permite una carga máxima de 12 Kg DQO /m³-día. Sin embargo es recomendable bajar este valor para

garantizar las reacciones de digestión, y esto se podría lograr, diluyendo el afluente con la misma agua tratada, ó bien disminuyendo el caudal de tratamiento.

10.9 PLAN DE CONTINGENCIA PARA LOS EQUIPOS DE BOMBEO

Como se mencionó anteriormente, los únicos equipos utilizados en la operación del reactor son las bombas sumergibles, y ya que el tanque de bombeo cuenta con dos bombas sumergibles, en caso de que una se encuentre dañada la otra puede cumplir con el trabajo de ésta. La tabla 16 muestra los posibles daños que se presentan para los equipos y la manera de solucionarlos.

Tabla 16. Problemas frecuentes de los equipos de bombeo

SI LA BOMBA NO ENCIENDE	
POSIBLE CAUSA	SOLUCIÓN
No hay electricidad	Verifique que halla fluido eléctrico encendiendo la bombilla de luz que se encuentra en el cuarto de bombeo
El cable se encuentra fracturado	Revisión por parte del técnico electricista
Las conexiones del arrancador están sueltas	Revisión por parte del técnico electricista
La toma de seguridad esta suelta	Conectar y asegurar la toma
El nivel del lixiviado no es el suficiente para que la bomba encienda	Esperar el nivel adecuado
La conexión interna de la bomba esta suelta	Revisión por parte del técnico electricista
La bomba se encuentra dañada	Envío a mantenimiento

10.10 MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO

Antes de comenzar cualquier labor de mantenimiento o reparación en las bombas, cierre la válvula de la descarga y desconecte la corriente.

Debido a que el motor es del tipo por aceite, no se necesita otro tipo de lubricación o trabajo de mantenimiento. Estas bombas generalmente son muy confiables en su operación y en la mayoría de los casos pueden durar funcionando sin contratiempos durante muchos años.

Sin embargo como cualquier equipo mecánico, debe efectuarse un mantenimiento preventivo que incluya:

- Revisión de la carcasa del motor y cámaras que contengan aceite para verificar su nivel y contaminación
- Inspección del estado del impulsor y cuerpo para estado de desgaste o atascamiento

- Revisión del motor y rodamientos
- Verificación de desgaste y fugas del sello y diafragma

Es importante mencionar que este mantenimiento debe realizarlo el operario de la planta con instrucciones del ingeniero jefe de relleno, con una frecuencia mensual debido a que estos equipos están en constante funcionamiento.

10.11 MANTENIMIENTO DEL REACTOR

El mantenimiento del reactor consta básicamente de la purga de los lodos que se generan en sistema de tratamiento.

De acuerdo a lo anterior y según los cálculos estimados para la producción de lodos en el reactor, se estima que con 110 días de operación del sistema, la planta se llenará completamente de lodos, hecho por el cual se hace necesario hacer una purga de lodos mensualmente en cada una de las cajas de recogida de lodos, tanto del reactor como de los sedimentadores.

Para realizar la retirada de los lodos se deben desocupar los tanques 14 A, 14B, 16A, 16B, ya que estas unidades cuentan con sistema de recogida de lodos. El lixiviado sobrenadante se debe extraer de las unidades, con ayuda de equipos de bombeo, hasta lograr el nivel alcanzado por los lodos. Esto se puede hacer introduciendo una vara graduada (metros) para determinar la máxima cantidad de lixiviado que se debe evacuar para no dañar los equipos de bombeo debido la introducción de lodo en los equipos.

Una vez alcanzado el nivel de lodos se hará necesario la evacuación de estos con la ayuda de palas y baldes hasta completar su evacuación, asegurando dejar un nivel de lodos en estos tanques de aproximadamente 30 cm. para evitar un desequilibrio en el sistema por pérdida de biomasa. Esta operación se hará de esta manera, hasta que la empresa decida realizar la implementación del sistema de tolva que facilita esta labor. Una vez evacuados los lodos en exceso, es necesario llevarlos a un sistema de deshidratación para luego ser dispuestos sobre los domos de disposición actual.

