



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la Costa Atlántica Colombiana

Geinny del Carmen Elena Vásquez Núñez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá, Colombia
2013

Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la Costa Atlántica Colombiana

Geinny del Carmen Elena Vásquez Núñez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

M.Sc., Ingeniero Carlos Julio Collazos Chávez

Línea de Investigación:

Tratamiento anaeróbico de aguas residuales

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Bogotá, Colombia
2013

Dedico este trabajo de grado a DIOS que ha sido mi único sustento en los momentos de desesperación, me ha guiado a través de su espíritu santo para saber qué camino debo seguir y ha derramado de su sabiduría sobre mí para salir adelante.

A mis padres Ubaldo y Martha que me han dado todo el apoyo que he necesitado en todo este tiempo, me han tenido toda la paciencia del mundo para que yo pueda alcanzar esta meta en mi vida y me han brindado su amor para que yo me sienta protegida y respaldada y porque ellos han depositado todo su amor y confianza en mí y les dedico esto porque los amo con todas mis fuerzas.

A mi novio José Gallardo porque he contado con su apoyo en cada etapa de este proceso y porque sus palabras han sido aliento para continuar cada día adelante con este proyecto y le dedico esto porque voy a compartir mi vida, mis sueños, mis esperanzas y mi amor con él.

A mis hermanos que me ha respaldado en todo momento y A mis sobrinos, familiares, jefes, amigos y a mis amigas que han estado conmigo en todo momento y me han dado fuerzas para seguir adelante.

Agradecimientos

La autora del proyecto agradece de manera muy atenta a las siguientes personas e instituciones:

Al profesor Carlos Julio Collazos Chávez por guiarme durante todo el proceso de la realización del proyecto, por sus valiosas asesorías y por el tiempo que invirtió en mí, por tener tanta paciencia, de verdad sin la ayuda de él hubiese sido muy difícil obtener la consecución de mi objetivo.

A la Ingeniería Yiniva Camargo Caicedo, Coordinadora Grupo Técnico Ambiental, de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico, por brindarme información valiosa para el desarrollo de la tesis y apoyarme todo el tiempo.

A la Doctora, Juliette Sleman Chams, Gerente de Gestión Ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico, por facilitarme información relacionada con las empresas, que fueron necesarias para el desarrollo del proyecto.

Al ingeniero Freddy Vargas, Coordinador del área Ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales en Maltería tropical, por facilitarme información necesaria para el desarrollo del proyecto.

A la Ingeniería Eliana Alvarez, de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena, por su gran ayuda en la información presentada.

A la doctora Adriana García, Jefe Área Jurídica Cervecería Águila Bavaria S.A, por su valiosa cooperación y a la Ingeniera Osiris Barraza, Coordinadora del área Ambiental de Bavaria S.A., por facilitarme información necesaria para el desarrollo del proyecto.

Resumen

El presente trabajo busca identificar las plantas de tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia existentes en la Costa Caribe y el potencial de aplicación de dicha tecnología en esa región del país. Se estableció que el número de instalaciones con sistemas anaerobios es bastante reducido en comparación con otras soluciones, pero existe un alto potencial de aplicación, especialmente en lo que se refiere a reactores tipo UASB, los cuales se han posicionado sólidamente en instalaciones industriales. Para el estudio se seleccionaron tres plantas que tratan vertimientos industriales, dos instalaciones para aguas residuales domésticas y una planta para lixiviados de un relleno sanitario. La evaluación de las plantas se hizo con información suministrada por las entidades de control (Corporaciones) y por los mismos propietarios. Aparentemente todas las plantas que funcionan lo hacen de manera satisfactoria, cumpliendo con los límites de vertimiento establecidos, lo cual constituye un factor a favor. De allí que se esté considerando la posibilidad de implementar de manera masiva esta tecnología en diferentes localidades del departamento del Magdalena.

Palabras clave: Tratamiento de aguas residuales, tratamiento anaerobio, reactores UASB, aguas residuales industriales, lixiviados.

Abstract

This work aims to identify plants wastewater treatment anaerobic technology existing on the Caribbean coast and the potential for it's application in this region. It was established that the number of facilities with this technology is quite small as compared to other solutions, but there is a high potential for application, especially in regards to UASB reactors, which have positioned solidly in industrial facilities. For the study, three plants for industrial discharges, two facilities for domestic wastewater and a landfill leachate treatment plant were selected. The assessment was made from information supplied by the control entities (Corporations) and by the same owners. Apparently all plants do work satisfactorily, reaching the limits of discharge, which is a factor in favor. Hence they are considering the possibility of implementing this technology massively in various towns of the Colombian Caribbean Coast.

Keywords: Wastewater treatment, anaerobic treatment, UASBreactors, industrial wastewater,leachate.

Contenido

Resumen	
Lista de figuras.....	XIII
Lista de fotografías	XIV
Lista de tablas	XV
Introducción	1
1 Marco Teórico.....	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Generalidades sobre las aguas residuales	12
1.2.1 Clasificación de las aguas residuales	13
1.2.2 Características de las aguas residuales.....	14
1.2.3 Métodos de tratamiento de las aguas residuales	23
1.3 Tratamiento anaerobio	23
1.4 Subproductos del tratamiento anaerobio	26
1.4.1 Biogás	26
1.4.2 Efluente	28
1.4.3 Lodo	28
1.5 Etapas de la digestión anaerobia	29
1.5.1 Hidrólisis	31
1.5.2 Acidogénesis o fermentación	31
1.5.3 Acetogénesis acidoclasticos	32
1.5.4 Acidogénesis hidrogenoclasticos	32
1.5.5 Metanogénesis hidrogenoclasticos	32
1.5.6 Metanogénesis acetoclasticos	33
1.6 Reactor anaerobio de flujo ascendente a través de un manto de lodo - UASB (Upflow anaerobic sludge blanket)	33
1.6.1 Ventajas del sistema:.....	34
1.6.2 Desventajas del sistema:	34
1.6.3 Tipos de lodos usados en el tratamiento UASB	34
1.6.4 Factores importantes del desempeño de un reactor UASB ¹³	36
1.6.5 Parámetros de diseño.....	40
1.6.6 Materiales de construcción recomendados para reactores UASB.....	41
1.7 Aspectos legales	43
2 Metodología para el estudio	45

2.1	Objeto de investigación.....	45
2.2	Zona de Estudio.....	45
2.3	Recolección de la información	45
2.3.1	Fuentes primarias.....	45
2.3.2	Fuentes secundarias.....	46
2.4	Procesamiento de la información	46
3	Información de las plantas	48
3.1	Relación de Plantas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales en la Costa Norte Colombiana (Santa Marta; Barranquilla y Cartagena).	48
3.1.1	Aguas Residuales Domésticas	48
3.1.2	Aguas Residuales Industriales	48
3.1.3	Lixiviados	49
3.2	Descripción y principales características de las plantas.....	49
3.2.1	PTAR POSTOBÓN (Malambo).....	49
3.2.2	PTAR SANTA ROSA DE LIMA.....	65
3.2.3	PTAR RELLENO SANITARIO LA PALANGANA DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA	83
3.2.4	PTAR Maltería Cartagena	96
3.2.5	PTAR Bavaria Barranquilla.....	107
3.3	Eficiencia de los sistemas de tratamiento	123
4	Análisis y discusión de resultados.....	131
4.1	Criterios y parámetros de diseño	131
4.1.1	Plantas de Aguas Residuales domésticas	131
4.1.2	Planta de Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Palangana.....	132
4.1.3	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales	134
4.2	Condiciones de operación de las plantas.....	134
4.3	Eficiencia de las plantas de tratamiento	139
4.4	Perspectiva a mediano y largo plazo de implementación de tecnología anaerobia en la Costa Norte de Colombia.....	141
5	Conclusiones y recomendaciones	145
5.1	Conclusiones	145
5.2	Recomendaciones	146
6	Bibliografía	151

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1: Flujograma del proceso anaerobio en el tratamiento de aguas residuales de cervecería en Colombia (Collazos, 2000).	5
Figura 1-2. Esquema de la estructura del reactor UASB	7
Figura 1-3: Evolución de la utilización de los reactores UASB	8
Figura 1-4. Esquema de reactor de lecho granular expandido - EGSB	11
Figura 1-5. Situación del mercado de reactores anaerobios de lecho granular	12
Figura 1-6 Etapas del proceso de digestión anaerobia	30
Figura 1-7 Medición de la actividad metanogénica por desplazamiento	39
Figura 1-8 Cromatógrafo de gases para medición de metano	39
Figura 3.1 Diagrama Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales POSTOBON S.A.	50
Figura 3.2 Corte transversal del tanque séptico – FAFA	69
Figura 3.3 Pre- tratamiento proyectado – Vista en Planta y Perfil	70
Figura 3.4 Sistema de Cribado	71
Figura 3-5. Tren de tratamiento anaerobio con reactor UASB, FAFA y filtro grueso de pulimiento de carbón activado	73
Figura 3-6. Reactor UASB – Vista en planta y perfil	75
Figura 3-7. Filtro anaerobio de flujo ascendente proyectado - vista en planta y perfil	79
Figura 3-8. Filtro grueso de pulimiento de carbón activado – Vista en planta y perfil	81
Figura 3-9: Lechos de secado – Vista en planta y perfil	82
Figura 3.10: Localización del Relleno sanitario La Palangana	83
Figura 3-11. Localización del vertimiento final de la empresa Maltería	96
Figura 3-12. Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales usado en Maltería Tropical	99
Figura 3-13: Esquema de un reactor anaerobio	104
Figura 3-14: Localización del Sistema de tratamiento de aguas residuales	107
Figura 3.15: Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales usado	109
Figura 3-16 Diagrama de los reactores anaerobios según lo muestra el sistema supervisor Wanderware	115
Figura 3.17: Esquema que indica la remoción de nitrógeno.	116
Figura 4-1: Cobertura del tratamiento de aguas residuales municipales en Colombia, por regiones (2001).	133

Lista de fotografías

	Pág.
Foto 3-1: Estación de Bombeo de aguas residuales crudas	56
Foto 3-2: Tamiz Estático	57
Foto 3-3: Tanque de ecualización	60
Foto 3-4: Reactor metanización	62
Foto 3-5: Tanque secundario	64
Foto 3-6: Ubicación de descarga final de la PTAR y del sitio de vertimiento	97
Foto 3-7: Piscina de igualación	100
Foto 3.8: Tamices estáticos	100
Foto 3-9: Recirculación y tanques de neutralización y bombeo (al fondo).	103
Foto 3-10: Panorámica Reactor 1 y 2. Detalle de recolección de gas en Reactor 1.	104
Foto 3-11: Teas quemando gas generado en reactores	105
Foto 3.12: Ubicación del emisario final de la PTAR y del sitio de vertimiento	107
Foto 3.13. Tamiz utilizado en las primeras etapas de tratamiento de las aguas residuales, en la Planta de Bavaria	110
Foto 3-14. Teas quemando el gas metano generado en la operación	114
Foto 3.15: Sistema de aireación	118
Foto 3.16. Decantador de lodos	120

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Tratamiento de aguas residuales en algunos países de America Latina y el caribe, con grado de tratamiento aplicado	6
Tabla 1-2: Composición típica del agua residual domestica.	13
Tabla 1-3: Clasificación de los diferentes tipos de Sólidos.	14
Tabla 1-4: Niveles de tratamiento de las aguas residuales domesticas.	23
Tabla 1-5: Parámetros de crecimiento de bacterias anaerobias reportados a 30 y 35 °C.	26
Tabla 1-6: Poder calorífico de diversos combustibles.	27
Tabla 1-7: Diferentes fuentes de inóculos para reactores anaerobios	35
Tabla 1-8: Propiedades del lodo granular.	36
Tabla 1-9 Relaciones SSV/ AGV	38
Tabla 1-10 Algunos parámetros de diseño recomendados para reactores UASB	41
Tabla 3-1: Relación de Plantas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas o municipales en la Costa Norte Colombiana (Santa Marta; Barranquilla y Cartagena).	48
Tabla 3-2 Relación de Plantas de tratamiento anaerobio de aguas residuales industriales en la Costa Norte Colombiana (Santa Marta; Barranquilla y Cartagena).	48
Tabla 3-3 Relación de Plantas de tratamiento anaerobio de lixiviados en la Costa Norte Colombiana (Santa Marta; Barranquilla y Cartagena).	49
Tabla 3-4 Composición de las aguas residuales industriales	53
Tabla 3-5. Consumo de nutrientes	54
Tabla 3-6. Consumo de Soda	55
Tabla 3-7. Indicadores actuales y proyectados de los servicios de acueducto y alcantarillado del corregimiento SANTA ROSA DE LIMA	66
Tabla 3-8 Caudal de aguas residuales del corregimiento de SANTA ROSA DE LIMA.	67
Tabla 3-9: Composición del lixiviado del relleno sanitario Parque Ambiental La Palangana de la ciudad de Santa Marta	85
Tabla 3-10. Características Básicas del diseño del reactor del relleno Palangana	89
Tabla 3-11. Características generales y criterios de diseño FAFA	92
Tabla 3-12. Características generales y criterios de diseño unidad compacta de precipitación- clarificación	94
Tabla 3-13: Dimensiones y tiempos de retención, para área de acidificación – reactores anaerobios	106
Tabla 3-14. Dimensiones y tiempos de retención, para esta segunda etapa del tratamiento primario.	116
Tabla 3-15: Dimensiones y tiempos de retención, para el tratamiento terciario	121
Tabla 3-16: Tiempos de residencia, bajo las condiciones actuales de operación a caudal máximo de trabajo.	121

Tabla 3-17: Caracterización correspondiente al año 2008	122
Tabla 3-18: Caracterización correspondiente al año 2010	122
Tabla 3-19: Caracterización correspondiente al año 2011	122
Tabla 3-20: Caracterización correspondiente al año 2013	123
Tabla. 3-21: Caracterizaciones DBO, PTAR Malteria tropical S.A., desde 2002 hasta 2013	123
Tabla 3-22: Caracterización de SST, PTAR Malteria tropical S.A., desde 2002 hasta 2013	124
Tabla 3-23: Caracterización correspondiente al año 2004	125
Tabla 3-24: Caracterización correspondiente al año 2011	125
Tabla 3-25: Caracterización correspondiente al año 2013	125
Tabla 4-1 Capacidad instalada vs condiciones de operación en las plantas de tratamiento	130
Tabla 4-2 Municipios con PTAR en diferentes departamentos de la Costa Caribe Colombiana	133

Glosario de Términos

- **ACETOGÉNESIS ACIDOCLÁSTICOS:** Consiste en la formación de ácido acético a partir de ácidos grasos volátiles.
- **ACETOGÉNESIS HIDROGENOCLÁSTICOS:** Consiste en la conversión del H₂ producido en las reacciones anteriores en ácido acético.
- **ACIDOGÉNESIS:** Es el proceso mediante el cual las bacterias acidogénicas toman sustratos simples de la hidrólisis y los convierten en ácido acético.
- **AFLUENTE:** Agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio o algún proceso de tratamiento.
- **AGUAS RESIDUALES:** Desecho líquido provenientes de residencias, edificios, instituciones, fábricas o industrias.
- **AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS:** Desechos líquidos provenientes de la actividad doméstica de la actividad doméstica en residencias, edificios e instituciones.
- **AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES:** Desechos líquidos provenientes de las actividades industriales.
- **AMBIENTE ANAEROBIO:** Condiciones de ausencia de oxígeno molecular.
- **AUTOTROFICOS:** Son organismos que “fabrican su propia alimento” de una fuente inorgánica de carbón y una determinada fuente de energía.
- **BACTERIA:** Grupo de organismos microscópicos unicelulares, rígidos carentes de clorofila, que desempeñan una serie de procesos de tratamiento que incluyen oxidación biológica, fermentaciones, digestión, nitrificación y desnitrificación.
- **BIODEGRADACIÓN:** Degradación de la materia orgánica por acción de microorganismos sobre el suelo, aire, cuerpos de agua receptores o procesos de tratamiento de aguas residuales.

- **CARGA DE DISEÑO:** Producto del caudal por la concentración de un parámetro específico; se usa para dimensionar un proceso de tratamiento, en condiciones aceptables de operación. Tiene unidades de masa por unidad de tiempo, (M/T).
- **CARGA ORGÁNICA:** Producto de la concentración media de DBO por el caudal medio determinado en el mismo sitio; se expresa en kilogramos por día (kg/d).
- **CARGA SUPERFICIAL:** Caudal o masa de un parámetro por unidad de área y por unidad de tiempo, que se emplea para dimensionar un proceso de tratamiento ($m^3/(m^2 \text{ día})$, kg DBO/(ha-día), hg DBO/($m^2 \cdot d$)).
- **CARGA VOLUMÉTRICA:** Caudal o masa de un parámetro por unidad de volumen y por unidad de tiempo, que se emplea para dimensionar un proceso de tratamiento ($m^3/(m^3 \text{ día})$, kg DBO/($m^3 \text{ día}$)).
- **CLARIFICADOR:** Tanque de sedimentación rectangular o circular usado para remover sólidos sedimentables del agua residual.
 - **CRITERIO DE FACTIBILIDAD:** Son las consideraciones tomadas en cuenta para hacer una evaluación de la factibilidad del proyecto.
- **DEMANDA BIOLÓGICA DE OXIGENO (DBO):** Cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada por acción de los microorganismos en condiciones de tiempo y temperatura especificados (generalmente cinco días y 20 °C). Mide indirectamente el contenido de materia orgánica biodegradable.
- **DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (D.Q.O):** Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en un ambiente ácido y a altas temperaturas.
- **DESARENADORES:** Cámara diseñada para permitir la separación gravitacional de sólidos minerales (arena).
- **DESCOMPOSICIÓN ANAEROBIA:** Degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular por efecto de microorganismos. Usualmente va acompañada de la generación de ácidos y gas metano.
- **EUCARIOTICA:** Célula que poseen el núcleo separado del citoplasma por una membrana nuclear y por extensión de los organismos que poseen células de este tipo. Comprenden todos los seres vivos a excepción de los virus, bacterias y cianofíceas.
- **FILTRO ANAEROBIO:** Reactor consistente en una columna rellena con diferentes tipos de medios sólidos usados para el tratamiento anaerobio de la materia orgánica carbonácea presente en aguas residuales.
- **HIDRÓLISIS:** Proceso químico en el cual la materia orgánica se desdobra en partículas más pequeñas por la acción del agua.

- HETEROTROFICOS: Todos los animales y los vegetales sin clorofila. Se nutre de sustancias elaboradas por otros seres vivos.
- ISOMEROS: Compuestos que presentan la misma fórmula empírica pero propiedades físicas y químicas distintas.
- LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN: Se entiende por lagunas de estabilización los estanques construidos en tierra, de poca profundidad (1-4 m) y períodos de retención considerable (1-40 días). En ellas se realizan de forma espontánea procesos físicos, químicos, bioquímicos y biológicos, conocidos con el nombre de autodepuración o estabilización natural. La finalidad de este proceso es entregar un efluente de características múltiples establecidas (DBO, DQO, OD, SS, algas, nutrientes, parásitos, enterobacterias, Coliformes, etc).
- LECHOS DE SECADO: Dispositivos que eliminan una cantidad de agua suficiente de lodos para que puedan ser manejados como material sólido.
- LODOS ACTIVADOS: Procesos de tratamiento biológico de aguas residuales en ambiente químico aerobio, donde las aguas residuales son aireadas en un tanque que contiene una alta concentración de microorganismos degradadores. Esta alta concentración de microorganismos se logra con un sedimentador que retiene los flóculos biológicos y los retorna al tanque aireado.
- METANOGÉNESIS: Etapa del proceso anaerobio en la cual se genera gas metano y gas carbónico.
 - METANOGÉNESIS HIDROGENOCLASTICOS: Reacción por medio del cual se cataboliza anaeróticamente el hidrógeno para producir metano.
 - METANOGÉNESIS ACETOCLASTICOS: Es la reacción en la cual el ácido acético es convertido a metano.
- MUESTRA COMPUESTA: Mezcla de varias muestras alícuotas instantáneas recolectadas en el mismo punto de muestreo en diferentes tiempos. La mezcla se hace sin tener en cuenta el caudal en el momento de la toma.
- MUESTRA INTEGRADA: Consiste en el análisis de muestras instantáneas tomadas simultáneamente en diferentes puntos o tan cerca como sea posible. La integración se hace de manera proporcional a los caudales medidos al tomar la muestra.
- MUESTRTA PUNTUAL: Muestra de agua residual tomada al azar en un momento determinado para su análisis. Algunos parámetros deben determinarse in situ y otros en el laboratorio.
- PLANTA DE TRATAMIENTO (de agua residual): Conjunto de obras, instalaciones y procesos para tratar las aguas residuales.
 - REACTOR UASB: Reactor anaerobio de flujo ascendente a través de un manto de lodos (upflow anaerobic sludge blanket) utilizado para el tratamiento de aguas residuales domésticas o industriales.

- SANEAMIENTO AMBIENTAL: Sistema de manejo integral de aguas residuales urbanas o líquidos cloacales, entre otras actividades comprendidas.
- TANQUE SEPTICO: Sistema individual de disposición de aguas residuales para una vivienda o conjunto de viviendas; combina la sedimentación y la digestión. Los sólidos sedimentados acumulados se remueven periódicamente y se descargan normalmente en una instalación de tratamiento.
- TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO: Tiempo medio teórico que se demoran las partículas de agua en un proceso de tratamiento. Usualmente se expresa como la razón entre el caudal y el volumen útil.
- TRATAMIENTO ANAERÓBICO: Estabilización de un desecho por acción de microorganismos en ausencia de oxígeno.
- TRATAMIENTO PRIMARIO: Tratamiento en el que se remueve una porción de los sólidos suspendidos y de la materia orgánica del agua residual. Esta remoción normalmente es realizada por operaciones físicas como la sedimentación. El efluente del tratamiento primario usualmente contiene alto contenido de materia orgánica y una relativamente alta DBO.
- TRATAMIENTO SECUNDARIO: Es aquel directamente encargado de la remoción de la materia orgánica y los sólidos suspendidos.

Introducción

En el tratamiento de las aguas residuales es común la utilización de procesos biológicos para la remoción de la materia orgánica y otras sustancias contaminantes. El tratamiento biológico, en general, se puede desarrollar a través de dos vías dependiendo de la disponibilidad de oxígeno disuelto en el medio acuático: aerobia o anaerobia (Metcalf, 2003). En ambos casos la materia orgánica medida en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) o Carbono Orgánico Total (COT) es degradada por microorganismos y los productos finales dependerán de la ruta seleccionada (Romero, 1999). Sin duda, la eficiencia que ofrecen los procesos aerobios es mayor que la de los procesos anaerobios. No obstante, se considera que la aplicación de tecnologías aerobias (lodos activados y otros) en países en desarrollo ha originado condiciones insostenibles por los elevados costos de los sistemas (OPS, 2001).

El debate de hace algunos años, que llevaba a oponer las tecnologías anaerobias modernas con las aerobias, ya ha sido resuelto en buena medida en el sector industrial; se ha ganado madurez y experiencia. Ahora lo que se acepta en forma creciente es que ambos tipos de procesos no se oponen, por el contrario, se complementan al aportar cada uno su parte, paliando entre ambos sus respectivas desventajas o limitaciones. El esquema anterior es menos claro en el caso de aguas más diluidas, como las de origen doméstico o municipal. En este sentido, la evidencia de la madurez de la tecnología anaerobia aplicada en efluentes industriales ya es clara, pero aún falta mucho por convencer en el ramo de las aguas residuales municipales. Es conveniente señalar el hecho que la última edición (4ª) del libro editado por Metcalf y Eddy (2003) ya incluye una sección completa (capítulo 10) para los procesos anaerobios, la cual trata en detalle la tecnología UASB, aunque sin prácticamente mencionar su aplicación al tratamiento de aguas residuales municipales. Lo anterior es un reconocimiento a la madurez de la tecnología, al menos en el sector industrial. Por el contrario, el capítulo sobre sistemas de tratamiento naturales (capítulo 13) de la edición anterior, fue eliminado en la nueva edición.