11. CONCLUSIONES

El acompañamiento en la etapa final de la construcción del reactor biológico se desarrolló en un periodo de 8 meses, tiempo durante el cual se construyó, por recomendación del presente proyecto, una pantalla al interior del sedimentador final como medida correctiva para eliminar el corto circuito que se estaba presentando al interior de éste. Al mismo tiempo se adecuaron los muros internos con los que contaba la planta original con el fin de permitir un régimen de flujo a pistón para los lixiviados. Durante este proceso se recomendó, adicionalmente, la construcción de tolvas para facilitar la extracción de los lodos producto del proceso biológico, pero la empresa hizo caso omiso a esta consideración y hoy día todavía cuenta con problemas para la extracción de dichos lodos.

El medio de soporte biológico seleccionado fue el geotextil tejido T 1050 de PAVCO, el cual presentó buenos resultados de adherencia de biomasa; conforme al análisis microscópico realizado a éste, se encontraron cocos, bacilos, cocobacilos de tipo Gram positivos y Gram negativos, lo cual refleja su fácil adaptación sobre este material.

Una mes después de efectuadas todas las mejoras a la planta y realizado el arranque para la misma (adecuación de muros internos, instalación del medio de soporte biológico, optimización del sistema de bombeo e inoculación del reactor), la eficiencia en remoción de materia orgánica fue del 79.51% (basada en la DQO); esto se debe a que el medio de soporte biológico, como su nombre lo indica, agiliza la formación de más biomasa, además de retenerla en las cámaras correspondientes evitando su arrastre fuera del sistema.

La eficiencia promedio alcanzada en la actualidad de acuerdo a las tres caracterizaciones realizadas es del 76.83% (basada en la DQO). De acuerdo a los resultados obtenidos en dichas caracterizaciones, se puede decir que los porcentajes de eficiencia encontrados se mantienen dentro de un rango del 74 al 79 %, independientemente de la concentración de DQO a la entrada del reactor. Esto podría dar a entender que el sistema mantiene un equilibrio; a pesar de la variación de concentraciones entrantes, el sistema mantendrá la biomasa necesaria dentro del reactor, y el resto (biomasa débil o no adaptada) saldrá del mismo o se depositará en el fondo.

Los resultados de remoción de sólidos suspendidos dentro del reactor, se ven seriamente afectados, debido a la mala operación de la unidad de bombeo, por parte de los operarios, ya que en muchas oportunidades bombean aleatoriamente mas caudal que el recomendado, encendiendo la bomba de la unidad original cuyo caudal es de 9 LPS. Esto se hace generalmente cuando se presentan fuertes precipitaciones y por no contar con un aliviadero o sistema de *by-pass* que desvíe cualquier exceso de flujo superior al caudal de operación recomendado. Esto genera un aumento tanto de las cargas contaminantes, como de las hidráulicas hacia el reactor.

Otra razón por la cual los sólidos suspendidos se ven afectados a la salida del reactor obedece a la falta de un sistema de tolva, que garantice un buen manejo y distribución de los sólidos dentro del reactor.

La optimización del sistema de bombeo trajo consigo varios beneficios para el sistema implementado, las cuales implicaron un aumento en el tiempo de retención de 8.7 horas a 30.39 horas, una disminución de la carga hidráulica de $1.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ a $0.52 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$ ajustándose al rango recomendado para este tipo de tratamiento ($0.4\text{-}1.3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-h}$), una disminución de la carga volumétrica de $44.78 \text{ Kg DQO /m}^3\text{-día}$ a $16.30 \text{ Kg DQO /m}^3\text{-día}$ ajustándola también al rango recomendado para este tipo de tratamientos ($35 \text{ Kg DQO /m}^3\text{-día}$) teniendo en cuenta reactores de lecho expandido y alta tasa aunque éste no sea el caso. Esto ultimo lleva a pensar que el reactor deberá ajustarse aun mas (bajar el caudal o bien la concentración de DQO), con el fin de reducir la carga volumétrica preferiblemente a valores menores a los $5 \text{ Kg DQO /m}^3\text{-día}$, conforme a lo evidenciado en otras experiencias.

Se proporcionó a la empresa Bioagrícola del Llano, las condiciones principales de control y operación de la planta de tratamiento de lixiviados, para proseguir con la fase de estabilización del sistema. Estas condiciones incluyen: control de caudal, niveles de AGV/ALK, niveles nutricionales, pH y temperatura.

12. RECOMENDACIONES

El uso de una rejilla a la entrada del tanque 14 (de homogenización de caudales), minimizaría el escape de sólidos suspendidos del sistema hacia las otras unidades del reactor.

Es conveniente diseñar un aliviadero para el manejo de los lixiviados en épocas de fuertes precipitaciones, de tal manera que los excesos sean enviados a un sistema de almacenamiento de aguas lluvias mas lixiviado, y ahí paulatinamente ser tratados por la planta cuando hayan cesado dichas precipitaciones.

El tanque de homogeneización deberá contar con mecanismos de agitación, para evitar precipitación de partículas y garantizar su suspensión. Esto facilitará las limpiezas que se hacen al tanque con cierta regularidad.

Teniendo en cuenta que las grasas que son retenidas en la trampa de grasas no son retiradas de la unidad, se debe Implementar un sistema para evacuar las grasas, ya que estas pueden pasar al reactor biológico y ocasionar flotación de la biomasa y con ello el escape de la misma del sistema.

Después de realizado el proceso de inoculación, se hace necesario tener a la mano soda cáustica, como medida de contingencia en el caso de que los ácidos grasos volátiles se incrementen, para de esta manera evitar la acidificación del reactor; esto se controlará según los monitoreos constantes realizados para el reactor.

Cabe anotar la importancia del control periódico tanto del afluente como del efluente del agua dentro del reactor por lo que se recomiendan análisis físico químicos regulares, sobre todo en el arranque, que garanticen un buen proceso metanogénico.

En jornadas de mantenimiento de la planta; es deseable dejar una porción de lodo en los tanques 15A y 15B para evitar una inestabilización del sistema por perdida de biomasa. Esta operación podrá tecnificarse haciendo un estudio más exhaustivo de la cantidad de sólidos suspendidos volátiles efectivos presentes en el reactor. Para ello podrá analizarse la cantidad de biomasa adherida sobre el geotextil, tanto en cantidad como en calidad.

Es necesario contar con personal capacitado para cualquier labor que se desarrolle dentro de la planta de tratamiento de lixiviados, ya que en la actualidad el Relleno no cuenta con un operario capacitado en el manejo, control y operación del sistema de tratamiento.

El sistema requiere de una continuo revisión de los factores ambientales que inciden en el comportamiento de los microorganismos y su interacción con la biomasa, de tal manera que exista un control permanente del déficit o exceso de los parámetros de operación correspondientes.

Se hace necesario mantener un monitoreo continuo de la relación alcalinidad y ácidos grasos volátiles a la entrada del reactor, (tanque 14) para evitar una acidificación del mismo.

Para fines de hacer una comparación con la legislación ambiental vigente (Decreto 1594/84 Minagricultura), se hará necesario la estabilización del sistema, lo cual se corroborará con la continua caracterización del afluente y el efluente del reactor.

Vale la pena profundizar en un nuevo diseño de instalación del medio de soporte biológico para aumentar el área específica del geotextil tejido, y por ende la eficiencia del sistema.

Para mejorar la eficiencia del reactor es aconsejable estabilizar el contenido de nutrientes del sistema ya que actualmente se presentan valores de fósforo superiores a los requeridos y a su vez presenta una deficiencia en el contenido de nitrógeno.

Dada la importante cantidad de lodos producida por el sistema de tratamiento, es necesario diseñar un sistema de tratamiento para el manejo de los lodos producidos por la planta; aquí se puede incluir la construcción de un sistema de tolva para facilitar la extracción de los lodos producidos en la planta.

La producción de biogás en el reactor es considerable, por lo tanto, requiere implementar un sistema de aprovechamiento del mismo. Inicialmente se podría pensar en implementar un biofiltro, o bien una unidad para quemar dicho biogás.

Habr  de implementarse un sistema de tratamiento terciario para los lixiviados, como por ejemplo un humedal artificial, para garantizar un efluente con menor carga contaminante y evitar la contaminaci3n de las fuentes receptoras en caso de suspenderse la operaci3n actual de recirculaci3n e irrigaci3n de los mismos hacia los domos clausurados.