Dentro de los procesos anaerobios de tipo compacto, el conocido como reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente (UASB), es, sin duda, el más aplicado a nivel mundial en aguas residuales industriales. En aguas de tipo municipal, es también una tecnología con bastante aplicación, particularmente en Brasil, Colombia, India y México. Otro proceso anaerobio que se ha utilizado, pero a menor escala, es el filtro

anaerobio, con una etapa o con compartimientos, ya sea con flujo horizontal, ascendente o descendente.

A pesar de que el reactor UASB es un proceso relativamente sencillo de operar con aguas de tipo municipal, su simplicidad no implica que no se requiera de atención y cuidado en su diseño y operación. El buen diseño de un reactor UASB es esencial para su correcto funcionamiento. No puede esperarse que un reactor con fallas en el diseño hidráulico tenga un buen desempeño. El diseño de un reactor que trate aguas residuales municipales debe partir de la carga hidráulica como parámetro fundamental y no de la carga orgánica, como sucede con reactores que tratan aguas concentradas.

El reactor anaerobio de flujo ascendente a través de un manto de lodos **UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)**, también conocido como **RAFA** o PAMLA o RAMLFA, fue desarrollado por Lettinga y otros investigadores en 1980; fue aplicado en Holanda para el tratamiento de residuos de concentraciones media y alta de origen agrícola, tales como las aguas residuales del azúcar de remolacha, levaduras y lácteos.

El reactor UASB, consiste en un tanque dentro del cual se acumula por sedimentación biomasa anaerobia en forma de lodo (formación del lecho de lodos). El sustrato orgánico a degradar (agua afluyente del reactor) se introduce por el fondo del tanque distribuyéndose uniformemente y en su trayectoria ascendente se pone en contacto con la biomasa, la cual estabiliza anaeróticamente el sustrato produciendo biogás y más biomasa.

La tecnología anaerobia en sus diferentes manifestaciones constituye una excelente alternativa de tratamiento no solo para residuos líquidos industriales sino también para aguas residuales domésticas, especialmente en poblaciones de baja y media complejidad localizadas en zonas con superior a los 20°C, como es el caso de varias regiones del país.

Este trabajo busca identificar y evaluar diferentes instalaciones para el tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia ubicadas en la costa norte colombiana, principalmente en los departamentos de Atlántico, Bolívar y Magdalena que presentan un importante desarrollo urbano e industrial.

Las actividades desarrolladas incluyen visitas a las entidades de control (Corporaciones Autónomas regionales), entidades municipales y establecimientos industriales que poseen instalaciones de tratamiento con tecnología anaerobia. La recopilación de información no sólo permite la elaboración de un inventario de plantas sino también la obtención de datos de diseño y operación que puedan ser de utilidad para el cumplimiento del objetivo del estudio que consiste en establecer un panorama de la utilización de la tecnología anaerobia en la costa norte del país.

Además de la recolección de información el trabajo intenta analizar la aplicabilidad de la tecnología en ésta y otras regiones con características similares. De hecho, en el centro, oriente y occidente del país existen numerosas aplicaciones que refuerzan la conveniencia del proceso en diferentes condiciones climáticas prevaleciendo, por supuesto, en zonas con temperaturas superiores a 24°C.

1 Marco Teórico

1.1 Antecedentes

En Colombia se ha tenido una amplia experiencia en el uso de reactores UASB para el tratamiento de aguas residuales. Existen numerosos ejemplos de aplicaciones tanto en aguas residuales domésticas como en aguas residuales industriales. Las empresas municipales de Cali – EMCALI, participaron en el desarrollo de la tecnología UASB en Colombia, en el año de 1982, cuando la Universidad del Valle solicitó prestado el terreno en predios de la estación de bombeo de Cañaveralejo (de propiedad de EMCALI), para construir allí una planta piloto de 64m³, conocida como “planta piloto UASB de Cañaveralejo”.

Esta instalación surgió del interés conjunto de UNIVALLE con HASKONING, firma holandesa que con recursos de DGIS (Departamento de Investigación y Tecnología – Ministerio de Asuntos Exteriores de los Países Bajos) y con la participación técnica de la Universidad Wageningen, propuso evaluar la factibilidad de funcionamiento de esta tecnología para tratar aguas residuales domesticas (de baja carga orgánica) en clima tropical.

En 1983 empezó la operación de la planta piloto y EMCALI, mediante convenio con UNIVALLE, hizo continuo seguimiento a los resultados obtenidos en los años 1983 y 1984, encontrándolos muy prometedores, fundamentalmente por los reducidos costos de operación en comparación con las tecnologías convencionales para el tratamiento de las aguas residuales. La conclusión de este estudio recomendó continuar precisando la tecnología y evaluarla a escala real.

Casi de manera simultánea, la Corporación Autónoma de Bucaramanga – CDMB, inició un proceso similar en convenio con el Gobierno de Holanda, para evaluar un sistema de lagunas y reactores anaerobios tipo UASB, en el marco del Plan de Saneamiento Ambiental de Bucaramanga y su Área Metropolitana- PISAB. Los resultados de esta investigación permitieron posteriormente el diseño y construcción de la Planta de aguas residuales PTAR Río Frío, considerada en su momento como la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas con tecnología UASB, más grande del mundo. Esta planta se encuentra operando desde noviembre de 1990 con muy buenos resultados (Schellinkhout y Collazos, 1992).

Desarrollos similares pero a menor escala se dieron en otras regiones de Colombia (Antioquia, Quindío y Norte de Santander, entre otros). No obstante, varios de esos

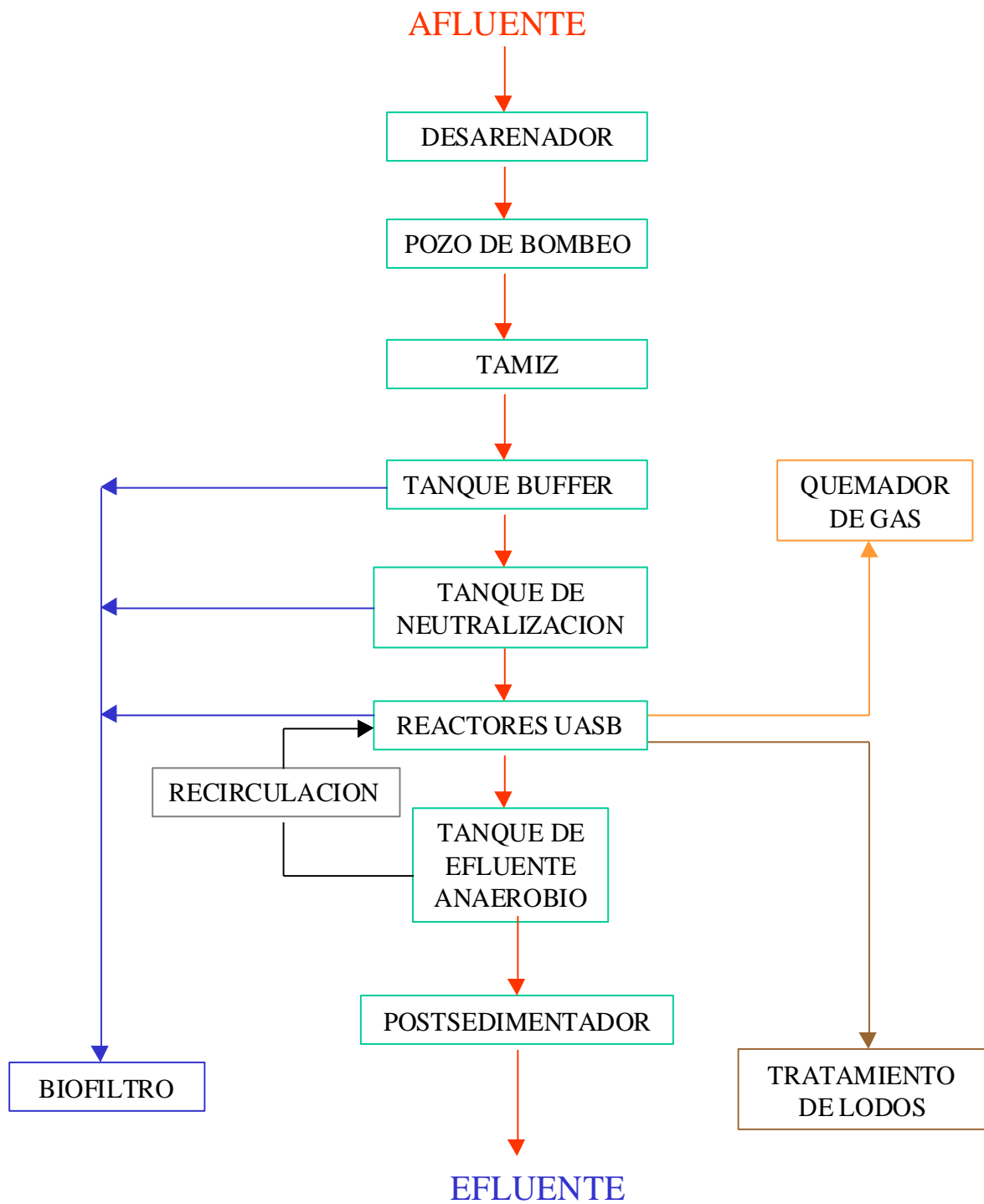
proyectos pusieron en riesgo la aplicabilidad de la tecnología por la utilización de criterios de diseño que no eran apropiados, especialmente por la utilización de materiales que no resistían las condiciones de agresividad de estos efluentes. Otras instalaciones quedaron mal ubicadas (cerca de sectores residenciales) lo cual generó rechazo por parte de la comunidad. De hecho, una de las plantas de EMCALI ubicada en el norte de la ciudad (PTAR El Vivero) tuvo que ser cerrada por presión de la comunidad aledaña, lo cual parece haber sido uno de los factores que influyeron en la decisión de adoptar tecnologías convencionales para la ciudad de Cali (PTAR Cañaveralejo).

La aplicación de la tecnología anaerobia en Colombia también tuvo un capítulo en el sector de vertimientos industriales. Diferentes empresas de alimentos y bebidas construyeron instalaciones tipo UASB. Tal es el caso de Bavaria y Postobón y de otras industrias del sector de alimentos como frigoríficos y lácteos (Alpina).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, con tecnología anaerobia, que se utilizan regularmente en la industria cervecera están conformadas por las unidades que se muestran en el diagrama de la Figura 1-1 (Collazos, 2000).

Entre las primeras compañías que patentaron y construyeron reactores anaerobios para esta clase de residuos se destaca PAQUES de Holanda. La tecnología de PAQUES utiliza reactores UASB. Otras compañías como BIOTHANE y DEGREMONT patentaron tecnologías similares, con algunas variantes, que se apartan ligeramente del diseño básico. En algunos de estos sistemas aplican el concepto de fases separadas para la acidogénesis y metanogénesis respectivamente. Otros conservan el concepto original del UASB con un tanque único en el cual se integran ambos procesos.

Figura 1-1. Flujograma del proceso anaerobio en el tratamiento de aguas residuales de cervecería en Colombia (Collazos, 2000).



Fuente: Collazos, 2002

Por otra parte, en materia de saneamiento en América Latina, si bien la cobertura de este servicio es relativamente importante en la región (77.7%), el alcantarillado solo sirve al 49%, ya que el 31% dispone de letrinas o tanques sépticos. De cualquier forma, el tratamiento de las aguas residuales municipales es aún muy limitado, puesto que solo se trata el 15% del caudal captado por los sistemas de alcantarillado (OPS, 2001). La Tabla 1-1 presenta los porcentajes de tratamiento de las aguas residuales municipales para algunos países de la región.

Tabla 1-1: Tratamiento de aguas residuales en algunos países de América Latina y el Caribe, con grado de tratamiento aplicado

País	Porcentaje tratado	Porcentaje por nivel de tratamiento		
		Primario	Secundario	Otros
	(%)			
Argentina	10	0	100	0
Bahamas	80	60	25	15
Bolivia	30	33	67	0
Brasil	20	10	68	22
Colombia	10	65	35	
Costa Rica	4	33	67	0
Dominicana	50	80	0	20
Ecuador	5	-	-	-
El Salvador	2	46	54	0
Haití	0			
México	25	46	54	0
Nicaragua	34			
Perú	14			
Puerto Rico	100			
Trinidad	65	50	28	22

Fuente: OPS (2001) con ajustes

La producción de aguas residuales en Colombia se estima en 6 millones de m³/d de los cuales solo un 20% es conducido a plantas de tratamiento y escasamente un 8% es efectivamente tratado (MAVDT, 2005). En otras palabras, más del 90% de las aguas residuales del país son descargadas, sin tratamiento previo en nuestros cuerpos de agua. De acuerdo con cifras del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en las 273 localidades del país que cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales (de un total de 1100 municipios) predominan las lagunas de estabilización con cerca del 42% de las instalaciones, seguidas de los sistemas aerobios convencionales (lodos activados,

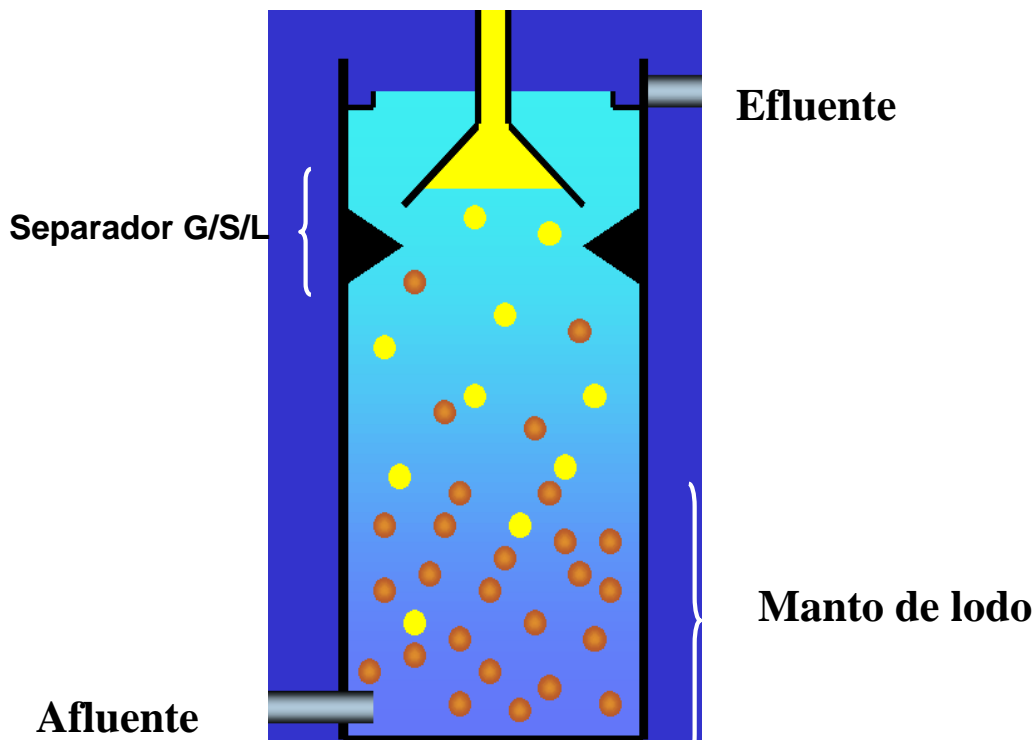
filtros percoladores, etc.) con un 30%, en tercer lugar los sistemas anaerobios (reactores tipo UASB principalmente) con un 16% y existe un 12% de instalaciones cuya tecnología se desconoce (MAVDT, 2005).

Todo parece indicar que para estos países la mejor alternativa en el corto y mediano plazo está en la utilización de reactores anaerobios. Con menores requerimientos de energía que los procesos aerobios se podría solucionar, parcialmente, el problema de la baja cobertura existente en materia de tratamiento de aguas residuales.

Desde tiempos remotos, la digestión anaerobia se ha venido aplicando con notorio éxito en el manejo de residuos agropecuarios, especialmente a través de los denominados biodigestores (McCarty, 1985). Posteriormente ha sido utilizada en la estabilización de los lodos de purga de plantas de tratamiento convencionales, y en las tres últimas décadas, en el tratamiento directo de aguas residuales domésticas e industriales mediante sistemas como el UASB.

Aunque desde comienzos de los ochenta la tecnología anaerobia tipo UASB ha venido siendo aplicada y evaluada en el pretratamiento de las aguas residuales domésticas y su efectividad en esas condiciones ha sido ampliamente comprobada en los países en vía de desarrollo (Noyola citando a Borzacconi y López, 1994), su mayor aplicación se presenta en el tratamiento de vertimientos industriales (uasb.org). La figura 1-2 muestra de manera esquemática la estructura del reactor UASB.

Figura 1-2. Esquema de la estructura del reactor UASB



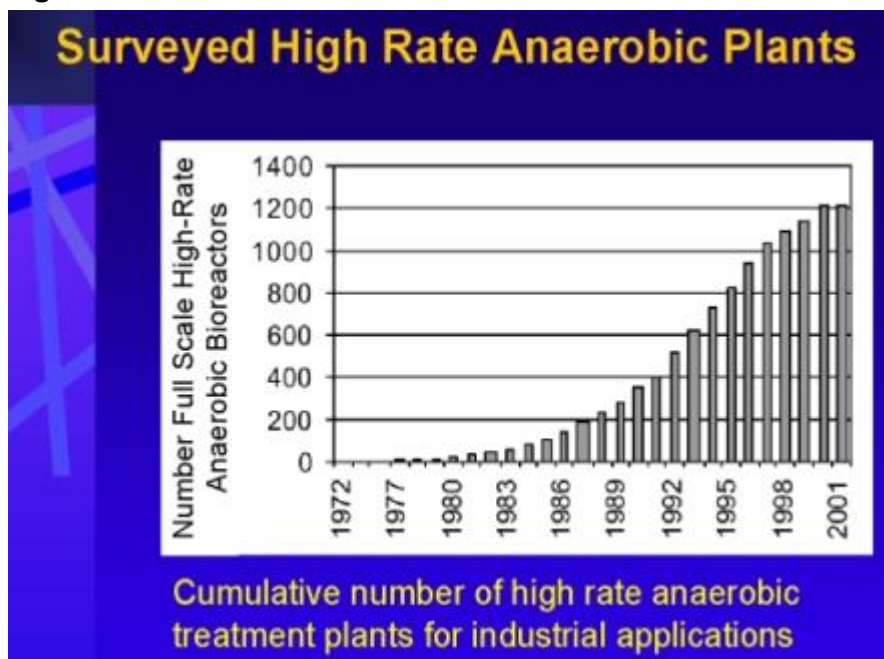
Fuente: Field

Con respecto al tratamiento de aguas residuales de mediana a alta concentración (DQO > 1500 mg/l) el uso de tratamiento anaeróbico es significativamente más barato que el tratamiento aeróbico (en términos de equipos y consumo de energía). La situación con respecto a desechos de baja concentración, como desechos domésticos, dependen mucho de la temperatura del agua; a temperaturas bajo 12 °C la actividad metanogenica puede hacerse tan baja que hace que el tratamiento anaeróbico sea poco competitivo con el tratamiento aeróbico para aplicaciones a gran escala.

Algunas de las ventajas del tratamiento anaeróbico es la producción del gas metano como fuente energética, la retención de biomasa sin necesidad de soporte, gracias a la formación de gránulos o flóculos con buena capacidad de sedimentación y la baja producción de lodo biológico; además este sistema produce energía esto es especialmente interesante con el tratamiento de desechos altamente concentrados. También existe la posibilidad de trabajar a Tiempos de Retención Hidráulica-TRH inferiores, por lo cual se requiere menos espacio para la planta anaeróbica en comparación con la unidad de tratamiento aeróbico. Esto puede ser un importante argumento para industrias en zonas urbanas.

La evolución que se ha tenido en la utilización de los reactores UASB en el mundo se puede observar en la siguiente figura 1-3

Figura 1-3: Evolución de la utilización de los reactores UASB



Fuente: www.uasb.org

En América Latina, países como Colombia (Rodríguez, 1984; Schellinkhout y Collazos, 1992), Brasil (Vieira, 1988 y 1992; Van Haandel y Lettinga, 1994) y México (Noyola,

2005) han sido pioneros en la aplicación de reactores UASB para el tratamiento de las aguas residuales municipales. En la Universidad Nacional, a través del grupo de investigación en ingeniería y procesos biológicos se han desarrollado algunos trabajos que van en la línea de aplicación de tecnologías anaerobias (Collazos, 2003; Forero y Zúñiga, 2003; Reyes y Rivera, 2004; Marín, 2006).

Otras tecnologías anaerobias utilizadas en diferentes escalas y para diferentes tipos de desechos líquidos son (Noyola, 2005):

TANQUES SEPTICOS Y TANQUES IMHOFF

El tanque séptico puede considerarse como un digestor convencional a escala reducida. Su uso ha estado limitado al tratamiento de las aguas residuales domésticas en zonas rurales o en las áreas suburbanas donde se carece del servicio de alcantarillado.

Por su parte, el tanque Imhoff es un sistema un poco más elaborado, conformado por un par de compartimientos superpuestos. El de arriba destinado a facilitar la sedimentación de los sólidos sedimentables y el de abajo a la digestión de los lodos decantados. En ambos sistemas, el tratamiento del agua se limita a la hidrólisis de la materia orgánica en suspensión y a la digestión del lodo.

LAGUNAS ANAEROBIAS

Este es otro proceso sencillo empleado en el tratamiento primario de efluentes industriales con elevada carga y temperatura y, por supuesto, con cierto contenido de sólidos suspendidos sedimentables.

También han sido utilizadas tradicionalmente para el tratamiento de aguas residuales municipales en combinación con lagunas facultativas y de maduración.

Un aspecto que limita considerablemente su uso en cercanías de los centros urbanos son los olores desagradables asociados con el proceso, dada su configuración abierta.

BIODIGESTOR O DIGESTOR ANAEROBIO CONVENCIONAL

Sistema utilizado principalmente en la estabilización de estiércoles y lodos de desecho provenientes del proceso de lodos activados, aunque en la actualidad sus limitadas eficiencias han hecho que sea sustituido por la versión completamente mezclada (alta tasa).

Está constituido por un tanque cerrado sin agitación y sin calentamiento, en donde el desecho a tratar se estratifica en zonas definidas a medida que el reactor se alimenta. La zona microbiana activa ocupa cerca del 30% del volumen total del tanque. Por lo general, opera con tiempos de retención hidráulica mayores a 30 días.

REACTOR ANAEROBIO DE CONTACTO

Consiste básicamente en un reactor completamente mezclado acoplado a un decantador que separa la biomasa para que sea recirculada al reactor. Es el equivalente anaerobio de los lodos activados.

La separación del lodo anaeróbico es difícil dada su tendencia a flotar por las burbujas de gas atrapadas en sus flocos. Este problema se soluciona mediante un sistema de desgasificación ubicado entre el reactor y el sedimentador.

Los tiempos de retención hidráulicos son del orden de 5 días y el tiempo de residencia celular varía entre 15 y 30 días. Este sistema se ha aplicado en el tratamiento de aguas residuales concentradas y con sólidos en suspensión.