BIBLIOGRAFIA

BIOAGRÍCOLA DEL LLANO S.A. ESP. Informe de capacidad y condiciones de operación del sitio de disposición final de residuos sólidos. Julio de 2005.

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA AMBIENTAL. CIIA, Estudio De Alternativas Tecnológicas Para El Tratamiento De Los Lixiviados Generados En El Relleno Sanitario De Villavicencio; Universidad de los Andes. Bogotá. 2003.

DIAZ-BAEZ. Maria consuelo. Digestión anaerobia. Colombia: Unibiblos, 2002.

GULLICKS, Hanks. And CLEASBY, Jim, Water Pollution Control Federation, Trickling Filters and Rotating Biological Contacters. Virginia. 1986.
www.ambientum.com/enciclopedia/residuos.html.

IDEAM. Protocolos para análisis de aguas, toma y preservación de muestras. 2004.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Colombianas para la presentación de trabajos de investigación. Segunda actualización. Santafé de Bogota D.C.: ICONTEC,1996. P

JAIMES Nury. Optimización De La Planta De Tratamiento De Lixiviados Del Relleno Sanitario De Villavicencio Don Juanito. Universidad de la Salle. Bogotá. 2004.

J.GLINN HENRY GARY W. HEINKE. Ingeniería ambiental. México: Prentice Hall, 1999.

MENDEZ, Cesar y RODRIGUEZ, Ingrid: Análisis comparativo entre medios de soporte fijo de plástico, grava y guadua, en reactores anaerobios de flujo a pistón para el tratamiento de aguas residuales domesticas. En tesis de grado para optar el título de Ingenieros ambientales y sanitarios, Universidad de La Salle, 2004.

METCALF Y EDDY, Ingeniería de Aguas Residuales. Tercera edición. Mc Graw Hill. Madrid. 1995.

PINEDA M Samuel Ignacio. Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos. Primera edición. Santa fe de Bogotá, D.C: Panamericana formas e impresos, 1998.

ROBERT L. MOTT, Mecánica de fluidos aplicada. Cuarta edición. Prentice Hall. México. 1996.

SUPERINTENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS. Agosto de 2003

TCHOBANOGLOUS GEORGE. Gestión integral de residuos sólidos. Madrid: Mc Graw Hill, 1994.

http://popayan.gov.co/apc-afiles/relleno_sanitario.doc

ANEXOS

ANEXO A. CAUDAL MANEJADO POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS CON EL SISTEMA DE BOMBEO ORIGINAL

Cálculos:

El caudal se calculó como sigue:

$$Q = V / t$$

Siendo:

Q = Caudal en litros por segundo L/s,

V = Volumen en Litros

T= Tiempo en segundos

De acuerdo a los aforos realizados en el tanque 14, se pudo evidenciar que la cantidad de lixiviados que llegan a la planta de tratamiento de lixiviados se encuentra en un rango de 1.2 a 1.5 litros por segundo.

ANEXO B. TIEMPO DE RETENCIÓN MANEJADO POR ES SISTEMA DE TRATAMIENTO ORIGINAL

Cálculos:

De acuerdo a lo anterior el tiempo de retención se calculo mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{Vol}{Q}$$

Donde:

t = Tiempo de retención

Vol = Volumen del reactor (284.46m³)

Q = Caudal bombeado a la planta (32.4 m³/h)

Por lo tanto el tiempo de retención manejado por la planta de tratamiento es:

$$t = 284.46 \text{ m}^3 / 32.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$t = 8.7 \text{ horas}$$

ANEXO C. CARGA HIDRÁULICA MANEJADA POR EL SISTEMA DE TRATAMIENTO ORIGINAL

Carga hidráulica recomendada ($0.4-1.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)³¹

Cálculos:

$$qh = \frac{Q}{A}$$

Donde:

$$qh = \text{Carga hidráulica en } \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} ; Q = \text{Caudal en m}^3/\text{h}$$

$$A = \text{Área del reactor m}^2$$

$$3.6 = \text{factor de conversión a m}^3/\text{h}$$

Por lo tanto para el reactor se tiene:

$$qh = \frac{9 \text{ L/s} \cdot 3.6}{3.06 \text{ m} \cdot 5.88 \text{ m}}$$

$$qh = \frac{32.4}{17.99}$$

$$qh = 1.8 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

ANEXO D. CARGA SOBRE EL VERTEDERO PARA EL TANQUE 16B, SEDIMENTADOR BIOLÓGICO

La carga sobre el vertedero se calcula para determinar la longitud mínima que debe tener el vertedero en el sedimentador final para evitar el levantamiento de sólidos en el afluente clarificado.

³¹ DROSTE, Ronald L. Theory and practice of water and wastewater treatment. USA. John wily & sons, Inc, 1997. p. 652.

Cálculos:

$$qv = \frac{A}{5 * h}$$

Donde:

qv = Carga sobre el vertedero en m.

A = Área del sedimentador en m^2

$5 * h$ = Cinco veces la altura en m

Por lo tanto para el vertedero que posee el sedimentador diseñado se tiene:

$$qv = \frac{4.03 * 3.06}{5 * 3.15}$$

$$qv = 0.78m$$

Con lo anterior se evidencia que la longitud con la que cuenta el vertedero proporciona la longitud suficiente para evitar dichas sobrecargas, ya que se cuenta con una longitud interna de 3.06m.

ANEXO E. CARGA VOLUMÉTRICA MANEJADA POR EL SISTEMA DE TRATAMIENTO ORIGINAL

Carga volumétrica recomendada (35 Kg DQO m^3 /día)³²

Cálculos:

$$V_L = \frac{Q * []}{V}$$

Donde:

V_L = Carga volumétrica Kg DQO / m^3 -día.

Q = Caudal (m^3 /día) operado por el reactor

$[]$ = Concentración DQO (kg/m^3)

V = Volumen efectivo del reactor (m^3)

Para el reactor en estudio se tiene:

$$V_L = \frac{777.6m^3 / dia * 3.2kg / m^3}{55.56m^3}$$

³² Ibid.,p.654.

$$V_L = 44.78 \text{ kgDQO} / \text{m}^3 * \text{día}$$

ANEXO F. EFICIENCIA ALCANZADA POR EL SISTEMA DE TRATAMIENTO ORIGINAL

Cálculos:

$$\% DQO \text{ removido} = \left[\frac{(DQO_{af\bar{l}} - DQO_{ef\bar{l}})}{DQO_{af\bar{l}}} \right] * 100$$

$$\% DQO \text{ removido} = \left[\frac{3199.2 - 1103.2}{3199.2} \right] * 100$$

$$\% DQO \text{ removido} = 65.51$$

ANEXO G. ÁREA ESPECÍFICA DEL GEOTEXTIL TEJIDO INTRODUCIDO EN LOS TANQUES 15A Y 15B DEL REACTOR

Cálculos:

$$Area \text{ específica del medio } (m^2 / m^3) = \frac{area \text{ del medio}}{volumen \text{ efectivo del reactor}}$$

$$Area \text{ específica del geotextil } (m^2 / m^3) = \frac{5.88 * 2.5 * 118}{5.88 * 2.5 * 3}$$

$$Area \text{ específica del geotextil } (m^2 / m^3) = \frac{1734,6}{44.1}$$

$$Area \text{ específica del geotextil } (m^2 / m^3) = 39,33$$

ANEXO H. PERDIDAS HIDRÁULICAS Y CAUDAL DE OPERACIÓN PARA EL SISTEMA DE BOMBEO IMPLEMENTADO POR EL AUTOR EN EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN AL REACTOR.