FILTRO ANAEROBIO

Consiste en un reactor de flujo ascendente o descendente, con relleno plástico o piedras de 3 a 5 cm de diámetro en promedio.

Con el material de soporte, se aumenta considerablemente el tiempo de retención celular (TRC) lo que hace posible operar el sistema con menores tiempos de retención hidráulicos (TRH) reduciendo así el volumen de reactor, sin sacrificar la eficiencia del sistema y la estabilidad del proceso.

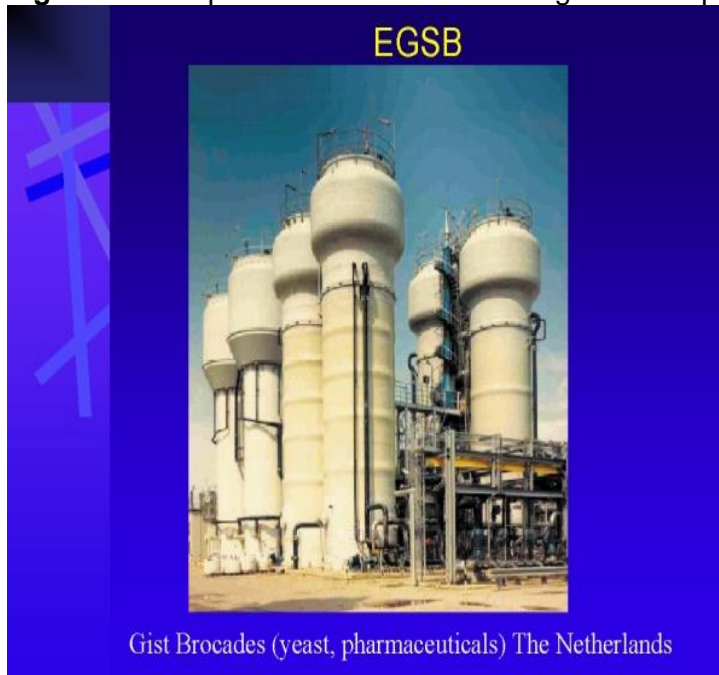
El coeficiente de porosidad del material de soporte debe ser lo suficientemente grande para evitar la obstrucción del medio. Un relleno de piedra, por ejemplo, representa una superficie específica inferior a $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Este sistema admite cargas hasta de $15 \text{ kg DQO}/\text{m}^3\text{d}$.

REACTOR DE LECHO GRANULAR EXPANDIDO - EGSB

Constituye una versión avanzada del reactor tipo UASB y un precursor de los reactores de lecho fluidizado.

En el reactor EGSB (expanded granular sludge bed) se aprovechan al máximo las propiedades del lodo granular, con un desarrollo de altura más que de superficie, constituyendo estructuras alargadas (8 a 16 m) y muy compactas.

La velocidad ascendente en estos reactores varía entre 5 y 15 m/h, en función de la carga orgánica aplicada, lo que provoca una expansión del lecho del orden del 50% al 100% de su volumen inicial. Este sistema puede admitir hasta $25 \text{ kg DQO}/\text{m}^3\text{d}$ como carga orgánica.

Figura 1-4. Esquema de reactor de lecho granular expandido - EGSB

Fuente: uasb.org

REACTOR DE LECHO EXPANDIDO (FLUIDIFICADO)

Son reactores de película fija con material de soporte pequeño y liviano para que pueda ser fluidificado con la recirculación del efluente.

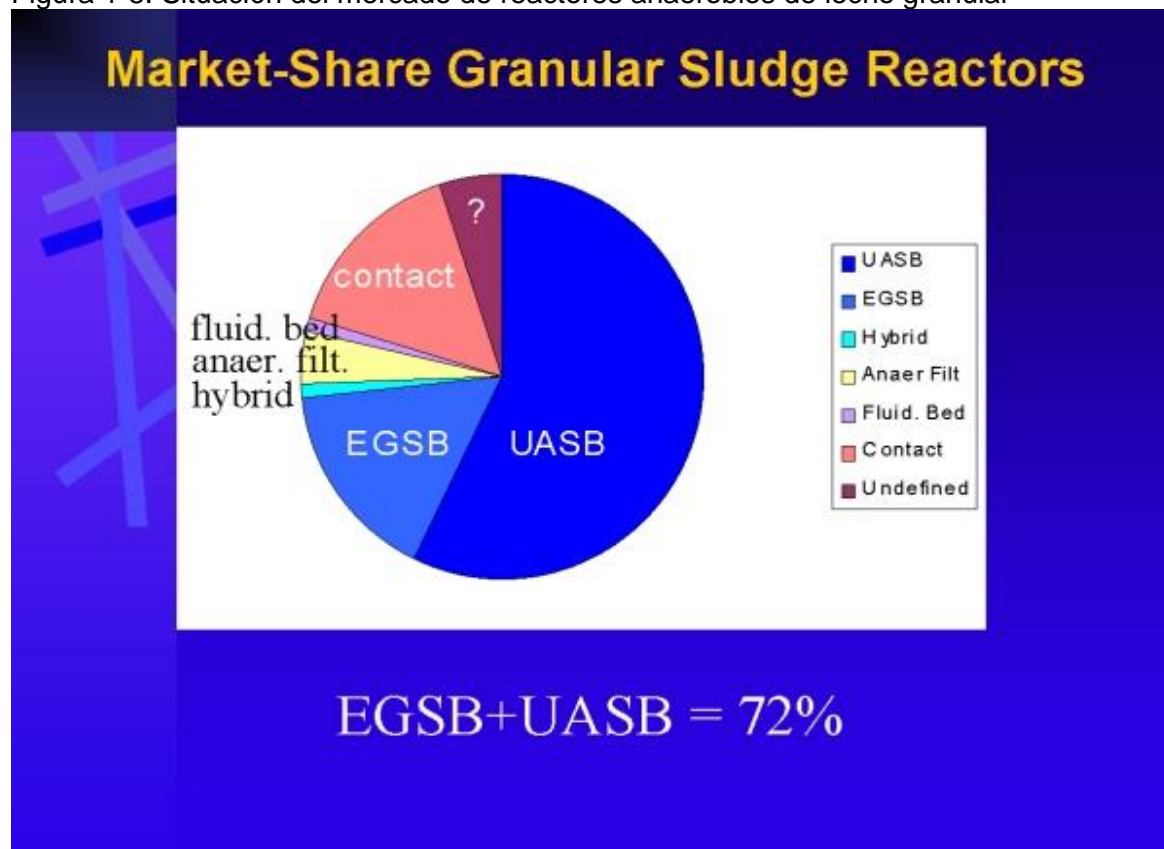
La diferencia entre el reactor de lecho expandido y el reactor de lecho fluidificado reside en el porcentaje de expansión.

Su principal ventaja está en la reducción de los tiempos de retención a unas pocas horas, debido a la elevada superficie específica del medio de soporte (superior a $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$) y la mezcla eficiente con el sustrato.

Su gran desventaja está en el requerimiento de energía para la recirculación y la fluidización del lecho. Además, el arranque y operación requieren mucho cuidado. En general, las cargas aplicadas pueden sobrepasar los $40 \text{ kg DQO}/\text{m}^3.\text{d}$

Por otra parte, el mercado de reactores anaerobios muestra un predominio de los sistemas basados en el UASB, tal como se muestra en la figura 1-5

Figura 1-5. Situación del mercado de reactores anaerobios de lecho granular



Fuente: uasb.org

1.2 Generalidades sobre las aguas residuales

Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, siendo recogidas por la red de alcantarillado que las conducirá hacia un destino apropiado.

Las aguas residuales son líquidos turbios que contienen material sólido en suspensión. Cuando son frescas, su color es gris y tienen un olor a moho, no desagradable. Flotan en ellas cantidades variables de materia: sustancias fecales, trozos de alimentos, basura, papel, astillas y otros residuos de las actividades cotidianas de los habitantes de una comunidad. Con el transcurso del tiempo, el color cambia gradualmente de gris a negro, desarrollándose un olor ofensivo y desagradable; y sólidos negros aparecen flotando en la superficie o en todo el líquido.

Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua, que provienen de residencias, oficinas, edificios comerciales e institucionales, junto con los residuos de las industrias y de actividades

agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación, que también pueden agregarse eventualmente al agua residual.

Las aguas residuales pueden tener origen en:

- Desechos humanos o animales.
- Desperdicios caseros.
- Corrientes pluviales.
- Infiltraciones de aguas subterráneas.
- Desechos industriales.

1.2.1 Clasificación de las aguas residuales

De acuerdo con su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas como:

- **Domesticas**

Son aquellas aguas utilizadas con fines higiénicos (sanitarios, cocinas, lavanderías, etc.) Consisten en residuos humanos que llegan a la redes de alcantarillado por medio de las descargas de las instalaciones hidráulicas de la edificación y también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares. En la Tabla 1-2 se observa la composición típica del agua residual doméstica.

Tabla 1-2: Composición típica del agua residual domestica.

Componente	Unidad	Concentración		
		Fuerte	Media	Débil
Sólidos totales	mg/l	1200	720	350
Sólidos disueltos totales	mg/l	850	500	250
Sólidos disueltos fijos	mg/l	525	300	145
Sólidos disueltos volátiles	mg/l	325	200	105
Sólidos suspendidos	mg/l	350	220	100
Sólidos suspendidos fijos	mg/l	75	55	20
Sólidos suspendidos volátiles	mg/l	275	165	80
Sólidos sedimentables	mg/l	20	10	5
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/l	400	220	110
Carbono orgánico total, COT	mg/l	290	160	80
Demanda química de oxígeno DQO	mg/l	1000	500	250
Nitrógeno total	mg/l	85	40	20
Componente	Unidad	Fuerte	Media	Débil
Nitrógeno orgánico	mg/l	35	15	8
Nitrógeno amoniacal	mg/l	50	25	12
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo total	mg/l	15	8	4

Fósforo orgánico	mg/l	5	3	1
Fósforo inorgánico	mg/l	10	5	3
Cloruros	mg/l	100	50	30
Sulfatos	mg/l	50	30	20
Alcalinidad en CaCO ₃	mg/l	200	100	50
Aceites y grasas	mg/l	150	100	50
Coliformes totales	NPM/100ml	10 ⁷ a 10 ⁹	10 ⁷ a 10 ⁸	10 ⁶ a 10 ⁷
Compuestos orgánicos volátiles	µg/l	>400	>400	>400

FUENTE: METCALF Y EDDY Ingeniería de Aguas Residuales, 3ª Ed. McGraw Hill, España, 1991

▪ Industriales

Son residuos líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas dependiendo del tipo de industria.

1.2.2 Características de las aguas residuales

▪ Físicas

Sólidos - El agua residual contiene una variedad de materiales sólidos que varían desde hilachas hasta materiales coloidales. Las posibles fuentes de sólidos son los sistemas domésticos de abastecimiento de agua, residuos domésticos e industriales, erosión de suelo, infiltración y conexiones incontroladas. En la caracterización de las aguas residuales, los materiales gruesos son removidos generalmente antes de analizar sólidos en la muestra. La clasificación de los diferentes tipos de sólidos se encuentra en la Tabla 1-3.

Tabla 1- 3: Clasificación de los diferentes tipos de Sólidos.

Prueba	Descripción
Sólidos totales (ST)	Residuo remanente después que la muestra ha sido evaporada y secada a una temperatura específica (103 a 105 °C)
Sólidos volátiles totales (SVT)	sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los ST son calcinados (500 + o - 50°C)
Sólidos fijos totales (SFT)	Residuo que permanece después de incinerar los ST (500 + o - 50°C)
Sólidos suspendidos totales (SST)	Fracción de ST retenido sobre un filtro con un tamaño de poro específico.
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	Estos sólidos pueden ser volatilizados e incinerados cuando los SST son calcinados (500 + o - 50°C)
Sólidos suspendidos fijos (SSF)	Residuo remanente después de calcinar SST (500 + o - 50°C)
Sólidos disueltos totales (SDT) [(ST- SST)]	Sólidos que pasan a través del filtro y luego son evaporados y secados a una temperatura específica.
Sólidos disueltos volátiles (SDV) [(SVT-	sólidos que pueden ser volatilizados e

SST)]	incinerados cuando los SDT son calcinados (500 + o - 50°C)
Sólidos disueltos fijos (SDF)	Residuo remanente después de calcinar los SDT (500 + o - 50°C)
Sólidos sedimentables	Sólidos suspendidos, expresados como mililitros por litro, que se sedimentaran por fuera de la suspensión dentro de un periodo de tiempo.

Fuente: TCHOBANOGLIOUS, George. Tratamiento de aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones.

Una primera etapa de filtración separa los sólidos suspendidos totales (SST) de los sólidos totales (ST). Se presume que los sólidos volátiles (SV) representan la materia orgánica, a pesar de que parte de la materia orgánica no se incinere y de que algunos compuestos inorgánicos se descompongan a altas temperaturas. De manera que tanto los ST como los SST poseen fracciones de sólidos fijos y sólidos volátiles y en forma similar los sólidos disueltos totales (SDT) también están compuestos de sólidos fijos y sólidos volátiles. La prueba estandarizada para determinar los sólidos sedimentables consiste en colocar una muestra de agua residual en un cono Imhoff de 1 L y anotar el volumen de sólidos en mililitros que sedimenta después de un periodo de tiempo específico (1h). Generalmente, cerca del 60% del total de sólidos suspendidos en aguas residuales municipales son sedimentables.

Temperatura - La temperatura del agua residual es por lo general mayor que la temperatura del agua para abastecimiento, como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso domestico o industrial. La medición de la temperatura es importante, ya que muchos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales incluyen procesos biológicos que dependen de la temperatura.

La temperatura del agua es un parámetro muy importante porque afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos. Un incremento de la temperatura puede causar cambios en las especies de peces que existan en un cuerpo de agua receptor. Además, el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. El aumento de la velocidad de las reacciones bioquímicas, como consecuencia de incrementos en la temperatura de las aguas superficiales, puede ocasionar una drástica disminución en la concentración del oxígeno disuelto.

La tasa de sedimentación de sólidos en aguas cálidas es mayor que en aguas frías, por el cambio en la viscosidad del agua. En general, los tiempos de retención para tratamiento biológico disminuyen a mayor temperatura y los parámetros de diseño son función de ella.

Turbiedad - La turbiedad, como una medida de las propiedades de dispersión de la luz de las aguas, es otro parámetro usado para indicar la calidad de las aguas naturales y las aguas residuales tratadas con relación al material residual en suspensión coloidal. La medición de la turbiedad se realiza por comparación entre la intensidad de la luz dispersa en una muestra y la luz dispersa por una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones.

Los resultados de las mediciones de turbiedad se dan en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).

En general, no hay una relación definida entre la turbiedad y la concentración de sólidos suspendidos en aguas residuales sin tratamiento. Sin embargo, existe una correspondencia entre la turbiedad y los sólidos suspendidos, para efluentes de sedimentadores secundarios en procesos de lodos activados.

Color - El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por sólidos suspendidos se llama *color aparente* mientras que el color causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina *color verdadero*. El color verdadero se obtiene sobre una muestra filtrada.

Las fuentes de color en aguas residuales incluyen la infiltración y aportes de conexiones erradas en sistemas de recolección, descargas industriales y la descomposición de compuestos orgánicos. Dependiendo de la época del año, los aportes por infiltración y conexiones erradas en sistemas de recolección contendrán una concentración variada de sustancias húmicas.

Provenientes de la descomposición de la lignina encontrada en las hojas y otros materiales orgánicos de las plantas, las sustancias húmicas generalmente imparten un color amarillo al agua. Las descargas industriales pueden contener tintes orgánicos, así como compuestos metálicos, los cuales imprimen una gran variedad de colores a las aguas residuales.

En forma cualitativa, el color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual. Si el color es café claro, el agua residual lleva aproximadamente 6 horas después de su descarga. Un color gris claro es característico de aguas que han sufrido algún grado de descomposición o que han permanecido un corto tiempo en los sistemas de recolección. Si el color es gris oscuro o negro, se trata en general de aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacteriana bajo condiciones anaerobias. El oscurecimiento de las aguas residuales se da con frecuencia debido a la formación de varios sulfuros, en particular sulfuro ferroso.

Olor - Las aguas residuales frescas tienen un olor característico desagradable, mientras que las aguas residuales sépticas tienen un olor muy ofensivo, generalmente producido por H_2S proveniente de la descomposición anaerobia de los sulfatos - sulfuros.

Las aguas residuales industriales tienen, a veces, olores característicos específicos del proceso industrial del cual provienen. Los olores de las aguas residuales constituyen una de las principales objeciones ambientales y su control en plantas de tratamiento es muy importante.

Además del ácido sulfhídrico, son causantes comunes de olores ofensivos en aguas residuales los siguientes compuestos: Aminas, amoníaco, diaminas, mercaptanos, sulfuros orgánicos y escatol. Solamente los ácidos orgánicos que poseen cinco o menos átomos de carbono son solubles en agua. Cuanto más corta sea la cadena de átomos de carbono, más oloroso será el gas.

- **Químicas**

Inorgánicas - Los constituyentes químicos inorgánicos de interés comprenden nutrientes, constituyentes no metálicos, metales y gases.

Entre los nutrientes están: amoníaco libre, nitrógeno (determinado como amoníaco por digestión de la muestra), nitritos, nitratos, y fósforo inorgánico. El nitrógeno y el fósforo son de gran importancia, ya que han sido identificados como nutrientes causantes principales del crecimiento indeseable de plantas acuáticas. Pruebas, como pH, alcalinidad, cloruros y sulfatos son realizadas para estimar la capacidad de reutilización de aguas residuales tratadas y también como pruebas para el control de varios procesos de tratamiento. Las pruebas para metales y para otros constituyentes son usadas para estimar la capacidad de digestión de biosólidos y el compostaje de lodos en aplicaciones sobre el suelo.

pH - Medida de la concentración de Ion hidrógeno en el agua, expresada como el logaritmo negativo de la concentración molar de Ion hidrógeno. Aguas residuales con concentración elevada del Ion hidrógeno son difíciles de tratar biológicamente, alteran la biota de las fuentes receptoras y eventualmente son fatales para los microorganismos. Aguas con pH menor de seis, en un tratamiento biológico, favorecen el crecimiento de hongos sobre las bacterias. A pH bajo, el poder bactericida del cloro es mayor porque predomina el HOCL; a pH alto, la forma predominante del nitrógeno amoniacal es la forma gaseosa no iónica (NH_3), la cual es tóxica, pero también es removible mediante arrastre con aire, especialmente a pH de 10,5 a 11,5. El valor de pH adecuado para diferentes procesos de tratamiento y para la existencia de la mayoría de la vida biológica puede ser muy restrictivo y crítico, pero generalmente es de 6,5 a 8,5.

Para descarga de efluentes de tratamiento secundario se estipula un pH de 6,0 a 9,0; para procesos biológicos de nitrificación se recomiendan valores de pH de 7,2 a 9,0 y para desnitrificación de 6,5 a 7,5.¹ En lagunas de estabilización, las algas usan dióxido de carbono para su actividad fotosintética y esto puede dar como resultado aguas de pH alto, especialmente en aguas residuales de baja alcalinidad. En muchos casos las algas utilizan el ión bicarbonato como fuente de carbono celular y pueden, también, presentarse variaciones diurnas fuertes de pH. En aguas residuales duras, cuando el pH aumenta, puede predominar la alcalinidad por carbonatos e hidróxidos y producirse la precipitación del carbono de calcio, lo cual impide que el pH sea más alcalino.

Fósforo - El fósforo también es importante en el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Debido al nocivo crecimiento incontrolado de algas en aguas superficiales, se han realizado grandes esfuerzos para controlar la cantidad de compuestos del fósforo provenientes de descargas de aguas residuales domésticas, industriales y de escorrentía natural. Las aguas residuales municipales, por ejemplo, pueden contener entre 4 y 12 mg/l de fósforo expresado como P. Las formas más frecuentes en que se puede encontrar el fósforo en soluciones acuosas incluyen ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico.

¹TCHOBANOGLIOUS, George. Tratamiento de aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones

El fósforo enlazado a compuestos orgánicos carece de importancia en muchos residuos domésticos, pero puede ser un constituyente importante de residuos industriales y lodos de aguas residuales.

Alcalinidad - La alcalinidad del agua es una medida de su capacidad de neutralizar ácidos. Las aguas residuales domésticas son generalmente alcalinas, concentraciones de 50 – 200 mg/L- CaCO_3 son comunes. La alcalinidad puede generarse por hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio o amonio, siendo la causa más común los bicarbonatos de calcio y magnesio. Su capacidad para neutralizar ácidos y prevenir cambios bruscos de pH hace la alcalinidad importante en el tratamiento químico de aguas residuales, en los procesos de remoción biológica de nutrientes, en la remoción de amoníaco y en tratamientos anaeróbicos.

En el proceso de nitrificación se necesita suficiente alcalinidad para reaccionar con la acidez producida en la reacción. Por otra parte, aguas residuales con alcalinidad cáustica reaccionan con el CO_2 producido por la actividad microbial para generar bicarbonato y reducir el valor del pH.

Gases - La determinación de gases disueltos, tales como amoníaco, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, metano y oxígeno, se realiza para ayudar en la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las mediciones de oxígeno disuelto y amoníaco se realizan para controlar y monitorear los procesos de tratamiento biológico aerobios. La presencia de sulfuro de hidrógeno se determina no solo por ser un gas tóxico y de mal olor, sino porque su formación puede causar corrosión en alcantarillados de concreto. Las mediciones de metano, dióxido de carbono y amoníaco se realizan junto con la operación de digestores anaerobios.

Cloruros - La concentración de cloruros en aguas residuales es un parámetro importante. Los cloruros en aguas naturales provienen de los cloruros lixiviados de las rocas y los suelos con los que ellas hacen contacto. En áreas costeras, las concentraciones de cloruros pueden provenir de la intrusión de las aguas salinas y salobres. Otras fuertes potenciales de cloruros son las descargas de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas a las aguas superficiales. En las aguas residuales los cloruros son añadidos como consecuencia del uso. Por ejemplo, las heces humanas aportan aproximadamente 6 g de cloruros por persona por día. En lugares donde la dureza del agua es elevada, los compuestos usados para su reducción constituyen una importante fuente de cloruros. Debido a que los métodos convencionales de tratamiento no eliminan cloruros en cantidades significantes, concentraciones superiores a las normales pueden tomarse como un indicio de que la fuente de agua está siendo usada para el vertido de aguas residuales.

Azufre - El ión sulfato se encuentra en forma natural tanto en las aguas de abastecimiento como en las aguas residuales. El azufre es un elemento indispensable para la síntesis de proteínas, y por eso se libera cuando ocurre la degradación de las mismas. Los sulfatos se reducen biológicamente a sulfuros bajo condiciones anaerobias y pueden formar sulfuro de hidrógeno (H_2S) al combinarse con el hidrógeno.

El sulfuro de hidrógeno liberado a la atmósfera en redes de alcantarillado que no circulan a presión, tiende a acumularse en la corona de las tuberías. El H_2S acumulado puede

oxidarse biológicamente y convertirse en ácido sulfúrico, el cual es corrosivo para las tuberías del alcantarillado. Este efecto corrosivo se conoce como “efecto corona”, el cual puede amenazar seriamente la integridad estructural de las tuberías.

Los sulfatos se reducen a sulfuros en los digestores de lodos y pueden alterar el desarrollo normal de los procesos biológicos si la concentración excede los 200 mg/l. Afortunadamente, estas concentraciones no son comunes. La presencia de H₂S en el gas, generado como producto de la digestión anaerobia, lo hace corrosivo para las conducciones de gas, y si se usa como combustible en motores, los productos de la combustión pueden causar daños al motor provocando graves corrosiones en el circuito de recuperación térmica de los gases de escape, en especial si se permite el enfriamiento de tales gases por debajo del punto de condensación.⁷

Orgánicos

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) - La demanda bioquímica de oxígeno es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias.