Cálculos:

Partiendo de la ecuación de Bernulli se tiene:

$$H_A + H_P = H_B + H_{fT}$$

$$Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + H_P = Z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + h_{fp} + h_{fs}$$

$$\frac{P_A}{\gamma} + H_P = Z_B + \frac{V_B^2}{2g} + \left(f \frac{L}{D} \frac{V_B^2}{2g} \right) + \left(\sum K \frac{V_B^2}{2g} \right)$$

$$H_P = Z_B - \frac{P_A}{\gamma} + \left(\frac{V_B^2}{2g} \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum K \right) \right)$$

Donde:

H_p= Altura dinámica total del sistema en metros

Z_B= Nivel de referencia

P_A= Presión en el punto de succión de la bomba

V_B²= Velocidad del fluido en m/s= 1.2827 m/s

g= gravedad m/s²

= factor de fricción hallado por iteración= 0.023

∑K= Sumatoria de perdidas secundarias = 1.8 m

L= Longitud de la tubería = 7.5 m

D= Diámetro de la tubería = 0.0508 m

Por lo tanto la altura dinámica total para el sistema es:

$$H_P = 5.5m - 1m + \left(\frac{V_B^2}{2g} \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum K \right) \right)$$

$$H_P = 5.02m$$

ANEXO I. CARGA HIDRÁULICA MANEJADA POR EL REACTOR EN LA ACTUALIDAD

Cálculos:

$$qh = \frac{Q}{A}$$

Donde:

qh = Carga hidráulica en $\frac{m^3}{m^2 * h}$; Q = Caudal en m^3/h

A = Área del reactor m^2

3.6= factor de conversión a m^3/h

Por lo tanto para el reactor se tiene:

$$qh = \frac{2.6 \text{ L/s} * 3.6}{3.06m * 5.88m}$$

$$qh = \frac{9.36}{17.99}$$

$$qh = 0.52 \frac{m^3}{m^2 * h}$$

ANEXO J. TIEMPO DE RETENCIÓN MANEJADO POR EL REACTOR EN LA ACTUALIDAD

Cálculos:

$$t = \frac{Vol}{Q}$$

Donde:

t = Tiempo de retención

Vol = Volumen del reactor ($284.46m^3$)

Q = Caudal bombeado a la planta ($9.36 m^3/h$)

Por lo tanto el tiempo de retención manejado por la planta de tratamiento es:

$$t = 284.46 \text{ m}^3 / 9.36 \text{ m}^3/\text{h}$$
$$t = 30.39 \text{ horas}$$

ANEXO K. CARGA VOLUMÉTRICA MANEJADA POR EL REACTOR EN LA ACTUALIDAD

Teniendo en cuenta volumen efectivo del reactor, es decir el volumen ocupado por el medio de soporte biológico.

Cálculos:

$$V_L = \frac{Q * []}{V}$$

Donde:

V_L = Carga volumétrica Kg DQO /m³-día.

Q = Caudal (m³/día) operado por el reactor en la actualidad

[] = Concentración DQO (kg/m³) planta original

V = Volumen efectivo del reactor (m³)

Para el reactor en estudio se tiene:

$$V_L = \frac{224.64 \text{ m}^3 / \text{día} * 3.2 \text{ kg} / \text{m}^3}{44.1 \text{ m}^3}$$

$$V_L = 16.30 \text{ kgDQO} / \text{m}^3 * \text{día}$$

ANEXO L. ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECIFICA LODOS COLANTA PLANTA UHT

El método para determinar la actividad metanogénica específica por parte de los microorganismos, se llevo a cabo por un sistema no agitado de desplazamiento de NaOH, para lo cual se utilizaron recipientes de 0.5 L. El procedimiento a seguir se presenta a continuación:

$$AME = \frac{1}{FC * W * V} * \frac{d.CH_4}{dt} * 24$$

Donde:

AME= Actividad metanogénica específica medida en gDQO/SSVdía

FC= Factor de corrección por presión y temperatura

W= Biomasa (SSV) del lodo Colanta en g/L

V= Vol reactor en litros

dCH₄/dt = M; Pendiente

24= factor de conversión a días

Corrección por presión y temperatura

$$F.C = \left(\frac{P_{local} mmHg}{P_{atmstd} mmHg} \right) * \left(\frac{T^{\circ} atmstd (25^{\circ}C) ^{\circ} K}{T^{\circ} local (^{\circ}K)} \right)$$
$$F.C = \left(\frac{560 mmHg}{760 mmHg} \right) * \left(\frac{298^{\circ} K}{273^{\circ} K + 14^{\circ} C} \right) = 0.76$$

Para el reactor en estudio se tiene:

W= 259.273 g/L

Fc = 0.76

V= 0.5L

M= 0.9523

Por lo tanto la actividad metanogénica específica para el lodo es:

$$A.M = \frac{1}{F.C. * w * V} * \frac{\partial CH_4}{\partial t} * 24$$

AME= 0.23 gDQO/SSVdía

ANEXO M. ACTIVIDAD METANOGÉNICA ESPECIFICA LODOS PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE DON JUANITO

El método para determinar la actividad metanogénica específica por parte de los microorganismos, se llevo a cabo por un sistema no agitado de desplazamiento de NaOH, para lo cual se utilizaron recipientes de 0.5 L. El procedimiento a seguir se presenta a continuación:

$$AME = \frac{1}{FC * W * V} * \frac{d.CH_4}{dt} * 24$$

Donde:

AME= Actividad metanogénica específica medida en gDQO/SSVdía

FC= Factor de corrección por presión y temperatura

W= Biomasa (SSV) del lodo Colanta en g/L

V= Vol reactor en litros

dCH₄/dt = M; Pendiente

24= factor de conversión a días

Corrección por presión y temperatura

$$F.C = \left(\frac{P_{local} mmHg}{P_{atmstd} mmHg} \right) * \left(\frac{T_{atmstd(25^{\circ}C)}^{\circ K}}{T_{local}^{\circ K}} \right)$$

$$F.C = \left(\frac{725 mmHg}{760 mmHg} \right) * \left(\frac{298^{\circ} K}{273^{\circ} K + 25.5^{\circ} C} \right) = 0.9523$$

Para el reactor en estudio se tiene:

W= 100 g/L

Fc = 0.9523

V= 0.5L

M= 0.2

Por lo tanto la actividad metanogénica específica para el lodo es:

$$A.M = \frac{1}{F.C. * w * V} * \frac{\partial CH_4}{\partial t} * 24$$

AME= 0.1 gDQO/SSVdía

ANEXO N. METODOLOGÍA DE LABORATORIO.

Las determinaciones de laboratorio se efectuaron siguiendo los métodos y técnicas estandarizadas y aprobadas por el Standard Methods for Examination of water and Wastewater.

Método de análisis de parámetros en el laboratorio.

PARÁMETRO	TÉCNICA DE LABORATORIO	REFERENCIA
DBO	Incubación 5 días (Oxitop)	SM 5210-BY
DQO	Reflujo Cerrado (Termoreactor)	NANOCOLOR
Alcalinidad Total	Titulometría	SM 2320-B
Ácidos grasos Volátiles	Titulometría	-----
Grasas y aceites	Filtración-reflujo cerrado	SM 5220-D
Tensoactivos (MBAS)	Colorimetría- Azul de Metileno	NANOCOLOR
Sólidos Disueltos Totales	Gravimetría	SM 2540-C
Sólidos totales	Gravimetría	SM 2540-B
Sólidos suspendidos	Gravimetría	SM 2540-D
Nitrógeno total	Espectrofotometría	Nanocolor test 0-89
Fósforo Total	Espectrofotometría	Nanocolor test 8048
Turbidez	Nefelometría	SM 2130-B
Actividad metanogénica específica	Volumétrico Desplazamiento de NaOH	DIAZ-BAEZ, Digestión anaerobia, Bogota: Unibiblos, 2002.Pág. 109.

ANEXO Ñ. PRESERVACIÓN DE MUESTRAS

Los métodos de preservación se llevaron a cabo de acuerdo a los métodos establecidos por el instituto de hidrológica, meteorología y estudios ambientales del IDEAM. Los métodos de preservación incluyeron las siguientes operaciones: control de pH, adición de reactivos, uso de botellas ámbar y refrigeración a 4°C, todo lo anterior con el fin de retardar la acción biológica, retardar la hidrólisis de los compuestos o complejos químicos, reducir la volatilidad de los constituyentes y reducir los efectos de absorción.

En la siguiente tabla se dan los métodos de preservación utilizados para los ensayos realizados en el presente proyecto, así como la estimación del volumen de muestra requerido, el tipo de recipiente sugerido y el tiempo máximo de almacenamiento para las muestras.

Métodos de preservación de muestras.