Si existe suficiente oxígeno disponible, la descomposición biológica aerobia de un desecho orgánico continuara hasta que el desecho se haya consumido. Tres actividades más o menos diferenciadas pueden ocurrir. Primero, una parte del desecho se oxida hasta productos finales y con ellos los microorganismos obtienen energía para el mantenimiento de las células y la síntesis de nuevo tejido celular. Simultáneamente, otra fracción del desecho se convierte en tejido celular nuevo empleando la energía liberada durante la oxidación. Por último, cuando se consume la materia orgánica, las nuevas células empiezan a consumir su propio tejido celular con el fin de obtener energía para el mantenimiento celular; este tercer proceso es llamado respiración endógena.

Si se considera sólo la oxidación del carbono orgánico presente en el desecho, el oxígeno requerido para completar las tres reacciones anteriores es llamado DBO última. Esta demanda de oxígeno se conoce como *última carbonácea* o *primera etapa* de la DBO, y generalmente se denota como DBO_U.

La DBO es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, para diseñar unidades de tratamiento biológico, para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y para fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras.

Demanda Química de Oxígeno (DQO) - La demanda química de oxígeno (DQO) se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio, en un medio

⁷TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de aguas Residuales en pequeñas poblaciones.

ácido y a alta temperatura. Para la oxidación de ciertos compuestos orgánicos resistentes se requiere la ayuda de un catalizador como el sulfato de plata.

La DQO es útil como parámetro de concentración orgánica en aguas residuales industriales o municipales tóxicas a la vida biológica y se puede realizar en solo unas tres horas.

La interpretación correcta de los resultados de demanda de oxígeno, para la oxidación de la materia orgánica, mediante DBO o DQO, es problemática por los diferentes factores y variables que afectan dichos ensayos. En general, se espera que la DQO sea aproximadamente igual a la DBO última; pero, especialmente en aguas residuales industriales, existen factores que hacen que dicha afirmación no se cumpla. Dichos factores son:⁸

- Muchos compuestos orgánicos oxidables por dicromato no son oxidables biológicamente.
- Ciertos compuestos inorgánicos como los sulfuros, sulfitos, tiosulfatos, nitritos y hierro ferroso son oxidados por dicromato e introducen una DQO inorgánica en el resultado del ensayo.
- La DBO está sujeta a error cuando se usan simientes bacteriales no aclimatadas adecuadamente al residuo.
- Ciertos compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos y la piridina no son oxidados por el dicromato.
- Para concentraciones de cloruros mayores a 1 g/L se debe ejecutar el ensayo con un testigo de concentración de cloruros igual al de la muestra.
- El tiempo de reflujo debe ser siempre dos horas, puesto que el resultado de la DQO es función del tiempo de digestión.

- **Biológicas**

Las características biológicas de las aguas residuales son de fundamental importancia en el control de enfermedades causadas por organismos patógenos de origen humano, y por el papel activo y fundamental de las bacterias y otros microorganismos dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica, bien sea en el medio natural o en plantas de tratamiento de aguas residuales.

⁸ROMERO, Rojas Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño.

Bacterias - Organismos eubacteriales, procarióticos y unicelulares. Morfológicamente se clasifican como cocos, bacilos, curvados o vibriones, espirales o espirillas o espiroquetas y filamentosas. Son los organismos más importantes en la descomposición y estabilización de la materia orgánica. Así mismo, los organismos bacteriales patógenos que pueden acompañar las excretas humanas originan uno de los problemas sanitarios más graves en áreas de malas condiciones sanitarias.

Las bacterias se reproducen generalmente por fisión binaria, poseen pared celular, citoplasma con suspensiones coloidales de proteínas, carbohidratos y otros compuestos orgánicos. El citoplasma contiene ácido RNA, cuya función principal es sintetizar proteínas y ADN el cual contiene la información para la reproducción celular.

Las temperaturas inferiores a la temperatura óptima tienen mayor efecto significativo sobre el crecimiento bacteriano que las temperaturas superiores.

La tasa de crecimiento se dobla aproximadamente con un incremento de 10°C hasta alcanzar la temperatura óptima. Los intervalos típicos óptimos de temperatura para las bacterias son⁹:

Bacterias psicrófilas o criófilas	12-18 °C
Bacterias mesófilas	25-40 °C
Bacterias termófilas	55-65 °C

Hongos - Los hongos son protistas en su gran mayoría aerobios, aunque algunos son anaerobios, multicelulares, no fotosintéticos y quimioheterotróficos. La mayoría se alimentan de materia orgánica muerta y constituyen, junto con las bacterias, los organismos principalmente responsables de la descomposición del carbono. En el tratamiento de aguas residuales son importantes porque soportan medios ácidos de bajo pH, el pH óptimo para la mayoría de especies es de 5.6 y, además, requieren aproximadamente la mitad de nitrógeno que exigen las bacterias. Esto los hace particularmente abundantes en el tratamiento de residuos industriales de bajo pH y bajo contenido de nitrógeno. Por otra parte, como resisten ambientes de baja humedad, son importantes en procesos de compostaje.

Protozoos - Los protozoos son móviles, de tamaño microscópico, con estructura eucariótica y generalmente unicelulares. La mayoría de los protozoos son aerobios heterótrofos, algunos anaerobios aerotolerantes y un grupo reducido de anaerobios. Por lo general, los protozoos son de tamaño mayor al de las bacterias y con frecuencia las usan como fuente de energía. Es por eso que los protozoos son usados para el pulimento de los efluentes de procesos de tratamiento biológico, al alimentarse de bacterias y materia orgánica particulada.

Rotíferos - Son eucarióticos, animales aerobios, heterotróficos y multicelulares. Su nombre se deriva del hecho de que tienen dos juegos de cilios sobre la cabeza que usan

⁹ROMERO, Rojas Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño.

para moverse y capturar comida. Los rotíferos son muy efectivos en el consumo de bacterias floculadas y dispersas, y algunas partículas de materia orgánica. Su presencia en un efluente indica un proceso de purificación biológica bajo condiciones aerobias muy eficientes.

Algas - Las algas son eucarióticas unicelulares o multicelulares, autotróficas y fotosintéticas.

En lagunas fotosintéticas las algas proveen el oxígeno requerido para la actividad biológica aeróbica. Estas usan los nutrientes y el dióxido de carbono producidos, estableciéndose una relación simbiótica algas-bacterias, responsable del tratamiento del agua. Son indeseables en aguas superficiales, pues cubren las superficies de lagos y embalses. Proliferan en lagos eutróficos o enriquecidos nutricionalmente; alteran la calidad del agua produciendo sabores y olores indeseables, al igual que algunos efectos tóxicos sobre peces y otro tipo de vida acuática.

El control del contenido de carbono, nitrógeno, fósforo y de algunos elementos como hierro y cobalto son algunas de las soluciones propuestas para desestimular el crecimiento de algas en aguas.

El uso que hacen las algas del CO_2 , en la fotosíntesis, puede conducir a lagunas con pH alto, especialmente en aguas de baja alcalinidad; en otros casos, las algas usan el ion bicarbonato como fuente del carbono requerido para su crecimiento celular y se presentan variaciones altas de pH durante el día. Así mismo, cuando el pH aumenta, las formas predominantes de alcalinidad tienden a ser las de los carbonatos e hidróxidos; si el agua residual contiene suficiente calcio, este se precipitará como carbonato al excederse el producto de solubilidad. Las algas constituyen la fuente principal de oxígeno en las lagunas fotosintéticas durante el día y pueden desarrollar condiciones de sobresaturación de oxígeno disuelto (OD). Sin embargo, durante la noche, el consumo respiratorio puede conducir a concentraciones mínimas de OD.

El aumento de nutrientes o eutrofización en el agua ocasiona crecimientos excesivos de algas.

Virus - Los virus son parásitos intracelulares obligados que se multiplican únicamente dentro de una célula huésped donde reorientan el sistema bioquímico de la célula para reproducirse a sí mismos. Los virus pueden también existir en estado extracelular, en el cual la partícula de virus (conocida como virion) es metabólicamente inerte. Los bacteriófagos son virus que infectan las bacterias huésped; no han sido implicados en infecciones de humanos.

El virus constituye uno de los riesgos más importantes para la salud; en general, se considera que para exterminarlos con cloro se requieren dosis superiores a la del punto de quiebre, lo cual hace necesario eliminar el cloro residual libre de las aguas residuales desinfectadas.

1.2.3 Métodos de tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales es el conjunto de recursos por medio de los cuales es posible verificar las diferentes etapas que tienen lugar en la auto purificación de una corriente, dentro de un área limitada y apartada y bajo condiciones controladas.

El propósito del tratamiento de las aguas residuales, previo a su disposición por dilución, consiste en separar de ellas la cantidad suficiente de sólidos que permita que los que queden al ser descargados a las aguas receptoras no interfieran con el mejor o más adecuado empleo de estas, tomando en cuenta la capacidad de las aguas receptoras para asimilar la carga que se agregue. (En la Tabla 1- 4 se pueden observar los diferentes niveles de tratamiento existentes)

Tabla 1- 4 Niveles de tratamiento de las aguas residuales domesticas.

Nivel	Remoción
Preliminar	Sólidos suspendidos gruesos y arena.
Primario	Sólidos suspendidos sedimentables. DBO suspendida (materia orgánica componente de los sólidos suspendidos sedimentables).
Secundario	DBO suspendida (materia orgánica suspendida fina, no removida en el tratamiento primario). DBO soluble (materia orgánica en la forma de sólidos disueltos).
Terciario	Nutrientes. Organismos patógenos. Compuestos no biodegradables. Metales pesados. Sólidos inorgánicos disueltos. Sólidos suspendidos remanentes.

Fuente: Manual de tratamiento de aguas negras Ed. Limusa 1997.

1.3 Tratamiento anaerobio

El proceso anaerobio lo definió Pasteur como la vida sin aire. Es la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos, en ausencia de oxígeno libre, para obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios. El proceso anaerobio es menos eficiente en producción de energía que el aerobio, puesto que la mayoría de la energía liberada en el catabolismo anaerobio proveniente de la sustancia descompuesta aún permanece en los productos finales orgánicos reducidos, como el metano, generándose una cantidad de biomasa mucho menor que la producida en el proceso aerobio.

El uso de los sulfatos y del CO₂ como aceptadores de electrones requiere condiciones estrictamente anaerobias, es decir, ausencia de oxígeno y nitratos. Los carbohidratos contienen oxígeno que puede emplearse como aceptador de los electrones; una porción del carbohidratos es oxidado en CO₂ y ácidos orgánicos mientras que otra porción es reducida en aldehídos, cetonas y alcoholes. Prácticamente, la descomposición anaerobia es posible con todos los compuestos orgánicos que contienen oxígeno en sus

moléculas. En el tratamiento anaerobio se puede considerar, por tanto, que ocurren los procesos básicos de la descomposición anaerobia, es decir, desnitrificación de nitratos, respiración de sulfatos, hidrólisis y fermentación acetogénica y metanogénica.

El proceso microbio es muy complejo y está integrado por múltiples reacciones paralelas y en serie, independientes entre sí. En su forma más elemental, se puede considerar el proceso anaerobio de descomposición de la materia orgánica integrado por dos etapas: fermentación de ácidos y fermentación de metano, que ocurren simultáneamente.

En la fermentación ácida, los compuestos orgánicos de estructura compleja (proteínas, grasa, carbohidratos), primero son hidrolizados en unidades moleculares más pequeñas y sometidos a biooxidación para convertirlos en ácidos orgánicos de cadena corta, principalmente ácido acético, propiónico y butírico, hidrógeno y CO_2 .

En la fermentación metanogénica, los microorganismos metanogénico, en condiciones estrictamente anaerobias, convierten los productos de la fermentación ácida en CO_2 y CH_4 principalmente. El metano no puede ser utilizado por las bacterias en condiciones anaerobias.

La transformación de la materia orgánica en diversas sustancias químicas en el transcurso de la fermentación anaerobia se procesa mediante una cadena de transformaciones sucesivas debido a diferentes tipos de bacterias, clasificadas como degradadoras de celulosa, degradadoras de almidón, degradadoras de lactano y otros ácidos orgánicos, degradadoras de pectina y productoras de metano. Esencialmente en el biotratamiento anaerobio conducente a la fermentación metanogénica se distinguen dos fases, la primera fase es una transformación de moléculas orgánicas en ácidos grasos y emisión de gas y la segunda es la transformación de esta mezcla gaseosa esencialmente constituida por metano y dióxido de carbono.

La mayoría de bacterias requieren para su catabolismo sustancias orgánicas exógenas que son sometidas a procesos enzimáticos complejos que incluyen cuatro fases:

- Digestión: muchas fuentes apropiadas de energía orgánica son de tamaño molecular demasiado grande para penetrar la membrana celular y alcanzar el sitio de oxidación. Estas moléculas primero deben ser descompuestas por la célula en fragmentos más pequeños; estos fragmentos son lo suficientemente pequeños para penetrar la célula.
- Penetración: las pequeñas moléculas producidas en la digestión pueden difundirse lentamente dentro de las células a través de la membrana osmótica (membrana semipermeable).
- Penetración para la oxidación: hay varios tipos de reacciones exergónicas que son preparativas, tales como la remoción no oxidativa de los grupos carbonilo y amino (descarboxilación y desaminación); la eliminación de un hidroxilo junto con un hidrogeno para formar agua (deshidratación), la eliminación de un sulfhídrico conjuntamente con un hidrógeno (desulfuración), etc. La reacción más importante, sin embargo, es la unión con un grupo fosfato (fosforilación), ya que esta unión permite el atrapamiento de energía.

- Oxidación: es por la oxidación de compuestos fosforilados, en general, que la energía es atrapada en una forma apta para posterior uso de la célula. La energía se libera mediante reacciones de oxidación. Pero las bacterias y otros microorganismos no oxidan la materia orgánica por adición directa de oxígeno, sino más bien le sustraen el hidrógeno.

Estas reacciones requieren de una sustancia (el dador de hidrógeno) que suministre el hidrógeno orgánicamente combinado y que otra sustancia (el aceptor de hidrógeno) lo reciba. Es por medio de tales reacciones por lo que la vida sin aire es posible. Las transformaciones del hidrógeno en ausencia de oxígeno son llamadas fermentaciones, las bacterias anaerobias estrictas usan el oxígeno químicamente combinado, el carbono, el nitrógeno o el azufre como su aceptor de hidrógeno, las bacterias que reducen sulfato forman un grupo altamente especializado, constituido por el género desulfovibrio, que utilizan los sulfatos como aceptores de hidrógeno.

Los grupos tróficos con sus respectivos sustratos y productos se agrupan así:

Los conformados por bacterias hidrolíticas y fermentativas (Grupo I); por bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrogeno (Grupo II); las bacterias metanogénicas (Grupo III) y un cuarto grupo que puede sintetizar acetato de H_2 y CO_2 , las bacterias homoacetogénicas.

Los grupos de bacterias fermentativas, acetogénicas productoras de hidrógeno y acetogénicas consumidoras de hidrógeno, producen básicamente hidrógeno, dióxido de carbono y acetato, mientras que las metanogenas reductoras de CO_2 y acetoclásticas producen metano. Para mantener una digestión eficiente debe haber producción de metano y mantenerse una concentración baja de hidrógeno.

Las bacterias productoras de metano se pueden subdividir en dos grupos: Bacterias consumidoras de acetato, responsables del 70% de la producción de metano y las bacterias consumidoras de hidrogeno responsables del restante 30%.

La estabilización o remoción biológica anaerobia de DBO ocurre en la etapa de formación de metano, porque éste es poco soluble en el agua y se evapora con el gas que sale del reactor. El CO_2 producido también escapa como gas o es convertido en alcalinidad bicarbonacea.

Una consecuencia importante de ineficiencia de las bacterias anaerobias, es la de que hay menos energía disponible para el crecimiento, por tanto hay baja velocidad de crecimiento y de producción celular; la baja producción celular puede compensarse manteniendo un alto nivel de lodo microbial en el reactor. A causa de la baja tasa de crecimiento celular y de la conversión de materia orgánica en CH_4 y CO_2 , la materia resultante suele estar bien estabilizada.

Existen importantes diferencias en coeficientes de producción celular, entre los grupos que conforman la comunidad anaerobia, además la afinidad por el sustrato juega un papel importante, ya que existe competencia ecológica entre dos grupos de bacterias metanogénicas.

Tabla 1-5 Parámetros de crecimiento de bacterias anaerobias reportados a 30 y 35 °C.

TIPO DE BACTERIA	TIEMPO DE DUPLICACION (DIAS)	PRODUCCION CELULAR (gr. SSV/gr DBO5)
Lodos Activados Bacterias Aerobias	0.030	0.40
Acidificación Bacterias Fermentativas	0.125	0.14
Acetogénesis Bacterias Acetogénicas	3.5	0.03
Metanogénesis Bacterias Autotróficas	0.5	0.07
Bacterias Acetoclásticas	7	0.02

Fuente: ARDILA, Rojas Isidro. Análisis y Evaluación Físicoquímica de un reactor UASB. UIS 2000.

La Tabla 1-5. indica que las bacterias fermentativas se reproducen a una velocidad mucho más rápida que las metanogénicas, la baja tasa de crecimiento de las bacterias metanogénicas acetoclásticas es el factor que contribuye en más importancia a los largos periodos de arranque, por lo tanto la etapa límite de la digestión anaerobia es la metanogénesis, como resultado de esto la DBO₅ utilizada por la población metanogénica en el reactor determina la máxima carga de DBO₅ que puede aplicarse, si la velocidad de carga excede la capacidad metanogénica se producirá una acumulación de ácidos grasos volátiles en el reactor, el pH disminuirá y como consecuencia pueden llegar a ser tóxicos.

En la década pasada, el desarrollo de digestores comerciales en Occidente se retardó, por una falta de digestores mecánicamente confiables y del conocimiento de cómo operan óptima y eficientemente. Recientes avances de esta tecnología la ha empezado a expandir.

1.4 Subproductos del tratamiento anaerobio

1.4.1 Biogás

Es un subproducto al que se le ha dado mucha importancia en los países asiáticos y en los cuales ha tenido un notable éxito y avance, como lo es la utilización del biogás como fuente alternativa de combustible de bajo costo y energéticamente competente con los demás combustibles del mercado. Además de ser obtenido de un proceso de purificación del medio ambiente.

El biogás es un gas combustible debido a la presencia de metano, siendo su poder calorífico (PCL) cerca de 5500 Kcal/m³, cuando la proporción de metano es cerca del 60%.

Tabla 1- 6 Poder calorífico de diversos combustibles.

Gas	PCL en Kcal/m³
Metano	8500
Propano	22000
Butano	28000
Gas Natural	7600
Biometano	5500

Fuente: ARDILA, Rojas Isidro. Análisis y Evaluación Físicoquímica de un reactor UASB. Escuela de Ingeniería Química UIS 2000.

El gas más corrosivo de esta mezcla que constituye el biogás es el sulfuro de hidrógeno (H₂S), su presencia constituye un problema a partir del momento en que su composición es mayor del 1% en volumen, siendo mortal al momento de ser inhalado o cuando es llevado a combustión, dado que la formación dióxido de azufre es extremadamente nociva, causando normalmente perturbaciones a nivel pulmonar.

El amoníaco se encuentra en poca proporción, pudiendo ser corrosivo para el cobre, y después de la combustión libera gases igualmente tóxicos.

Otros gases contenidos en el biogás no suscitan problemas en términos de toxicidad o riesgo. El gas carbónico ocupa cerca de un 35% en volumen, que al ser comprimido obliga a que se aumente su capacidad de almacenamiento. El contenido de agua puede ser corrosivo en las tuberías o producir taponamientos.

Se pueden considerar tres formas de utilización del biogás generado por digestión anaerobia:

- Aplicación directa como fuente de calor (cocina, alumbrado).
- Combustión en calderas de vapor convencionales aprovechando el calor para calentar el digestor y para calefacción en general.
- Utilización como combustible en motores de combustión interna acoplados a generadores de electricidad.

Cuando el biogás se usa únicamente como fuente de calor, se quema en su estado original. Se dispone de una instalación previa de gas natural o butano, basta con adaptar los quemadores a las características del biogás.

Existen en el mercado motores que utilizan biogás con potencias comprendidas entre 15 y algunos centenares de Kw. La potencia desarrollada se utiliza para accionar diversas máquinas, bien directamente, o previa su transformación en electricidad. Al mismo tiempo, el calor recuperado de la refrigeración del motor o de los gases de escape se usa para obtener agua o aire calientes, utilizables en calefacción tanto ambiental como del digestor, secado, etc.

1.4.2 Efluente

Se llama efluente a la salida líquida del reactor con un porcentaje de materia orgánica degradada más el lodo generado por las reacciones bioquímicas.

La utilización del efluente puede hacerse de forma integral o después de una separación de las fases sólida y líquida. Por lo que respecta a la finalidad buscada, los campos de aplicación de este efluente son, fundamentalmente, dos: la fertilización de suelos y la alimentación animal.

La riqueza del efluente en nitrógeno, fósforo, potasio y otros componentes hace del efluente un material de valor considerable como fertilizante. La fuerte disminución que experimenta la carga contaminante de un residuo de partida en el proceso de digestión posibilita su aplicación al suelo en cantidades mucho mayores que las admisibles para el material de partida, sin riesgo de sobrepasar los niveles de materia orgánica que puedan provocar en el suelo disminuciones peligrosas del nitrógeno disponible, como consecuencia de desarrollos anormales de microflora. A partir de esto nacen iniciativas con “estrategias innovadoras” que prevén la irrigación de suelos con mezclas constituidas por aguas depuradas total o parcialmente, y sustancias húmicas extraídas de compost del lodo.

Se considera que modulando oportunamente la carga orgánica y nutritiva que se adiciona al suelo con la mezcla agua-sustancia húmica, en función del sistema de drenaje de que disponga el mismo, puede conseguirse un aporte no problemático desde el punto de vista sanitario y ambiental, y sumamente efectivo como ahorro hídrico, así como para aumentar la fertilidad del suelo.

La otra gran alternativa de utilización del efluente es en el campo de la alimentación animal. El contenido en microorganismos del efluente, y por tanto, en proteínas (alrededor del 20% de la materia sólida), le confiere un gran valor potencial como aporte proteico para piensos. No obstante, las posibilidades reales de utilización de este residuo en la preparación de productos alimenticios para animales son muy limitadas, por contener junto con las proteínas, proporciones demasiado altas, tanto de fibra como de minerales.

1.4.3 Lodo

El lodo es una suspensión negra, que después de ser tratada por algún medio para retirarle la humedad y eliminar patógenos, está exenta de olores ofensivos, éste sedimenta fácilmente y tiene un pH aproximadamente neutro. Está compuesto por una serie de productos inorgánicos solubles e insolubles (principalmente sales), por diferentes materiales orgánicos no digeridos (proteínas, grasas, celulosa, lignina, etc.) y por las bacterias responsables del proceso.

1.5 Etapas de la digestión anaerobia

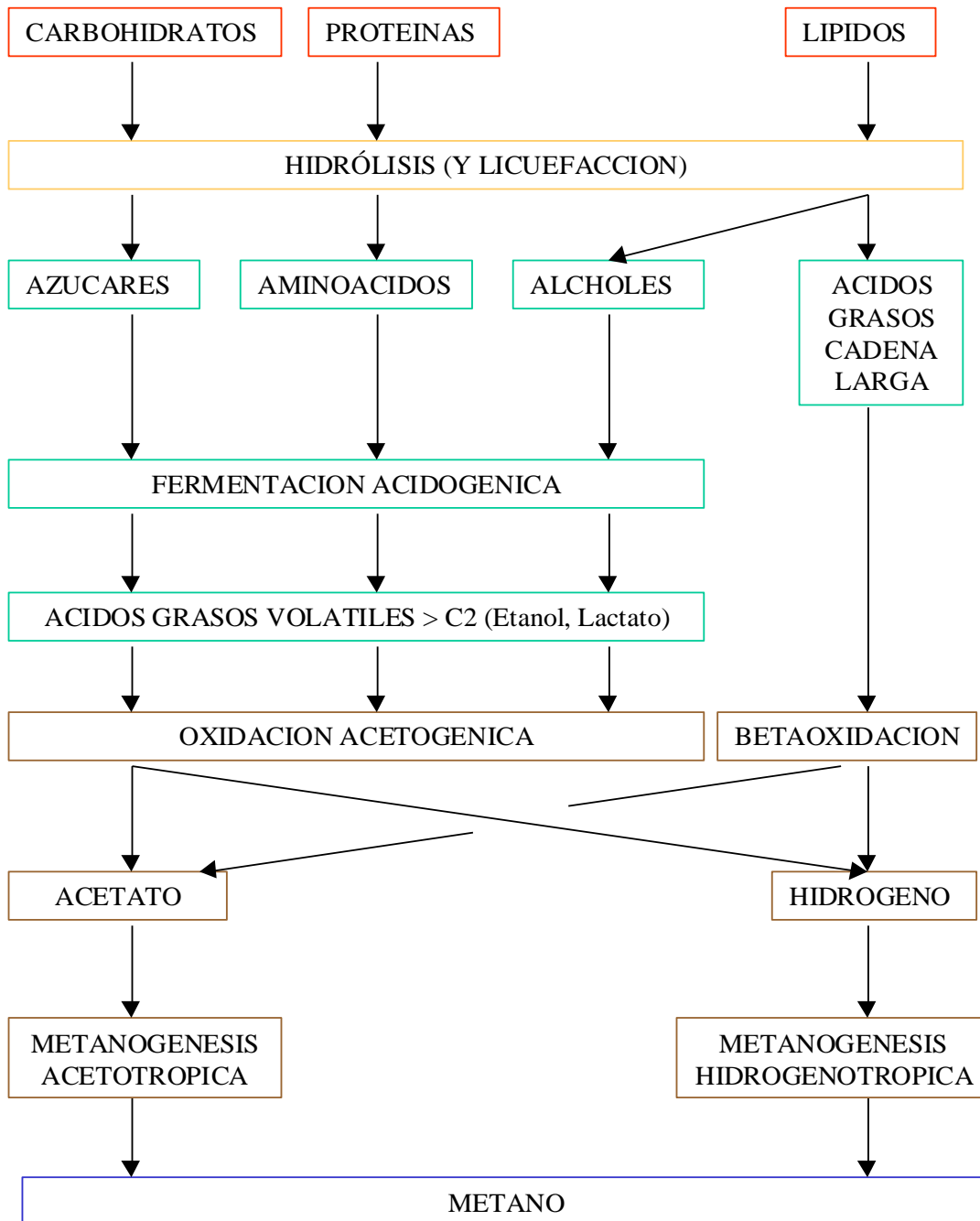
Se denomina digestión anaerobia a proceso en virtud del cual la materia orgánica es convertida en metano, dióxido de carbono e hidrogeno, en ausencia de oxígeno y a causa de la acción combinada de diferentes poblaciones bacterianas. Se produce en ambientes naturales como pantanos, en zonas anegadas para el cultivo de arroz, en los sedimentos de lagos y mares, en fuentes de aguas termales sulfurosas y en el tracto digestivo de los rumiantes.

El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo por etapas. Inicialmente las proteínas, los carbohidratos y lípidos, son convertidos en ácidos grasos y alcoholes por una amplia variedad de microorganismos anaerobios. Posteriormente los ácidos se usan para la fabricación del metano, estos microorganismos, son de crecimiento muy lento. Los digestores particularmente de lodos se operan bajo condiciones mesófilas.

El gas producido puede ser recogido y utilizado como combustible. El fango final, estabilizado, que se extrae no es putrescible, y su contenido en organismos patógenos es nulo o muy bajo.

Esta conversión biológica del sustrato complejo, en el que se encuentra materia orgánica en suspensión o disuelta, se realiza a través de una serie de reacciones bioquímicas que transcurren tanto consecutiva como simultáneamente, y cuyo proceso completo comprende las siguientes etapas: hidrólisis, Acidogenesis o fermentación, acetogenesis acidoclasticos, acetogenesis hidrogenoclasticos, metanogéneis hidrogenoclasticos, metanogenesis acetoclasticos. El diagrama de la figura 1-6 muestra las etapas del proceso de digestión anaerobia en el tratamiento de las aguas residuales (Collazos, 2000).

Figura 1-6. Etapas del proceso de digestión anaerobia.



Fuente: Collazos, 2002

1.5.1 Hidrólisis

Los compuestos orgánicos complejos, que se encuentran en las aguas residuales deben sufrir una hidrólisis inicial que los convierta en sustratos orgánicos simples, principalmente azúcares, aminoácidos, ácidos grasos volátiles de bajo peso y alcoholes. Las bacterias que llevan a cabo estas reacciones son anaerobias facultativas y los géneros más frecuentes que llevan a cabo esta reacción son los miembros de la familia enterobacteriaceae. Estos sustratos simples pueden ser asimilados por las bacterias e incorporados en la glucólisis y otros procesos metabólicos básicos que ocurren internamente en las bacterias.

La hidrólisis tiene lugar externamente por la acción de la exoenzimas de las bacterias genéricamente conocidas como acidogénicas o fermentativas.

La hidrólisis de algunos sustratos solubles es muy rápida, pero la de sustratos muy complejos y/o particulado puede ser extremadamente lenta.

Durante esta fase se verifica la hidrólisis (licuefacción) y posteriormente fermentación de las sustancias orgánicas de elevado peso molecular, tales como lípidos, proteínas e hidratos de carbono, que se encuentran en suspensión o disueltas.

Estas sustancias quedan transformadas y reducidas a otros compuestos orgánicos de cadena molecular más corta, principalmente en ácidos grasos volátiles y gases CO_2 y H_2 .

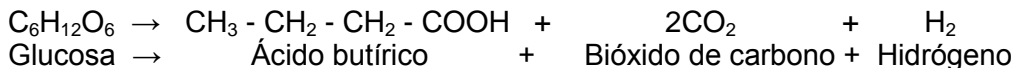
Un típico ejemplo de hidrólisis es la sacarosa que al incorporar una molécula de agua (por esta incorporación es que el proceso se denomina hidrólisis), se convierte en dos moléculas de glucosa y fructosa (que son isómeros).

La glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) y la fructosa (que es isómera de la glucosa) son rápidamente incorporadas en la glucólisis.

En general, si partiésemos de polisacáridos, el proceso sería:

Polisacáridos \rightarrow Glucosa \rightarrow Ácidos grasos + Gas

Una de las reacciones que se darían en este caso sería:



Este metabolismo anaerobio lo realizan bacterias de crecimiento rápido (formadoras de ácidos), que fermentan la glucosa para producir los mencionados ácidos. El pH de la operación suele ser inferior a 7.

1.5.2 Acidogénesis o fermentación

Una vez ocurrida la hidrólisis las bacterias acidogénicas toman los sustratos simples y los descomponen internamente mediante los procesos metabólicos básicos.

Los azúcares entran por ejemplo a la glucólisis. El producto final en ausencia de oxígeno es otro aceptor de electrones potentes, es decir en condiciones anaerobias depende de la concentración de hidrógeno. Si la presión parcial de H_2 es menor de 10^{-4} atmósfera el producto final será ácido acético y, en caso contrario, ácido propiónico, ácido butírico y ácido Valerio.

Básicamente consiste en el hecho de que en la reacción de producción de ácido acético a saber:



1.5.3 Acetogénesis acidoclasticos

Como los ácidos grasos volátiles, distintos del ácido acético son producto final de la Acidogenesis en ciertas condiciones (para $P_{H_2} > 10^{-4}$ atm) y a partir de ciertos sustratos básicos es necesario su conversión a ácidos acéticos para su posterior metanogenesis, puesto que el ácido acético es la fuente del 70% del CH_4 .

Los ácidos grasos volátiles distintos del acético no pueden convertirse a metano directo (Ej.: metanol. Ácido fórmico) pero no son frecuentes en la digestión anaerobia.

Los ácidos grasos volátiles deben metabolizarse a ácido acético antes de efectuarse la metanogénesis.

1.5.4 Acidogénesis hidrogenoclasticos

Existe la posibilidad de convertir el H_2 formado de las reacciones acidogénicas y acetogénicas productoras de H_2 (acetogenesis acidoclasticos), en ácido acético. Esta reacción tiene como función principal el mantener los niveles de (H_2) en las condiciones adecuadas consumiéndolo, para que la digestión anaerobia proceda.

Esta reacción compite con la metanogénesis hidrogenoclasticos por el H_2 .

1.5.5 Metanogénesis hidrogenoclasticos

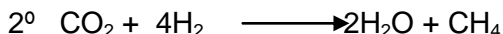
Las bacterias metanogénicas (anaerobias estrictas) son esenciales para este tipo de digestión, por ser los únicos microorganismos que pueden catabolizar anaerobiamente el ácido acético e hidrógeno, en ausencia de energía lumínica y oxígeno; pueden producir metano, CH_4 . Esta reacción, con la anterior, mantiene los niveles (H_2) en valores adecuados para la digestión anaerobia. Es una reacción muy ágil.

Para un óptimo trabajo, el elemento acuoso circulante debe tener un pH entre 6,6 y 7,6.

Luego se verificarían las reacciones finales siguientes:



(Ácido acético + bacterias acetoclastas \longrightarrow bióxido de carbono + metano)



(Bióxido de carbono + Hidrógeno \rightarrow agua + metano)

La temperatura es un factor muy importante para que se verifiquen éstas transformaciones metabólicas.

1.5.6 Metanogénesis acetoclasticos

La conversión del ácido acético es la vía principal de producción de CH_4 , en la digestión anaerobia es una reacción lenta, termodinámicamente difícil pero inexorable puesto que es la responsable por la producción de cerca del 70% del metano.

Para mantener un sistema de tratamiento anaeróbico que establezca correctamente el residuo orgánico, deben hallarse en estado de equilibrio dinámico los microorganismos formadores de ácidos y metano, es decir, las reacciones deben producirse continua y sucesivamente, ya que el funcionamiento anormal de una de ellas, dará lugar al mal funcionamiento global del proceso.

Muchos microorganismos metanogénicos son similares a los encontrados en el estómago de los animales rumiantes. Se considera que una de las reservas mundiales de gas natural tiene su origen en la actividad metabólica de estas bacterias.

1.6 Reactor anaerobio de flujo ascendente a través de un manto de lodo - UASB (Upflow anaerobic sludge blanket)

El UASB se desarrolló en los Países Bajos y en la actualidad se utiliza ampliamente en Europa y en América del Sur. El líquido a tratar se introduce en el fondo del reactor, desde donde fluye hacia arriba a través de un manto de lodos compuesto por partículas o gránulos biológicos densamente formados. Los gránulos de lodo varían de tamaño desde 0,8 hasta 2,2 milímetros. En algunos casos, el manto de lodos no es granular sino floculento. Los gases que se producen bajo condiciones anaerobias (en especial el metano y el dióxido de carbono) sirven para mezclar los contenidos del reactor a medida que ascienden hacia la superficie. El gas que asciende ayuda a formar y a mantener los gránulos, mientras que el material, que se mantiene a flote, gracias a los gases, se estrella contra los tabiques desgasificadores y se depositan de nuevo sobre la zona en reposo de sedimentación arriba del manto de lodos. El gas es atrapado en un domo colector de gases localizado en la parte superior del reactor.

El propósito del tratamiento anaerobio es eliminar los componentes de la DQO_{BD} del agua residual.

El efluente pasa a través de un manto de lodo que logra que los microorganismos floculen o granulen, de manera que permanezcan en el reactor. No dispone de un medio

inerte para desarrollar los microorganismos, por lo tanto hay que favorecer la coagulación y la floculación de los lodos, manteniendo condiciones adecuadas, Se consiguen mayores carga volumétricas que en un reactor de contacto anaerobio (aprox. 10 - 20 Kg. DQO / m³ d), No debe ingresar el agua con concentraciones de lípidos mayor de 50 ppm, ya que la capa de lípidos evita el contacto fluido – granulo.

1.6.1 Ventajas del sistema:

- Soporta altas cargas (20 Kg. DQO / m³ d).
- Bajo requerimiento de energía.
- No requiere medio soporte (bajo costo).
- Construcción relativamente simple.
- Con inculo apropiado puede arrancar de forma inmediata.
- Aplicable a pequeña y gran escala.
- Operación comparativamente simple.
- Proceso ampliamente probado.

1.6.2 Desventajas del sistema:

- La granulación es lenta, no necesariamente controlable.
- No todas las aguas favorecen la granulación.
- Requerimiento de lodos de determinadas características y sensible a sólidos suspendidos (aumenta concentración de SS en reactor distintos de biomasa), grasas y aceites en el influente.
- Sensible a aguas que forman precipitados (llenan fondo del reactor y el lecho sube).
- Riesgo de flotación de los granos durante el re arranque (gránulos varían de densidad).

1.6.3 Tipos de lodos usados en el tratamiento UASB

El tiempo para el arranque del reactor será corto si el lodo utilizado como inculo tiene una alta actividad metanogénica y está 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 inculo para las plantas de tratamiento normalmente se realiza a partir de otros reactores o estos son suministrados por compañías privadas; sin embargo, en los países de América latina que han venido

utilizando esta tecnología, la obtención de inóculos no es una tarea fácil por la inexistencia de suficientes reactores anaerobios que suministren inóculos de calidad.

Frente a esta dificultad se ha estado trabajando en el acondicionamiento de inóculos a partir de fuentes diferentes a los reactores anaerobios. Por ejemplo se han ensayado inóculos provenientes de lodos activados, lagunas de estabilización, tanques de sedimentación y tanques sépticos, requiriéndose por lo tanto la adaptación de dichos inóculos al sustrato que se va a utilizar.

En la tabla 1-7 se reportan las posibles fuentes de inóculos de los reactores, así como los valores de actividad metanogénica y el contenido de sólidos suspendidos volátiles.

Tabla 1-7. Diferentes fuentes de inóculos para reactores anaerobios

Tipo de inóculo	Actividad metanogénica específica gCH ₄ -DQO/g SSV.d	Concentración típica de SSV en el lodo g/l
Lodo granular	0.5 - 1.5	70 - 120
Biopelícula	0.4 - 1.2	ND
Lodos domésticos digeridos	0.02 - 0.2	15 - 40
Estiércol digerido	0.02 - 0.08	20 - 80
Lodo de fosa séptica	0.01 - 0.07	10 - 50
Laguna anaerobia	0.03	30
Estiércol fresco	0.001 - 0.002	30 - 140
Sedimento laguna	0.002 - 0.005	20 - 50

Fuente: DIAZ María consuelo. Digestión Anaerobia.

Una de las características más importantes que debe tener un lodo para inóculo es la sedimentabilidad ligada a la granulación. Sin embargo la granulación a partir de un lodo de mala calidad (flocúento), es un proceso que tiene éxito en la medida que sea la composición del agua residual más concentrada, siendo este un factor adverso respecto a las ARD que son bastantes diluidas (DQO < 500mg/L). A pesar de esto, se ha demostrado que aunque un lodo no granule, se pueden obtener buenas eficiencias de remoción de DQO (Lettinga, 1992).

Con relación a los tipos de lodo para el tratamiento existen 3 clases: 1) lodo disperso, el cual presenta una sedimentabilidad muy baja, actividad metanogénica baja y ofrece eficiencias de remoción a lo sumo del 60%, 2) lodo flocúento, esta clase es más apropiado para tratamiento anaeróbicos de residuos orgánicos en lagunas de oxidación y en sistemas de lodos activados. Posee una mejor sedimentabilidad que el disperso y una mejor tasa de actividad metanogénica específica. Para reactores UASB es usado aunque con tasas de remoción entre el 60 y 85 %, se requiere un mayor tiempo de aclimatación y no garantiza protección al consorcio microbiano encargado de la producción de biogás 3) lodo granular, presenta un tiempo de sedimentación bajo lo cual

es muy bueno para el proceso ya que ofrece muy poca pérdida de biomasa en el tratamiento, remoción de materia orgánica entre el 80 y el 96%, alta actividad metanogénica, mejor superficie de contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato y más protección frente a fluctuaciones en los parámetros de control.

Una manera de obtener lodo granular es a partir de los lodos activados ya que poseen además de bacterias aerobias estrictas, otras de tipo facultativas –que pueden crecer en ausencia o presencia de oxígeno.

También puede obtenerse directamente de otros reactores anaerobios o incluso a través del rumen de las vacas que también posee microorganismos anaerobios.

En el caso de un posible tratamiento de agua residual doméstica se recomienda el uso de lodo floculento y el granular, aunque debido a que esta clase de residuo presenta cargas orgánicas bastantes diluidas (DQO < 500 ppm) es más recomendable el uso de lodo granular.

En la tabla 1-8 se consigna un resumen de las principales características de los lodos granulares presentes en reactores UASB de alta carga.

Tabla 1-8: Propiedades del lodo granular.

Características	Intervalo
Densidad (Kg/m ³)	1028 a 1082
Relación SSV/SST	0,45 a 0,90
Velocidad media sedimentación (m/h)	53 a 100
Diámetro medio de gránulos (mm)	0,8 a 2,2
Actividad metanogénica (gDQO-CH ₄ /gSSV/d)	0,2 a 1,9

Fuente: DIAZ María consuelo. Digestión Anaerobia

1.6.4 Factores importantes del desempeño de un reactor UASB¹³

- **Factores ambientales:**

pH: El valor del pH no solo determina la producción de biogás, sino también, lo que es más importante, su composición en metano, ya que debajo de 6.2 la acidez existente en el reactor inhibe fuertemente la actividad de las bacterias metanogénicas, y por debajo, entre 4,5 y 5,0 la inhibición afecta también a las fermentativas. Efectos similares se detectan en valores de pH por encima de 8.

¹³ MANUAL DE CURSO, Arranque y Operación de Sistemas de Flujo Ascendente con Manto de Lodo UASB. Universidad del Valle – Universidad Agrícola de Wageningen Holanda. Cali 1987.

El rango óptimo de pH está comprendido entre 6,6 y 7,4.

Temperatura: Si el intervalo de temperatura de un reactor cambia, es necesario iniciar nuevamente el arranque del reactor, una nueva población bacteriana tiene que ser cultivada. La actividad y el crecimiento de las bacterias disminuye en un 50% por cada 10°C de descenso por debajo de 35°C, cambios en la temperatura pueden ser tolerados, pero no es aconsejable aumentar la temperatura de los reactores por encima de 42°C, ya que puede ocurrir un deterioro de las bacterias.

- **Factores de proceso:**

Carga Hidráulica: Es importante porque hay interés en controlar el lavado del lodo proveniente del reactor.

Mezclado y Contacto del Lodo y el Agua Residual: Es muy crítico porque en el contacto del líquido con el lodo existe el peligro de que haya canalizaciones, esta canalización será más grande si hay baja tasa de producción de gas (menos de 1m³/m³ día).

Características de Sólidos Suspendidos: Se debe considerar un número importante de características porque dependiendo de ellas puede tener efectos en el manto de lodos, algunas de ellas son:

- Biodegradabilidad, tamaño y área superficial de los sólidos suspendidos.
- Afinidad de las bacterias para atacar el material.
- Sedimentabilidad y/o flotabilidad.
- Coalescencia.

Nutrientes: Por ser un proceso biológico se requiere de ciertos nutrientes inorgánicos esenciales para su metabolismo, la escasez de estos limita el crecimiento. La mayoría de aguas residuales domésticas no presentan una deficiencia de nutrientes.

Actividad Metanogénica Específica del Lodo: 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 masa de biomasa y por unidad de tiempo, lo cual se expresa con las siguientes unidades: g DQO – CH₄/ g SSV día.

Para evaluar la actividad metanogénica específica (AME) del lodo se determina la capacidad del consorcio microbiano para generar metano, lo cual se mide bajo condiciones controladas de temperatura. Se puede utilizar diferentes sustratos en forma individual o mezclados, lo cual permitirá establecer la presencia y la actividad de los diferentes grupos metanogénicos.

La actividad metanogénica se mide bajo condiciones de saturación de sustrato; por lo tanto, la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) deberá ser suficiente para que su difusión en el lecho del lodo no constituya una limitante. Así por ejemplo, en ensayos estáticos con frecuencia el lodo se sedimenta y forma una capa que limita la difusión del sustrato. También se debe adicionar macro y micronutrientes y una solución buffer para mantener el pH cercano a 7, mientras su incubación puede hacerse con o sin agitación, a

una temperatura entre 30 y 35 °C. En estas condiciones ambientales los microorganismos presentes en el lodo podrán llevar a cabo la transformación del sustrato. Como resultado, podrá calcularse la tasa máxima de producción de metano para el lodo bajo estudio (Field, 1987). En reactores a escala real, o en la naturaleza, la tasa de conversión de sustrato a metano es menor debido a que existen limitaciones en la cantidad de sustrato, en la cantidad de nutrientes y en las condiciones ambientales.

Para determinar la cantidad de lodo y de sustrato que se deben adicionar en la prueba, se han hecho algunas recomendaciones (Field, 1987) las cuales se consignan en la siguiente tabla 1-9:

Tabla 1- 9 Relaciones SSV/ AGV

Sistema	Lodo SSV (g/ L)	AGV*(g/ L) DQO
Agitado	2.0 – 5.0	2.0 – 4.0
No agitado	1.0 – 1.5	3.5 – 4.5

Fuente: DIAZ María consuelo. Digestión Anaerobia.

*los AGV del sustrato deben ser neutralizados a un pH 7 usando NaOH; de lo contrario, la baja de pH y la alta fracción de AGV no ionizado causaran inhibición severa de la metanogénesis.

Los sustratos más utilizados para este ensayo son una mezcla de H₂-CO₂ (80% - 20%), ácidos grasos neutralizados solos o en mezclas, específicamente los ácidos formico, acético, propiónico y butírico; también se utilizan alcoholes, metanol, etanol y carbohidratos (glucosa).

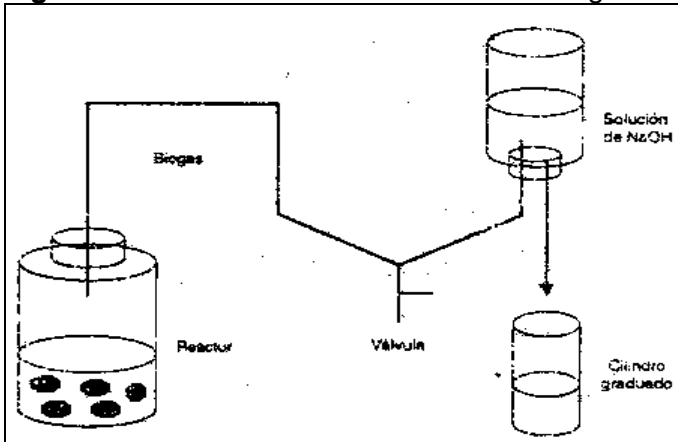
La actividad metanogénica de lodo puede verse afectada por el tiempo que el lodo requiere para adaptarse al sustrato, este periodo se denomina “fase de adaptación” o “fase lag”. Por esta razón, previamente a su determinación, se hace una primera alimentación con el sustrato, de forma que la actividad se mide durante la segunda alimentación.