Determinación	Recipiente	Volumen mínimo de muestra (ml)	Tipo de muestra	preservación	Almacenamiento máximo recomendado
Alcalinidad	*P,V	200	s	Refrigeración	14d*
Sustancias activas al azul de metileno	P,V	250	**s,c	Refrigeración	28d
DBO	P,V	1000	s	refrigeración	48h
DQO	P,V	100	s,c	Análisis inmediato o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH < 2; refrigerar.	28d
Grasas y aceites	V, boca ancha	1000	s,c	Agregar HCl hasta pH < 2, refrigerar.	28d
Sólidos	P,V	200	s,c	Refrigerar	2-7 d

*P= Plástico
 V= Vidrio
 **S= simple
 C= compuesto
 ***d= día

Fuente: IDEAM, 2004.

ANEXO O. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DEL SISTEMA

Cálculos:

Relación:

$$350(DQO)5(N)1(P)$$

Para el reactor en estudio se tiene:

$$DQO = 5830 \text{ mg} / L \text{ Entrada del reactor, por lo tanto:}$$

$$\frac{350\text{mg/L}}{5} = \frac{5830\text{mg/L}}{X}$$

$$X = 83\text{mg/L}$$

$$\frac{350\text{mg/L}}{1} = \frac{5830\text{mg/L}}{X}$$

$$X = 16\text{mg/L}$$

ANEXO P. ESTIMACIÓN DE BIOGÁS PRODUCIDO POR EL REACTOR

La estimación de biogás en forma de CH_4 , producido por el reactor se estima partiendo de la siguiente relación.³³

1 kg DQO Removido= (0.35 m^3 de CH_4)

$$\text{Biogas producido} \left(\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{día} \right) = \text{DQO} \frac{\text{kg}}{\text{día}} \text{Removido} * 0.35 \text{m}^3 \text{CH}_4 *$$

Correccion de presion y temperatura

Para el reactor en estudio se tienen las siguientes condiciones:

DQO Entrada= 6476 mg/L

DQO Salida= 1520 mg/L

Caudal= 224.64 $\text{m}^3/\text{día}$

Carga= Caudal* Concentración

La carga para la entrada del reactor es =1454.7686 Kg/día

La carga para la salida del reactor es= 341.4528 Kg/día

Entonces la DQO removida es = 1113.31 Kg/día

Presión de Villavicencio= 725 mm Hg

Temperatura media de Villavicencio= 25.5 °C

$$\text{Correccion de presion y temperatura} = \left(\frac{725\text{mmHg}}{760\text{mmHg}} \right) * \left(\frac{298\text{K}}{273\text{K} + 25.5} \right) = 0.9523$$

$$\text{Biogas producido} = \text{Carga} * 0.35 * \text{Corrección por presión y temperatura}$$

$$\text{Biogas producido} = 1113.31 * 0.35 * 0.9523$$

$$\text{Biogas producido} = 371.07 \text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{día}$$

³³ Ibid.,p. 630.

ANEXO Q. ESTIMACIÓN DE LODOS PRODUCIDOS POR EL REACTOR

Para el reactor en estudio se tienen las siguientes condiciones:

DQO Entrada= 6476 mg/L

DQO Salida= 1520 mg/L

Caudal= 224.64 m³/día

Carga= Caudal* Concentración

La carga para la entrada del reactor es =1454.7686 Kg/día

La carga para la salida del reactor es= 341.4528 Kg/día

Entonces la DQO removida es = 1113.31 Kg/día

Densidad típica del lodo (ρ) = (1.08 kg/L)³⁴

Producción de lodo en base seca = Kg DQO removida/día*5%

Producción de lodo en base seca =1113.31Kg / día *0.05 = 55.66Kg

Producción de lodo en base húmeda= Kg lodo en base seca/2%

Producción de lodo en base húmeda= 55.66Kg / 0.02 = 2783.28Kg lodo/ día

Volumen de lodo generado= Producción de lodo en base húmeda/ densidad típica del lodo

Volumen de lodo generado=2577,12 L/ día = 2.577 m³/día

³⁴ Wilson F. Design calculation in waste water treatment. New York: E.p. & f.n.Spon, 1981.p.136.