Metodologías. Existen diferentes metodologías para realizar el ensayo de actividad metanogénica, las cuales se diferencian en la forma como se mide la cantidad de CH₄ producido y en la manera como se realiza la adición del sustrato.

Las metodologías básicas de medición de la producción de metano son las siguientes:

Medición de metano por desplazamiento de líquido, para lo cual se utilizan recipientes de 0.5 litros o mayores y un sistema de desplazamiento de líquido (figura 1-2). El biogás producido se burbujea en una solución alcalina (generalmente en NaOH o KOH) con pH mayor de 12 en la cual el CO₂ es absorbido y el volumen de gas metano desplazara un volumen igual a la solución alcalina; esta metodología exige un montaje y un seguimiento muy cuidadoso. El volumen de líquido desplazado fuera de la botella de solución será equivalente al volumen de biogás generado por el sistema.

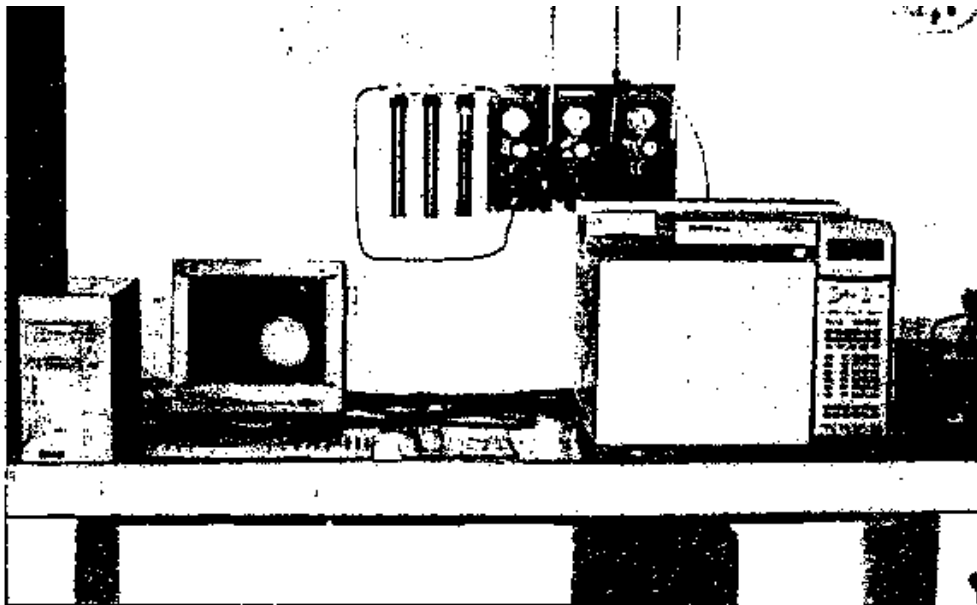
Figura 1-7. Medición de la actividad metanogénica por desplazamiento.



Fuente: DIAZ María consuelo. Digestión Anaerobia.

Medición del volumen de metano mediante la determinación de la concentración de CH_4 por cromatografía de gases en un sistema cerrado, mediante el uso de botellas serologicas de 60 o 120 ml, en las cuales la fase gaseosa corresponde a 2/3 del volumen de la botella donde podrá acumularse el metano producido. Tanto en la preparación del medio de cultivo, como en la inoculación se debe seguir los procedimientos recomendados para el manejo de microorganismo anaeróbicos (evitar contaminación con oxígeno y mantener condiciones reductoras). Aunque en este método la manipulación de las botellas es mucho más simple, los requerimientos de equipos de cromatografía de gases limitan su uso.

Figura 1-8. Cromatógrafo de gases para medición de metano.



Fuente: DIAZ María consuelo. Digestión Anaerobia.

- **Medición de metano por desplazamiento de líquido.**

Materiales y equipos:

Botella de suero de 500 ml

Sistema de mangueras y agujas para comunicar la botella utilizada como reactor, con la botella utilizada para medir la producción de metano por desplazamiento de líquido.

Cuarto caliente o baño de María.

Solución de NaOH con fenoftaleina como indicador de pH.

Procedimiento

Se toman dos botellas de suero de 500 ml cada una, una va a ser el blanco que va a contener agua destilada con lodo, a la cual no se le va agregar sustrato y otra botella con lodo y agua residual, es decir con sustrato y nutrientes, que es la botella a la cual se le va a medir la cantidad de NaOH desalojado, la otra botella se tomará como referencia para determinar cuál es la cantidad real de metano que está desplazando.

La temperatura a la cual se va a mantener en el baño María es de 34°C

Luego se llenan dos probetas invertidas y sumergidas de 1000 ml cada una, las cuales van a contener el NaOH, dentro de estas se coloca una manguerita que va a estar en contacto con cada botella de suero, por medio de estas el gas que se está produciendo en las botellas de suero va a ser conducido hasta las probetas las cuales van a indicar el NaOH desalojado, por ende la cantidad de metano.

Se determina la producción diaria de metano a intervalos regulares de tiempo para determinar el periodo de tiempo en el cual se obtiene la mayor producción de metano. Es importante agitar la botella que contiene lodo antes de realizar la lectura para liberar el gas del lodo y conseguir mayor contacto entre el sustrato y el lodo.

1.6.5 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño en el reactor UASB son:

Relación de producción de biogás.

La altura del manto de lodos.

Temperatura del agua residual.

Remoción de carga orgánica.

Producción de H₂S, hasta el momento no se ha considerado como tal, pero tenderá a que se considere como una variable de diseño, ya que éste ha sido uno de los inconvenientes por los cuales esta tecnología ha sido rechazada por la comunidad y se requiere que su concentración y emanación sea monitoreada y controlada.

Tabla 1-10 Algunos parámetros de diseño recomendados para reactores UASB

Máxima tasa de flujo recomendada en el fondo del reactor	
Lodo dispersado	0.25m/h
Lodo flocúleno	1-2m/h
Lodo granular	5m/h
Número recomendado de puntos de alimentación para lodo flocúleno de espesor medio, entre 1 y 2 puntos de alimentación por m ² , para cargas menores de 1-2 KgDQO/m ³ día.	
Mínimo traslape entre el separador GLS y campana de gas	0,15 m.
Altura del sedimentador	1,5-1,6 m.
Cabeza estática entre las cajas de distribución y el nivel del agua en el sedimentador	0,50 m
Numero de vertederos por metro de canaleta	4.
Altura del fondo del reactor al punto de entrada	0,20 m
Máxima altura del reactor	6 m
Recomendada	4 y 4,8 m

1.6.6 Materiales de construcción recomendados para reactores UASB

En la práctica del tratamiento anaeróbico de aguas residuales se ha encontrado que la corrosión es el mayor problema en el mantenimiento de la planta. Los principales precursores de la corrosión del material son CO₂ y H₂S.

Se ha encontrado que la sobresaturación del contenido del reactor con CO₂ es la causa de la corrosión del concreto. El CO₂ causa la disolución del calcio del concreto y así su debilitamiento. Se ha sugerido que la calidad del concreto influye fuertemente en la susceptibilidad al ataque del CO₂.

El H₂S es el componente que causa los más grandes problemas de corrosión. El gas es formado en el proceso anaeróbico y en contacto con el aire se oxida a H₂SO₄. El problema es conocido en los alcantarillados donde la parte húmeda del tubo de alcantarillado tiende a sufrir serios ataques debido a la formación del H₂SO₄. El H₂S sale del reactor no sólo a través del gas, sino también a través del efluente y por consiguiente su control se difícil.

Para el uso de materiales resistentes a la corrosión se establece que la sensibilidad de un cierto material de construcción, a la corrosión, puede depender de la aplicación. Hierro galvanizado por ejemplo, se corroerá rápidamente cuando esté en contacto con el desecho, pero en aplicaciones secas (rieles, escaleras) será poco afectado. En la selección de materiales de construcción para una planta de tratamiento, esto debe ser

tenido en cuenta, considerando además que el uso de materiales muy resistentes resulta generalmente muy costoso. Un diseño apropiado entonces, busca un óptimo en el uso de materiales resistentes a un bajo costo.

A continuación se presentarán algunos materiales y sus posibles aplicaciones en una planta de tratamiento anaeróbico:

Concreto: El concreto es ampliamente disponible y generalmente existe mucha experiencia para trabajar este material. El ataque por CO_2 solamente ocurre bajo la superficie del agua en el reactor UASB. Sobre la superficie del agua y bajo condiciones aeróbicas el concreto no es atacado. Hoy en día se recomienda aplicar una capa protectora en las superficies húmedas de la planta. Este revestimiento puede consistir de una pintura epóxica o similar. En la práctica, el tiempo de vida de tal revestimiento está limitado y periódicamente debe aplicarse uno nuevo. Lo mejor, aunque es la solución más costosa es incorporar una placa de PVC al hacer la fundición.

Acero inoxidable: El acero inoxidable es resistente al ambiente de la planta de tratamiento. Por su durabilidad puede recomendarse para todo tipo de aplicaciones, pero tiene un alto costo y a menudo es difícil de conseguir. Por esta razón el acero inoxidable debe ser usado solamente en esas partes que son críticas para un apropiado funcionamiento de las planta y que son además muy susceptibles a la corrosión. Algunas aplicaciones son vertederos de sobreflujo, canaletas del efluente, tornillos y tuercas necesarios para los ajustes. Si el acero inoxidable es de fácil disponibilidad, la construcción completa de las cajas de distribución y canaletas del efluente puede ser considerada. La evaluación de costos y aspectos de diseño serán decisivos a este respecto.

Hierro galvanizado: En aplicaciones húmedas se ha encontrado que el medio es agresivo al revestimiento y al “comer” el revestimiento el hierro es corroído rápidamente.

Hierro fundido: Es generalmente aplicado para tuberías, válvulas, pasamuros y caja de bombas en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Acero: Es severamente atacado tanto por el agua residual como por el ambiente alrededor de la planta. En aplicaciones húmedas se ha encontrado que aún las pinturas anticorrosivas aplicadas cuidadosamente no ofrecen suficiente protección. A no ser que en forma especial se utilicen revestimientos epóxicos muy costosos, no se recomienda el uso de acero en aplicaciones húmedas.

Aluminio: Puede ser utilizado en aplicaciones secas tal como se mencionó en el caso del hierro galvanizado. En aplicaciones húmedas, por ejemplo para la construcción de campanas de gas, se encontró muy poco resistente.

PVC: Es muy conveniente para tuberías en y alrededor del reactor, tales como la tubería de entrada y distribución, ya que es liviano, de fácil manejo y resistente. Puede considerarse el empleo de láminas de PVC para las cajas de distribución y los lados de las campanas de gas, aunque por su alto costo puede ser prohibitivo.

Polietileno (PE): la tubería PE puede ser usada para los tubos de entrada, gracias a su flexibilidad es fácil de instalar, debe tenerse especial cuidado en su fijación ya que puede doblarse fácilmente.

Fibra de vidrio: es muy resistente al medio agresivo de un reactor anaeróbico. Puede ser usada para la construcción de las cajas de distribución y canaletas del efluente o como revestimiento de las campanas de gas cuando estas son construidas en un material de baja calidad. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la fibra de vidrio es muy rígida y que debe montarse evitando choques y vibraciones.

Asbesto-cemento: Este material ha probado ser conveniente para la construcción de los lados de las campanas de gases, para las canaletas de efluente y sus baffles. El material es resistente al medio en el reactor, pero es muy rígido y muy poco resistente a los choques. Como es un material económico y de fácil manejo, puede ser considerado para los usos mencionados, aunque en el diseño debe tenerse en cuenta su fácil sustitución.

Madera: La madera, impregnada y recubierta con poliéster, está siendo usada en plantas de tratamiento anaeróbico para uso en separadores GLS, canaletas del efluente y tapas de cajas de inspección. Las experiencias hasta ahora son positivas.

1.7 Aspectos legales

La normativa ambiental colombiana en el Decreto 3930 de 2010, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, establece en su artículo 76 un régimen de transición en el cual se encuentran vigente algunos articulo del Decreto 1594 del 84, entre los cuales se encuentra el artículo 72, en el cual se establecen las siguientes normas de vertimientos:

Artículo 72: Todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos, con las siguientes normas:

Referencia	Usuario Existente	Usuario Nuevo
pH	5 a 9 unidades	5 a 9 unidades
Temperatura	< 40°C	< 40°C
Material flotante	Ausente	Ausente
Grasas y aceites	Remoción > 80% en carga	Remoción > 80% en carga
Sólidos suspendidos, domésticos o industriales	Remoción > 50% en carga	Remoción > 80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno:		
Para desechos domésticos	Remoción > 30% en carga	Remoción > 80% en carga
Para desechos industriales	Remoción > 20% en carga	Remoción > 80% en carga

Toda descarga de aguas residuales domésticas o industriales que se realice previo tratamiento a un cuerpo de agua debe cumplir con estos porcentajes de remoción.

Por otra parte, en el RAS 2000, se incluye como alternativa de tratamiento de aguas residuales la aplicación de reactores UASB, lo cual constituye un soporte jurídico para la utilización de estos sistemas.

2 Metodología para el estudio

2.1 Objeto de investigación

Con este proyecto se pretende establecer un panorama de la utilización de la tecnología anaerobia en la costa norte de Colombia; a su vez, establecer las condiciones de funcionamiento de algunas de las plantas de tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas e industriales.

2.2 Zona de Estudio

Con el fin de establecer el panorama de la utilización de la tecnología anaerobia, se procedió a realizar visitas a las tres (3) ciudades: Barranquilla, Santa Marta y Cartagena, y llevar a cabo un inventario de las plantas de tratamiento anaerobio actualmente existentes y cuáles de estas se encuentran funcionando. Las plantas de tratamiento anaerobio en algunos casos no se encontraban propiamente en las ciudades objeto de estudio, algunas hacen parte de municipios de los departamentos de los cuales son capitales las ciudades antes mencionadas.

Dentro del proyecto se había contemplado la caracterización fisicoquímica del afluente y efluente de seis (6) plantas de tratamiento anaerobio, pero debido a que las empresas visitadas manifestaron su oposición a este propósito, no fue posible tomar muestras ni caracterizarlas. Por esa razón se optó por utilizar la información disponible en las Entidades Ambientales correspondiente a las caracterizaciones presentadas por las empresas y las cuales son realizadas por laboratorios acreditados por el IDEAM.

Solo se permitió el ingreso a las instalaciones para levantar registro fotográfico y observación del sistema, algunas facilitaron información de diseños y otra fue facilitada por las Autoridades Ambientales competentes.

2.3 Recolección de la información

2.3.1 Fuentes primarias

Las fuentes primarias en este proyecto fueron datos obtenidos en visitas de campo realizadas a las empresas e instituciones de las ciudades de Barranquilla, Santa Marta y Cartagena, la información suministrada por parte del sector privado y público y las caracterizaciones realizadas a las aguas residuales por parte de laboratorios acreditados por el IDEAM.

2.3.2 Fuentes secundarias

Las fuentes secundarias de esta investigación tiene diferentes orígenes las cuales contienen temas especializados sobre diseños de reactores anaeróbicos, información suministrada por especialistas en el área de la biotecnología, artículos seleccionados de revistas de ingeniería química, los libros de biotecnología aplicados a la ingeniería, libros de diseño especializados en reactores UASB.

2.4 Procesamiento de la información

En las visitas realizadas a las Corporaciones Autónomas Regionales que se encuentran ubicadas en las ciudades de Santa Marta, Barranquilla y Cartagena, se llevó a cabo una revisión documental de los expedientes que contienen la información relacionada con los sistemas de tratamientos utilizadas por los municipios, empresas entre otras.

De esta revisión documental se seleccionaron las empresas y municipios que realizan el tratamiento de sus aguas residuales con tratamiento anaerobio y específicamente con reactores UASB.

La información obtenida se relacionó en una tabla de acuerdo con las características propias del agua residual a la cual se le está realizando el tratamiento, así: agua residual doméstica, agua residual industrial y las instalaciones construidas para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. La mayoría de las aplicaciones de sistemas anaerobios en la región se centran en este tipo de aguas residuales

La relación contiene principalmente aspectos como: Ubicación de la planta, empresa o municipio, funcionamiento y el tipo de tratamiento.

Los análisis físico-químicos obtenidos de los expedientes y de las empresas están consignados en un cuadro que contiene: puntos de muestreo, resultado de la prueba (expresada en mg/L), porcentajes de remoción (%). Los parámetros de caracterización y control de los sistemas de tratamiento se orientan particularmente a las características que se indican en la Tabla siguiente (Tabla X-XX).

Tabla X-XX. Parámetros de caracterización de aguas residuales.

		Muestra :		Aguas residuales	
Parámetros		Resultados		Porcentajes	
Temperatura		°C		°C	
pH		Unidades		Unidades	
DBO ₅		mg/L		%	
DQO		mg/L		%	
Sólidos suspendidos totales		mg/L		%	

Aceites y grasas	mg/L	mg/L	%
------------------	------	------	---

El parámetro de La DBO se usó para verificar la calidad del agua residual a la entrada y a la salida de las plantas de tratamiento, para determinar la carga orgánica contaminante; La demanda química de oxígeno (DQO) sirve para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte.

3 Información de las plantas

3.1 Relación de Plantas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales en la Costa Norte Colombiana (Santa Marta; Barranquilla y Cartagena).

En la Zona Caribe no existen muchas plantas de tratamiento de aguas residuales. La mayoría de los municipios cuentan con lagunas de estabilización y los sistemas anaerobios son realmente pocos; los más importantes se concentran especialmente en sectores de la industria de refrescos y cervecerías. La tecnología predominante es el UASB. A continuación se relacionan las instalaciones que han sido identificadas en el área de estudio.

3.1.1 Aguas Residuales Domésticas

Tabla 3-1: Relación de Plantas de tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas o municipales en la Costa Norte Colombiana (Santa Marta; Barranquilla y Cartagena).

Ubicación de la planta	Empresa o municipio	Tipo de agua residual	Funcionamiento	Tipo de tratamiento
Fundación – Magdalena	Corregimiento Santa rosa de Lima	Domestica	Actualmente se encuentra en operación	UASB
Soledad – Atlántico	Gran central de Abastos Granabastos	Doméstica	Actualmente se encuentra en operación	UASB

3.1.2 Aguas Residuales Industriales

Tabla 3-2: Relación de Plantas de tratamiento anaerobio de aguas residuales industriales en la Costa Norte Colombiana (Santa Marta; Barranquilla y Cartagena).

Ubicación de la planta	Empresa o municipio	Tipo de agua residual	Funcionamiento	Tipo de tratamiento
Cartagena	Maltería	Industrial	Actualmente se encuentra en operación	UASB

Barranquilla	Bavaria	Industrial	Actualmente se encuentra en operación	UASB
Malambo	Postobon	Industrial	Actualmente se encuentra en operación	UASB

3.1.3 Lixiviados

Tabla 3-3 Relación de Plantas de tratamiento de lixiviados en la Costa Norte Colombiana (Santa Marta; Barranquilla y Cartagena).

Ubicación de la planta	Empresa o municipio	Tipo de agua residual	Funcionamiento	Tipo de tratamiento
Santa Marta	Relleno Palangana	Lixiviado	Actualmente se encuentra en operación	UASB

3.2 Descripción y principales características de las plantas

3.2.1 PTAR POSTOBÓN (Malambo)

La compañía Gaseosas Posada Tobón S.A., está localizada en el km 5 del casco urbano de Malambo, vía Oriental diagonal al Parque Industrial de Malambo.

La ubicación georeferenciada de la planta de Postobón Malambo es:

Latitud: 10°49'55.63" Norte, Longitud: 74°46'26.66"

Las características que generan el vertimiento en Postobón Malambo al ser una planta dedicada a la elaboración de bebidas no alcohólicas (gaseosas aguas de mesas, refresco de fruta), son las aguas residuales provenientes de las descargas industriales azucaradas y alcalinas y del proceso de potabilización de aguas.

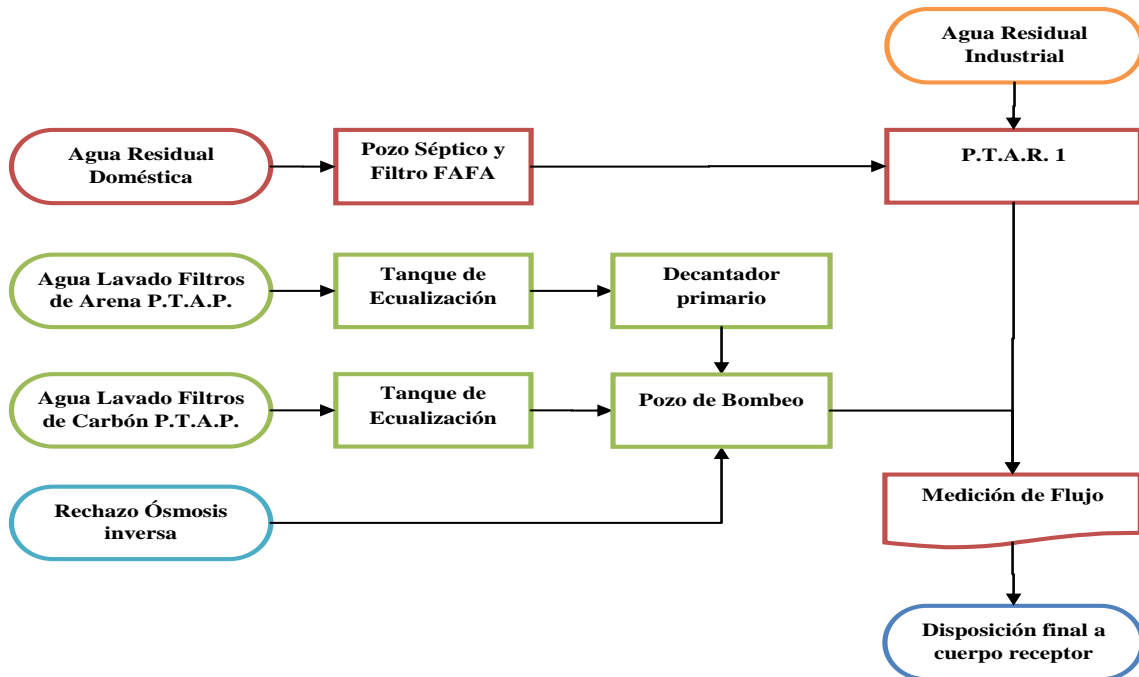
Las aguas residuales azucaradas son generadas principalmente por las pérdidas de producto inherentes al proceso en las líneas de envasado y en las salas de preparación de jarabes (simple y terminado), así como en el enjuague inicial en las lavadoras de envase retornable (producto remanente en las botellas que vienen del mercado). Estas también son generadas como consecuencia del enjuague con agua tratada de los equipos de producción antes de iniciar la preparación y el llenado de un nuevo sabor, como también del descarte de producto terminado no conforme. Estas aguas se caracterizan por tener una alta carga orgánica, como consecuencia del contenido de azúcar, y un bajo pH y caudal. Por lo regular representan entre el 20 y el 30% del total de las aguas residuales generadas en la planta.

Las aguas alcalinas provienen del lavado de los envases retornables, cajas y pisos de la zona de producción, en los procesos de limpieza e higienización de los equipos involucrados en el tratamiento de aguas, preparación y envasado de producto. Sus principales características son alta alcalinidad, debido principalmente a la utilización de soda, alto pH y caudal.

El proyecto de la PTAR utiliza un sistema BIOLÓGICO conformado por un proceso ANAEROBIO seguido por un proceso AEROBIO con aireación extendida como pulimento.

En el proceso anaerobio se emplea un Reactor de tecnología UASB-PPS/CF – flujo ascendente de manto o colchón de lodos que posee un separador trifásico de placas paralelas y de un perfil hidráulico interno de flujo cruzado (patente de BIOTECS).

Figura 3-1: Diagrama Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales POSTOBON S.A.



Fuente: Postobon, Malambo

Biodigestión Anaerobia en dos Fases

El proceso de biodigestión anaerobia para la generación de gas metano es aquel proceso microbiológico en que el sustrato, compuesto de materias orgánicas complejas solubles e insolubles se convierten en gas metano y dióxido de carbono. Está formado por dos fases, que son realizadas en tanques separados debido a las distintas características de los microorganismos que actúan en cada una de ellas.

Primera fase: Hidrólisis Acidificación

La primera fase del proceso anaerobio se realiza en un tanque, que tiene diferentes nombres: reactor de acondicionamiento y control biológico, "Búfer tank", o ecualización/hidrólisis/acidificación:

Este tanque posee una agitación hidráulica, en donde se desarrollan espontáneamente microorganismos que participan en esta fase del proceso.

En ésta unidad la materia orgánica, conformada por compuestos poliméricos solubles e insolubles de alto peso molecular, se fracciona en compuestos de menor tamaño denominados polímeros y monómeros (azúcares, aminoácidos y péptidos), el proceso es realizado por bacterias fermentativas a través de exo-enzimas que permiten que estos compuestos sean asimilados por la célula. Posteriormente los compuestos generados en esta primera etapa, son transformados por las mismas bacterias fermentativas a ácidos orgánicos saturados (propiónico, butírico, y acético) al mismo tiempo que se produce hidrógeno.

La agitación interna del tanque es realizada a través de una bomba hidráulica, que recircula el efluente desde la salida hacia la entrada del tanque. Además de llevarse a cabo las reacciones químicas, este tanque permite la homogenización y ecualización de los vertimientos. Del tanque de ecualización/hidrólisis/acidificación, el efluente acidificado es bombeado hacia el reactor anaerobio.

Debido a las reacciones de hidrólisis y acidificación, el pH en el interior del tanque normalmente se encuentra por debajo de 6.0 unidades, valor que se debe ajustar o neutralizar a un valor levemente superior a 7 antes de ingresar al reactor anaerobio, en donde se lleva a cabo la segunda fase de la biodigestión anaerobia. Esta adecuación de pH se realiza mediante la inyección de soda cáustica y es controlada mediante un equipo de medición de pH.

Normalmente las aguas deben ingresar a la unidad de ecualización/hidrólisis/acidificación con un valor de pH inferior a 10.3, de lo contrario los procesos de hidrólisis y acidificación se pueden ver seriamente afectados, por esta razón, en la unidad de pretratamiento se tiene un sistema de neutralización con CO_2 .

Para permitir un perfecto crecimiento de los microorganismos útiles al proceso, y atender lo más rápido posible la eficiencia esperada por el proyecto, si es necesario se dosificarán en el tanque de ecualización/hidrólisis/acidificación, pequeñas cantidades de nutrientes (nitrógeno y fósforo), principalmente durante el periodo de puesta en marcha. Esto en la práctica se realiza mediante inyecciones de urea para el suministro de nitrógeno y ácido fosfórico para el suministro del fósforo.

Segunda Fase: Producción de Biogás o biodigestión.

Del tanque de ecualización/hidrólisis/acidificación, las aguas son enviadas por medio de una bomba hacia el reactor anaerobio UASB-PPS/CF, formado por un tanque semi-cerrado con un separador trifásico instalado en la parte superior.

Dentro del digestor anaerobio, también llamado reactor de metanización, se desarrollan dos procesos principales: acetogénesis y metanogénesis.

En la práctica existen dos precursores del metano que son el ácido acético y el hidrógeno, por lo tanto los demás productos generados en la primera fase (propiónico, butírico) deben ser transformados a estos dos para hacer posible la generación del metano. Esta transformación es realizada por un grupo de bacterias llamadas acetogénicas que son productoras de hidrógeno y bacterias metanogénicas que son consumidoras de hidrógeno.

Al mismo tiempo, dentro del reactor, se lleva a cabo el proceso más importante que es la remoción de la materia orgánica disuelta en el agua y la recuperación de energía en forma de metano; esta fase involucra dos grupos de bacterias metanogénicas acetoclásticas e hidrogenoclasticas.

En términos prácticos el reactor UASB está formado por un tanque semi - cerrado, con un distribuidor del efluente instalado en el fondo y un separador de sólidos y cámara de almacenamiento de biogás en la tapa.

El efluente ingresa al tanque por la parte inferior, luego pasa por un lecho de lodo metanogénico activo, que se expande, permitiendo y facilitando el contacto entre la materia orgánica presente en el efluente y los microorganismos. En ésta zona la materia orgánica en forma de hidrógeno y ácidos grasos se transforma en primer lugar a ácido acético y posteriormente a metano por un grupo específico de microorganismos.

El efluente, los microorganismos, los sólidos y el biogás siguen su camino ascendente hasta llegar a un separador de tres fases, conformado por deflectores y colmenas con varias placas paralelas, que son diseñadas para obtener una máxima eficiencia en la separación, inicialmente, el biogás de los sólidos y la separación posterior de los sólidos del agua.

El perfil hidráulico operacional del digestor y el separador trifásico, definen claramente las zonas de separación del biogás, los sólidos y el efluente tratado.

Antes de alcanzar la zona superior del tanque y el separador trifásico, el efluente (cargado de sólidos y microorganismos en fase de desgasificación), cambian su dirección (de vertical a horizontal), facilitando el desprendimiento del biogás del medio líquido (desgasificación o separación del microorganismo del biogás). A continuación, dentro del separador trifásico, atravesando los deflectores laterales el vertimiento ingresa a la colmena compuesta por tejas paralelas inclinadas, en donde por acción de la gravedad los sólidos y los microorganismos desgasificados se decantan hacia el fondo del separador, para luego ingresar de nuevo al manto de lodos. Después de atravesar la zona de decantación, el vertimiento tratado es recolectado por unos canales centrales que la conducen a la caja de salida del agua tratada.

Este camino interno del efluente, sólidos y biogás en el interior del digestor y el separador trifásico, le confiere el nombre de flujo cruzado que es el responsable directo de las altas eficiencias del separador para garantizar la permanencia de los microorganismos en el interior del digestor. Este efecto combinado con las demás características de los equipos y el proceso, resultan en una mayor eficiencia de remoción, estabilidad, y flexibilidad operacional.

Este decantador de “doble efecto”, patentado internacionalmente, probó ser muy eficiente en la práctica y capaz de permitir el aumento de las cargas orgánicas aplicadas en los procesos de digestión y disminuir el tiempo de arranque biológico aunque fuera en aplicaciones menos tradicionales del UASB y, además, permitir arrancar sistemas con un lodo de menor calidad como es el caso de lodos provenientes de lagunas en lugar de lodo granular de otra instalación operando con digestores anaerobios.

La ausencia de sistemas de agitación permite una selección natural de los flóculos de lodo activo metanogénico.

En el reactor anaerobio se instala una bomba centrífuga de recirculación de efluente tratado hacia la línea de alimentación. Esta recirculación mejora la velocidad ascendente dentro del reactor mejorando con eso la calidad del lodo y su comportamiento, es normalmente utilizado durante la puesta en marcha cuando el caudal de alimentación del reactor es menor que el de diseño y cuando la capacidad de la fábrica está reducida provocando una disminución significativa del caudal de alimentación del reactor anaerobio.

- Composición del efluente crudo industrial y características del efluente tratado

Este proyecto fue desarrollado con base en datos suministrados por Postobón Malambo y de acuerdo con la tecnología de BIOTECS, especialmente aplicada en efluentes de industrias procesadoras de refrescos, con más de 80 procesos similares al instalado en esta planta.

Las principales características del residuo son:

Tabla 3-4: Composición de las aguas residuales industriales

1. COMPOSICION DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES				
ITEM	PARÁMETRO	UNID	EFL. BRUTO	EFL. TRAT.
1	Caudal medio	m ³ /d	2500	2500
2	Caudal medio	m ³ /h	156.25	156.25

3	Caudal pico	m ³ /h	230	156.25
4	Horas de Trabajo	H/d	16,0	16,0
5	DQO _T	mg/l	6.000	200
6	DBO ₅	mg/l	3.000	50
7	Sólidos Suspendidos T. SST	mg/l	250	50
8	Sólidos Sedimentables – SS	ml/l	5	1
9	N _T - NTK	mg/l	2	20
10	P _T	mg/l	2	5
11	Aceites y grasas	mg/l	20	20
12	pH	u	3 a 12	6 a 8
13	Temperatura	°C	30	<40 °C

Cantidades de insumos a ser utilizados

Consumo de nutrientes

En la fase inicial de crecimiento y aclimatación, las bacterias en el reactor pueden requerir una adición de nutrientes.

Los nutrientes a adicionar son nitrógeno y fósforo, en soluciones químicas como la urea y el ácido fosfórico. La urea posee una concentración de nitrógeno del 46%, mientras el ácido fosfórico se encuentra en un 82% de concentración y de éste el 32% es fósforo.

Tabla 3-5. Consumo de nutrientes

Producto	Unidad	Consumo
. Nitrógeno	kg/día	220
. Urea al 46 %.	kg/día	478
. Fósforo.	kg/día	40
. Ácido fosfórico	kg/día	120

*Estos datos son proyecciones suministradas por la empresa que llevo a cabo el diseño del sistema de tratamiento.

Consumo de Soda cáustica

La soda cáustica se emplea para la corrección de pH del agua a la entrada del reactor. La concentración comercial de la soda es al 50%.

En la práctica se estima que el consumo en el inicio del arranque, cuando la alcalinidad está en su valor mínimo dentro del reactor, es de 0.6 kg de NaOH al 50% por m³ de agua a tratar.

De acuerdo con lo anterior el consumo de soda es:

Tabla 3-6. Consumo de Soda

Producto	Unidad	Consumo
Soda cáustica al 50%	kg/día	1500

Cantidad de lodo inoculado

El lodo a inocular en el reactor anaerobio es del tipo granular de otra instalación de tratamiento similar en un volumen entre 250 a 300 m³ con una concentración del 4 al 5% en sólidos y una actividad metanogénica entre 0.4 y 1 kg DQO –CH₄/kg SSV.

- **Descripción Técnica de equipos y servicios**
- **Estación de bombeo de agua residual cruda**

Cantidad	01
Características Técnicas:	
Función	Recibir las aguas residuales y bombearlas para el tratamiento
Perfil	Rectangular
Tipo de construcción integral	Concreto armado, con impermeabilización
Dimensiones básicas	
-Longitud (m)	2.50
-Ancho (m)	3.00
-Altura total (m)	2.00
Accesorios	Conexiones de entrada y salida
Impermeabilización y protección int. general	Sikaguard 63-N o similar
Suministrador	Obra Civil

Foto 3-1: Estación de Bombeo de aguas residuales crudas



Fuente: Postobón, Malambo

▪ **Sistema de neutralización**

Se compone de un sistema de neutralización con CO₂ inyectado directamente sobre la tubería de recirculación de agua residual.

Se tiene una bomba sumergible para recirculación del efluente, su descarga llega al sistema de inyección de CO₂ que es comandado por el sensor de pH ubicado cerca de la salida del efluente del tanque. Luego el efluente pasa al serpentín de recirculación, que actúa como un reactor tubular permitiendo una completa neutralización y finalmente esta corriente retorna al tanque de neutralización.

El sistema de inyección está conformado por un inyector tipo venturi en acero inoxidable de diámetro 6", el cual está ubicado en la tubería de descarga de la bomba de recirculación.

El gas se controla de manera automática, reaccionando de acuerdo con los valores de pH del efluente, y para esto cuenta con dos válvulas solenoides que serán accionadas por una señal del pH metro, ubicado sobre el tanque que se encuentre funcionando. El suministro de CO₂ se realizaría desde un tanque horizontal para almacenamiento de gas (fuera del suministro), destinado exclusivamente para este sistema.

Los equipos y componentes son los siguientes:

Inyector de CO₂ en acero inoxidable d= 6", tipo venturi, con cuerpo poroso en PVC de 1/16" de orificio. Este inyector irá en la línea de recirculación de la bomba.

Reactor tubular en PVC d= 6" bridado, de longitud 36 m.

Tubería PVC bridada d= 6" a partir de la descarga de la bomba (adicional) más accesorios para manejo hidráulico, más válvulas, manómetro, soportería.

Panel de regulación de gas en acero inoxidable d= 1", regulador, válvulas solenoides, rotámetro, válvulas de paso, válvulas de seguridad a 60 psig.

Controlador de pH Endres + Hauser para aguas agresivas y alcalinas.
Eyector en acero inoxidable 4" – 6"

Bomba de recirculación con capacidad de 230 m³/h

- **Tamiz estático**

Cantidad	1
Características técnicas	
Función	Eliminar sólidos superiores a 0.5 mm.
Caudal de diseño (m ³ /h)	230
Tipo y ubicación	Estático, sobre tanque de contingencia
Forma	Caja rectangular en acero carbono, con malla en Inóx.
Accesorios complementarios	Conexiones de entrada y salida, tolva de recolección de sólidos
Suministrador	Biotecs

Foto 3-2: Tamiz Estático



Fuente: Postobón, Malambo

▪ **Tanque de contingencia -“calamity tank”**

Cantidad	01
Características técnicas	
Función	Almacenar baches de aguas con altos niveles de toxicidad y carga orgánica para proteger los procesos biológicos.
Volumen útil (m ³)	155.8
Volumen total (m ³)	168.8
Forma	Circular cerrado
Tipo de construcción	
Protección	Fondo y cuerpo metálico soldado en Acero carbón A-283 °C y/o A-36. Interna: Limpieza con sand blasting con chorro de arena grado metal casi blanco PSC SP-10 y grado SP6, posteriormente aplicar un recubrimiento del tipo imprimante epòxico de SIKA ref. 137008 con un espesor de 3 a 4 mils, y un recubrimiento de acabado del tipo Coaltar epòxico de SIKA ref. 786502 a un espesor de 6 a 7 mm Externa: después de la limpieza con chorro, aplicar un recubrimiento base del tipo imprimante epòxico de SIKA re 137008 a un espesor de 3 a 4 mm, y posteriormente un recubrimiento de barrera del tipo epòxico de SIKA ref. 233710 a un espesor de 2 a 3 mm y un recubrimiento de acabado en esmalte uretano serie 36 de SIKA ref: Azul RAL 5017 a un espesor de 1.5 a 2 mm.
Dimensiones básicas:	
-Diámetro (m)	5.75
-Altura útil (m)	6.00
-Altura total (m)	6.50
Accesorios Complementarios	Conexiones de entrada y salida

Suministrador	Biotecs
▪ Tanque de ecualización - desmontable	
Cantidad	01
Características técnicas	
Función	Da inicio 1ª. Etapa proceso biológico anaerobio.
Volumen útil (m ³)	1764
Volumen total (m ³)	1893
Forma	Circular cerrado con cuerpo y fondo metálico
Tipo de construcción	Tanque metálico en Acero al carbón, desmontable con protección interna y externa. Diseñado con especificaciones CCT, zona sísmica 3 por AWWA, 90 MPH carga de viento por ASCE 7-98,20 PFS (98 kg/cm ²) carga viva en cubierta. <i>Interior:</i> dos capas de epoxy resistente a la corrosión Trico Bond thermoset (5 mils media, DFT).
Protección	<i>Exterior:</i> primmer epoxy con pintura final de acabado uretano (5 mm media, DFT). Las capas son aplicadas electrostáticamente previa una limpieza SSPC-SP 10 y curado térmico. Las capas de CTT se aplican dentro de un ambiente controlado y se alcanza la limpieza usando arena y viruta de acero.
Dimensiones básicas:	
-Diámetro (m)	18.11
-Altura útil (m)	6.85
-Altura total (m)	7.35
	Conexiones de entrada y salida, plataforma. y

	separador trifásico.
Tipo de construcción	Fondo y tapa en Acero carbón A-283 °C y/o A-36 soldado, cuerpo metálico desmontable con protección interna y externa. Diseñado con especificaciones CCT, zona sísmica 3 por AWWA, 90 MPH carga de viento por ASCE 7-98,20 PFS (98 kg/cm ²) carga viva en cubierta.
Protección	<p><i>Interior:</i> dos capas de epoxy resistente a la corrosión Trico Bond thermoset (5 mm media, DFT).</p> <p><i>Exterior:</i> primmer epoxy con pintura final de acabado uretano (5 mm media, DFT).</p> <p>Las capas son aplicadas electrostáticamente previa una limpieza SSPC-SP 10 y curado térmico. Las capas de CTT se aplican dentro de un ambiente controlado y se alcanza la limpieza usando arena y viruta de acero.</p>
Dimensiones básicas:	
Diámetro (m)	19.92
Altura útil (m)	6.85
Altura total (m)	7.35
Accesorios complementarios	Sistema recolección de gas, manhole, conexiones de entrada y salida, escalera, plataforma, barandas, tomadores de muestra y columna de salida en acero soldada.
Proveedor	Biotecs

Foto 3-4:Reactor metanización



Fuente: Postobon Malambo

▪ **DECANTADOR TRIFÁSICO E INTERNOS REACTOR DE METANIZACIÓN**

Cantidad	01 módulo
Características Técnicas:	
Función	Separación: efluente, lodo y biogás
Tipo de construcción	Cuerpo, estructura de soporte de las placas paralelas, colectores de gas en Acero al carbón ASTM 283 ° C., placas paralelas.
Protección	Limpieza con sand blasting con chorro de arena grado metal casi blanco PSC SP-10 y grado SP6, posteriormente aplicar un recubrimiento del tipo imprimante epòxico de SIKA ref. 137008 con un espesor de 3 a 4 mm, y un recubrimiento de acabado del tipo Coaltar epòxico de SIKA ref. 786502 a un espesor de 6 a 7 mm
Placas paralelas	En material plástico
Accesorios complementarios	Tubería de alimentación al reactor en PVC, tomadores de muestra y drenaje.
Proveedor	Biotecs

TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LODOS ANAEROBIOS

Cantidad	01
Características técnicas	
Función	Almacenar exceso de lodos anaerobios, provenientes de las purgas del reactor
Volumen útil (m ³)	
Volumen total (m ³)	100
Forma	110
Tipo de construcción	Circular cerrado
Protección	Fondo y cuerpo metálico soldado en Acero carbón A-283 °C y/o A-36. Interna: Limpieza con sand blasting con chorro de arena grado metal casi blanco PSC SP-10 y grado SP6, posteriormente aplicar un recubrimiento del tipo imprimante epóxico de SIKA ref. 137008 con un espesor de 3 a 4 mm, y un recubrimiento de acabado del tipo Coaltar epóxico de SIKA ref. 786502 a un espesor de 6 a 7 mm. Externa: después de la limpieza con chorro, aplicar un recubrimiento base del tipo imprimante epóxico de SIKA re 137008 a un espesor de 3 a 4 mm, y posteriormente un recubrimiento de barrera del tipo epóxico de SIKA ref. 233710 a un espesor de 2 a 3 mm y un recubrimiento de acabado en esmalte uretano serie 36 de SIKA ref: Azul RAL 5017 a un espesor de 1.5 a 2 mm.
Dimensiones básicas:	
-Diámetro (m)	5.60
-Altura útil (m)	4.00
-Altura total (m)	4.50
Accesorios Complementarios	Conexiones de entrada y salida, Sello hidráulico

Proveedor

Biotecs

Foto 3-5: Tanque secundario



Fuente: Postobón Malambo

▪ **Quemador de biogás (antorcha)**

Cantidad	01
Características Técnicas:	
Función	Quemar el biogás producido por el proceso biológico
Tipo de construcción	Base, cuerpo y cámara de combustión en Acero al carbón ASTM 283 ° C.
Capacidad máx. (Nm ³ /h)	250
Presión nominal de trabajo (mbar)	10-20
Accesorios complementarios	Válvula cortallama, regulador hidráulico de presión, electrodo de ignición.
Proveedor	Biotecs

▪ **“DRIP TRAP”**

Cantidad	01
Características Técnicas:	
Función	Separar humedad del biogás
Tipo de construcción	Base, cuerpo y cámaras en acero carbono
Capacidad (Nm ³ /h)	250
Presión normal de trabajo (mbar)	10-20
Accesorios	Conexiones de entrada y salida, drenaje con válvula.

Proveedor

Biotecs

3.2.2 PTAR SANTA ROSA DE LIMA

El Corregimiento de Santa Rosa de Lima, ubicado en el municipio de Fundación, se encuentra en la Región Caribe de Colombia, en la subregión Norte del departamento del Magdalena, está a los 10° 24'10.4" de latitud, al Norte de la línea ecuatorial y a los 74°06'38.03" de longitud, al Oeste del Meridiano de Greenwich y su distancia al municipio de Fundación es de 13 km aproximadamente. Los límites son: al norte con el Municipio de Aracataca, al occidente con el Municipio de Pivijay, al oriente con el departamento del Cesar y al sur con el Nuevo Municipio de Algarrobo.

Para el transporte de las ARD y su posterior tratamiento, dadas las condiciones topográficas, y de asentamiento del centro poblado, se hace necesaria la proyección de redes de alcantarillado para la cobertura de un 83% del área del corregimiento, en la cual está asentada el 95,03% de la población, el resto del área que equivale al 17% del centro poblado, corresponde a zonas de difícil recolección las cuales no es posible incorporarlas al alcantarillado proyectado por gravedad.

De las 283 viviendas existentes en el corregimiento (Censo SANEAR S.A. año 2010), solo 14 viviendas se encuentran en el 17% del área urbana que no se puede conectar por gravedad hacia el alcantarillado, de acuerdo con la densidad poblacional encontrada en el corregimiento (4,34 hab/viv) se tiene:

4,34 hab/viv x 14 viv = 61 habitantes que no serán conectados al alcantarillado por gravedad y deberán conectarse a STII.

De acuerdo al censo poblacional se tiene 1.228 habitantes en todo el centro poblado, por lo que el porcentaje de habitantes sin cobertura en alcantarillado convencional sería:

$$\frac{61 \text{ hab}}{1.228 \text{ hab}} \times 100 = 4,97\% \text{ de la población sin alcantarillado por gravedad}$$

Tabla 3-7. Indicadores actuales y proyectados de los servicios de acueducto y alcantarillado del corregimiento SANTA ROSA DE LIMA

DESCRIPCIÓN DEL INDICADOR (NOMBRE Y UNIDAD)	AÑO BASE		AÑOS PROYECTADOS				
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1 Población total en el centro poblado (hab)	1.258	1.273	1.288	1.303	1.319	1.335	1.715
2 Cobertura del Acueducto (%)	0	100	100	100	100	100	100
3 Dotación Bruta (L/hab-día)	0,0	133,3	133,3	133,3	133,3	133,3	133,3
4 Dotación Neta (L/hab-día)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
5 Porcentaje de pérdidas (%)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
6 Factor de Consumo Máximo Diario (K1)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
7 Factor de Consumo Máximo Horario (K2)	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01
8 Cobertura de Micromedición (%)	0	100	100	100	100	100	100
9 Continuidad (horas)	0	24	24	24	24	24	24
10 Calidad del servicio (IRCA)	N.A.	Apta	Apta	Apta	Apta	Apta	Apta
11 Cobertura de Alcantarillado (%) ²	0	95,03	95,03	95,03	95,03	95,03	95,03

² Con los sistemas de alcantarillado convencional y STII se proporcionará un 100% de la cobertura para el saneamiento del centro poblado. El 95,03% del centro poblado será atendido con un sistema de alcantarillado convencional constituido por 6.741m de tubería en Ø6" y 108 cámaras de inspección, para el 4,97% restante de la población (14 Viviendas existentes), se incorporará un sistema no convencional, donde cada vivienda existente tendrá un Sistema de Tratamiento Integrado Independiente –STII- con campo de adsorción para un total de 14 STII.

Tabla 3-8 Caudal de aguas residuales del corregimiento de SANTA ROSA DE LIMA.

AÑO	POBLACIÓN TOTAL (hab)	COBERTURA ALDO (%) ³	POBLACIÓN ATENDIDA (hab)	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/hab-día)	CAUDAL AGUA RESIDUAL (L/s)
2011	1.258	0,00	0	100	1,11
2012	1.273	95,03	1.209	100	1,12
2013	1.288	95,03	1.224	100	1,13
2014	1.303	95,03	1.239	100	1,15
2015	1.319	95,03	1.254	100	1,16
2016	1.335	95,03	1.269	100	1,17
2017	1.351	95,03	1.284	100	1,19
2018	1.367	95,03	1.299	100	1,20
2019	1.384	95,03	1.315	100	1,22
2020	1.400	95,03	1.331	100	1,23
2021	1.417	95,03	1.347	100	1,25
2022	1.434	95,03	1.363	100	1,26
2023	1.451	95,03	1.379	100	1,28
2024	1.469	95,03	1.396	100	1,29
2025	1.486	95,03	1.412	100	1,31
2026	1.504	95,03	1.429	100	1,32
2027	1.522	95,03	1.446	100	1,34
2028	1.540	95,03	1.464	100	1,36
2029	1.559	95,03	1.481	100	1,37

³ Cobertura del centro poblado con los sistemas de alcantarillado convencional, el sistema cubrirá el 83% del área total que constituye el centro poblado y cuya topografía permite el transporte de las aguas por gravedad.

2030	1.578	95,03	1.499	100	1,39
2031	1.597	95,03	1.517	100	1,40
2032	1.616	95,03	1.535	100	1,42
2033	1.635	95,03	1.554	100	1,44
2034	1.655	95,03	1.572	100	1,46
2035	1.675	95,03	1.591	100	1,47
2036	1.695	95,03	1.610	100	1,49
2037	1.715	95,03	1.630	100	1,51

Como debe preverse la recolección de las aguas residuales del centro poblado de Santa Rosa de Lima, además de su manejo y tratamiento, se proyectó un sistema de alcantarillado convencional constituido por un colector y redes secundarias, de tal manera que por gravedad las aguas residuales lleguen al sitio, que por su topografía y facilidad de acceso se determinó escoger para realizar el pre-tratamiento de las AR, conducir las a una Estación de Bombeo - EBAR y finalmente ser dirigidas al sistema de tratamiento al que serán sometidas en la PTAR proyectada.

Diseño de los Sistemas de Tratamiento Integrados Independientes (STII)

El sistema de tratamiento de agua residual consta de un tanque séptico y un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA). A este sistema llegan las aguas residuales procedentes de la vivienda, luego de ser tratadas descargarán sus aguas al campo de absorción.

Cada sistema de tratamiento está provisto de cuatro cámaras conectadas entre sí mediante tubería en PVC-S de Ø 4", para volúmenes pequeños a medianos, que sirvan hasta 30 personas, de acuerdo a lo recomendado en el RAS 2000 numeral E.3.4.3.4.

En la primera cámara los materiales sólidos más pesados (materia fecal, sobras de alimentos y otros), van al fondo por sedimentación y los más livianos (aceites, grasas, natas, etc.) permanecen en la superficie del agua por flotación (trampa de grasas).

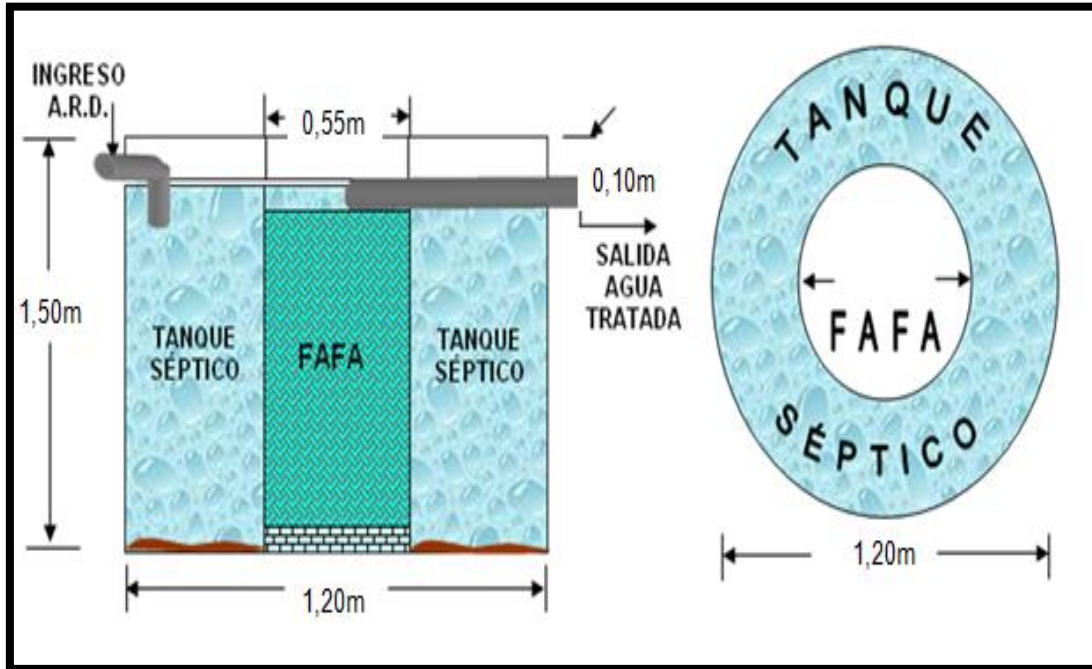
En la segunda y tercera cámara continúa el proceso de separación de los sólidos que no fueron retenidos en las cámaras anteriores y por último en la cuarta cámara, las aguas pasan a un filtro anaerobio de flujo ascendente conocido como FAFA. El medio empleado como sustrato para las bacterias en el filtro anaerobio, está elaborado en material plástico, que permite la adherencia de una película biológica que efectuará la biodegradación de la

materia orgánica para obtener eficiencias de remoción del 80% en DBO_5 , es en este lugar se da por terminado el tratamiento de las aguas.

El efluente tratado se conduce a un campo de absorción, provisto de una capa de material filtrante para facilitar el paso del agua tratada al terreno.

A continuación se muestra el perfil del sistema con sus respectivos compartimentos.

Figura. 3-2. Corte transversal del tanque séptico – FAFA



Fuente: Plan de saneamiento y manejo de vertimientos - PSMV del corregimiento Santa Rosa de Lima

Componentes del sistema de pre-tratamiento de las AR

El análisis realizado en las fases de diagnóstico y anteproyecto, permite concluir que el sistema más adecuado para el tratamiento de la A.R.U. es un reactor UASB en el Centro Poblado del corregimiento de Santa Rosa de Lima, de esta manera se puede garantizar el tratamiento del caudal de aguas residuales generadas hasta el horizonte del proyecto, pero que para tal fin se requiere un buen diseño que garantice una buena eficiencia en el proceso de tratamiento. A continuación se describirán las características de los componentes del sistema de pre-tratamiento.

Reja de Cribado

El pre-tratamiento estará ubicado en la cámara C35 la cual es de $\varnothing 1,20m$ a la entrada del corregimiento a 250m de distancia del centro poblado hacia la troncal de oriente en predios de las coordenadas Este 996.170,24 Norte 1'642.443,72 sobre una cota 108,73

m.s.n.m; al interior del pre-tratamiento se instalará una reja metálica inclinada a 45° de longitud 0,45m y ancho 0,50m con 8 barras cuadradas de 1" de ancho y 3/16" de espesor. La reja tiene como fin retener basuras y materiales gruesos y adicionalmente contará con una bandeja de escurrimiento para el material atrapado en la reja de 0,50m x 0,30m x 0,20m para depositar en la bandeja el material acumulado en la reja cuando se realice mantenimiento manual y así evitar la colmatación y la obstrucción (Ver figura 3-3).

Se proyectó un sistema de cribado de limpieza manual, y un ángulo de 45° con la horizontal. En primera instancia se asume las dimensiones y espaciamento de las barras.

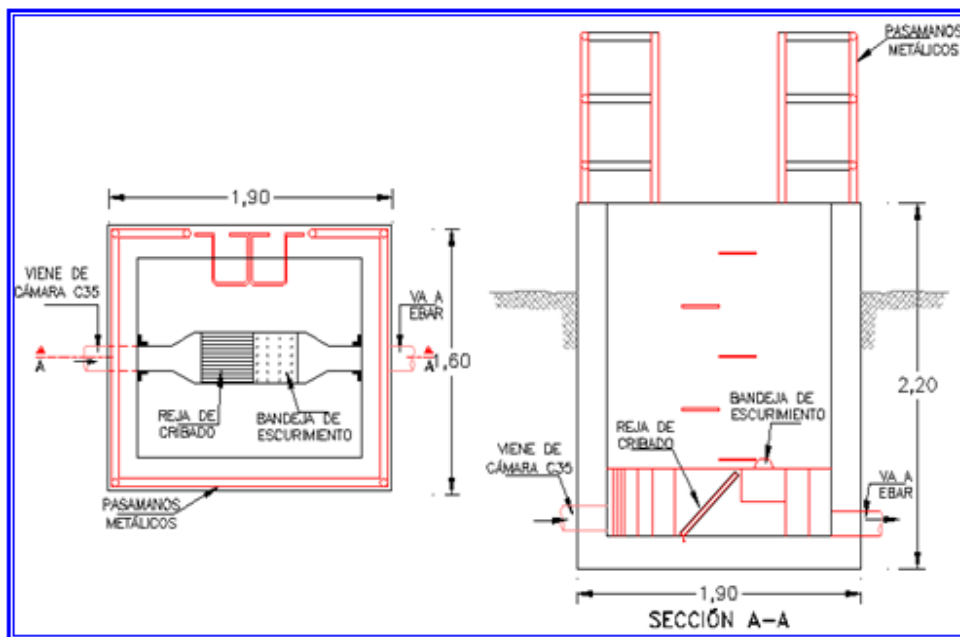
Espesor de las platinas: 4,76mm

Ancho: 25,4 mm

Espaciamiento de las barras: 20mm (Rango: 15 - 20 mm; según RAS 2000 E.4.4.2.3)

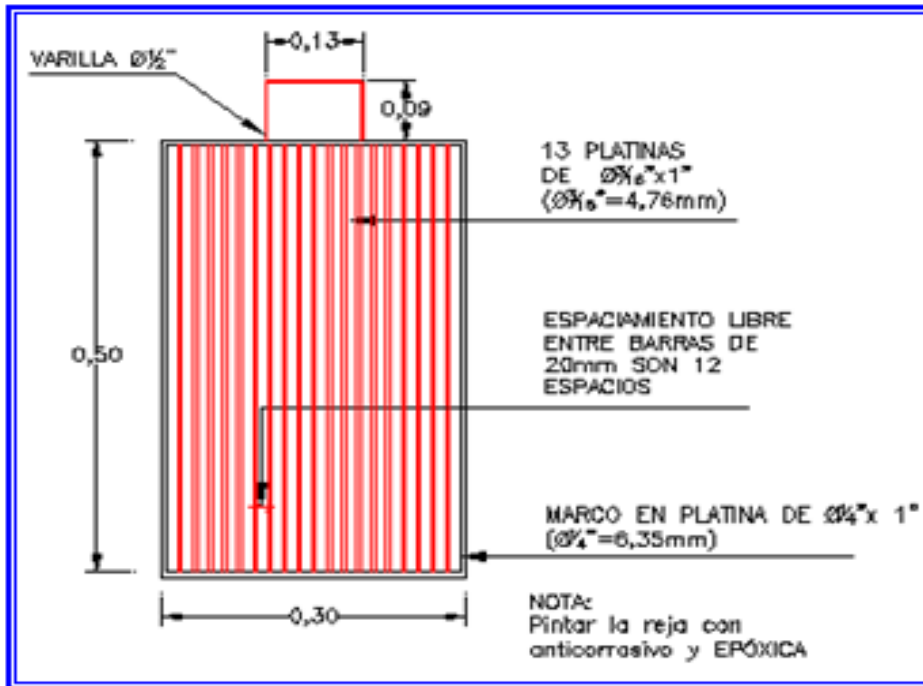
El material atrapado en la bandeja de escurrimiento se mezclará con cal y se dispondrá en el lecho de secado, de donde se extraerá cuando éste se llene y se llevará hasta el relleno sanitario o sitio de disposición de residuos sólidos autorizado (Ver figura 3-3).

Figura. 3-3 Pre- tratamiento proyectado – Vista en Planta y Perfil



Fuente: PSMV del corregimiento Santa Rosa de Lima

Figura. 3-4 Sistema de Cribado



Fuente: PSMV del corregimiento Santa Rosa de Lima

Sistema de Tratamiento de las aguas residuales

Se diseñó una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el mismo lote donde se proyectó el pretratamiento y el pozo de succión; siendo este el sitio más bajo del corregimiento lo que ofrecía una zona de descarga del agua tratada al caño que pasa aledaño al sitio.

El sistema de tratamiento está compuesto por dos reactores UASB en fibra de vidrio de 5,00m de alto x 3,85m de diámetro cada uno con capacidad para tratar en condiciones normales 3,02 L/s el cual esta estará dividido en las siguientes zonas: (Ver Fig 3.5)

La zona de entrada es un canal rectangular en fibra de vidrio que distribuye las ARU hacia dos múltiples en tubería de PVC $\frac{3}{4}$ " las cuales están perforadas en el fondo del reactor, para distribuir uniformemente el flujo ascendente.

Las ARD tratadas son recolectadas en la parte superior del sistema por una canaleta perimetral en fibra de vidrio que conducen las aguas tratadas hacia los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA).

Zona de lodos: Para evacuar los lodos digeridos, se tiene en el fondo de la estructura una tubería recolectora en PVC $\frac{6}{8}$ ", para conducir los lodos hacia los lechos de secado.

Para controlar los olores generados durante la depuración de las aguas residuales, se instala una tubería en PVC Ø1" para extracción de gases ubicada a un costado del módulo que transportará los mismos hacia el quemador de gases.

Se tiene un canal de distribución del agua residual y un tanque de aquietamiento común para cada reactor, proyectado en poliéster reforzado con fibra de vidrio (P.R.F.V.) de 0,90m de ancho x 1,05m de largo y 1,20m de profundidad total. El agua ingresa a cada reactor a través de dos tuberías de repartición del flujo de Ø75 mm PVC-P las cuales entran al reactor por la parte inferior del mismo. Una vez el agua ha ascendido por el reactor UASB sale por una canaleta con vertedero dentado ubicada perimetralmente, la cual conduce hacia el FAFA mediante una tubería de Ø4" PVC-P, ubicada por la parte inferior del mismo. Dentro del FAFA el curso del agua también es ascendente y continúa hacia el Filtro Grueso de Pulimiento.

Los lodos provenientes del reactor UASB y FAFA son conducidos al lecho de secado donde se pretende deshidratar el lodo mediante un proceso de percolación y de evaporación. En el proceso de deshidratación del lodo, este debe estar cubierto con una capa de cal con el fin de estabilizarlo. El lodo deshidratado se retirará para ser dispuesto en un relleno sanitario, en un sitio autorizado o usado como mejorador de suelos.

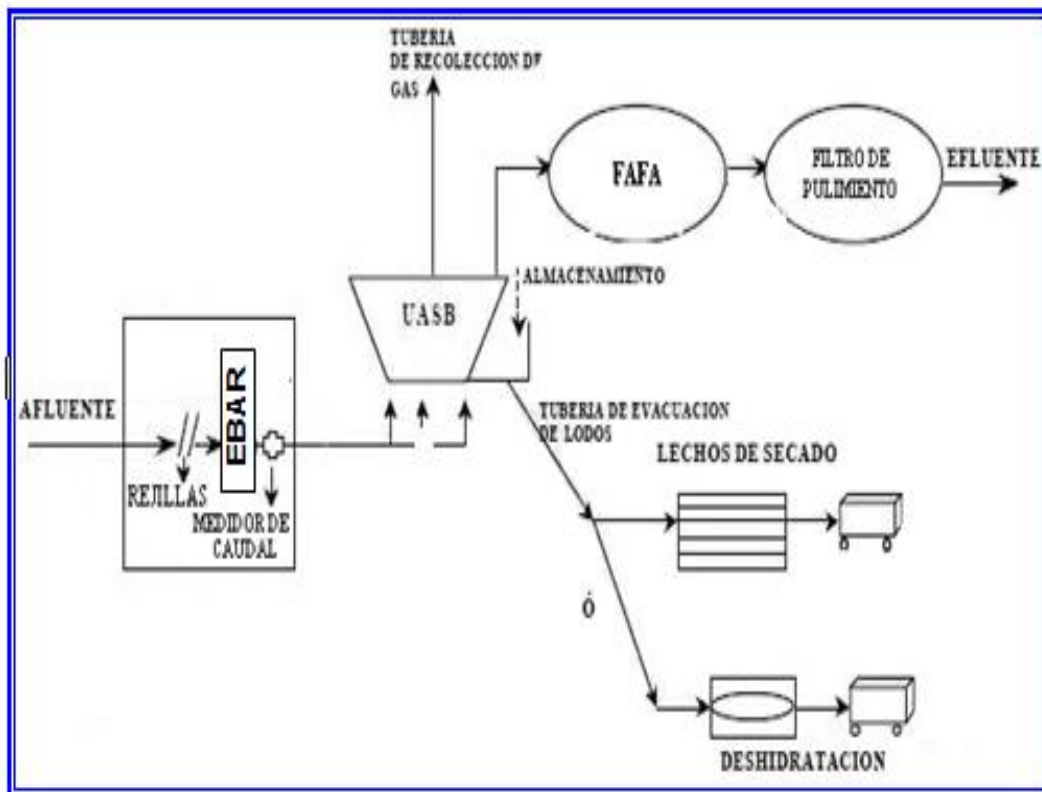
Para la construcción de la planta se seleccionó un lote de terreno situado al noroccidente del corregimiento, siendo éste uno de los sitios que permitía cumplir con el aislamiento al centro poblado y al mismo tiempo ofrecía una zona de descarga del agua residual después de haber pasado por el sistema de depuración.

Para tratar las aguas residuales, se proyectarán varias estructuras prefabricadas en fibra de vidrio, el tratamiento de las AR consta de:

- Dos Reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)
- Dos-FAFA- (Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente)
- Un filtro grueso de pulimiento de carbono activado
- Un lecho de secado

El proyecto contempla dos reactores UASB con capacidad para tratar al caudal total de aguas residuales, el cual se dividirá en dos trenes de tratamiento a partir de la salida de la EBAR (Ver figura 3-5).

Figura 3-5. Tren de tratamiento anaerobio con reactor UASB, FAFA y filtro grueso de pulimento de carbón activado



Fuente: PSMV del corregimiento Santa Rosa de Lima

Los lodos generados en cada tren de tratamiento se llevan hasta el lecho de secado diseñado para tal fin. El agua resultante de este proceso se ingresa al sistema de alcantarillado interno y se dirigirá al sitio de descarga final. El lecho de secado pretende deshidratar el lodo por el proceso de percolación y de evaporación, durante el tiempo que esto tarde el lodo debe estar cubierto con una capa de cal para su estabilización. El lodo deshidratado se retirará para ser dispuesto en un relleno sanitario, en un sitio autorizado o usado como mejorador de suelos.

Las unidades serán prefabricadas en fibra de vidrio de sección circular.

Reactor UASB

Parámetros de diseño

Caudal de diseño (Qd):	6,03 L/s
Número de reactores:	2 unidades
Caudal por reactor (Q _R):	3,02 L/s (10,85 m ³ /h)

Número de campanas por reactor:	1 unidad
Tiempo de detención para 28° C (TDH):	3,26 horas
Volumen del reactor, $Vr = (Q_{Dis} \times T_{Det})$:	35,38m ³
Profundidad adoptada (Digestión), (H_D):	3,04m
Área superficial: $As = Vr/H_D$:	11,64m ²
Velocidad ascensional del reactor: $V_{asc} = H_D/TDH$:	0,93 m/h
Diámetro del reactor, $R_R = \sqrt{\frac{As}{\pi} \times 4}$:	3,85m

Campana del reactor UASB

El reactor UASB tiene una pantalla deflectora en fibra de vidrio que dirige los gases producidos en la digestión anaerobia, hacia la campana de almacenamiento con área transversal de 8,71m², una altura total de 2,00m y ancho de base 3,33m, formando un ángulo de 45° con la vertical. En la campana de almacenamiento se acumula el gas producido en la digestión anaerobia, para luego ser transportado por una tubería Ø2" hacia el quemador de gases ubicado en la parte superior del reactor (Ver Figura 3-5).

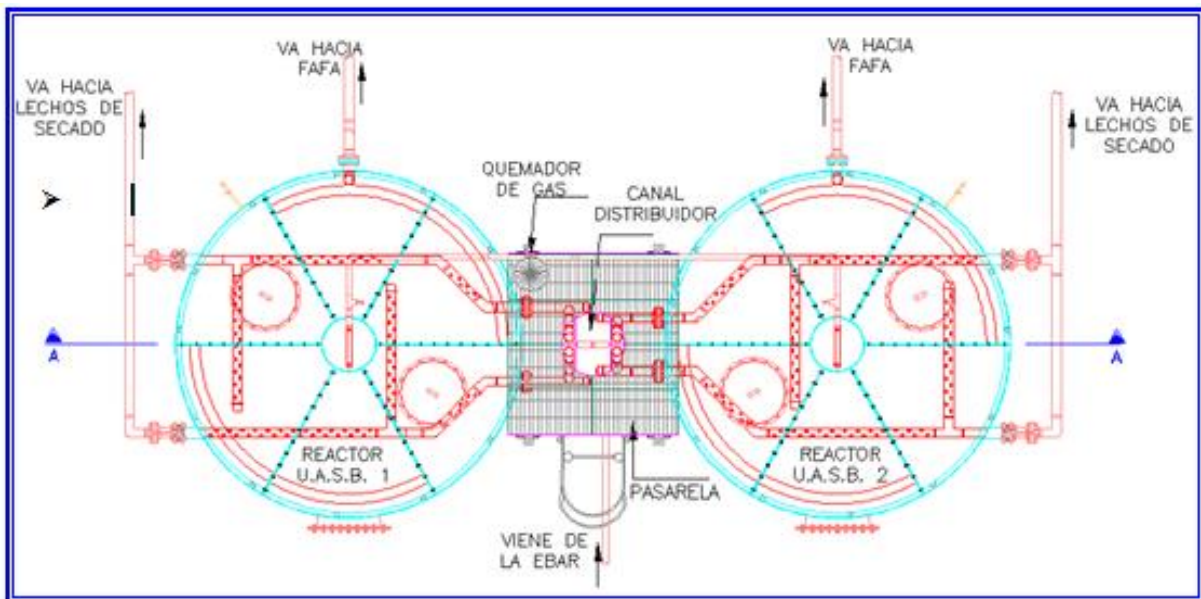
SISTEMA DE ALIMENTACIÓN AL REACTOR

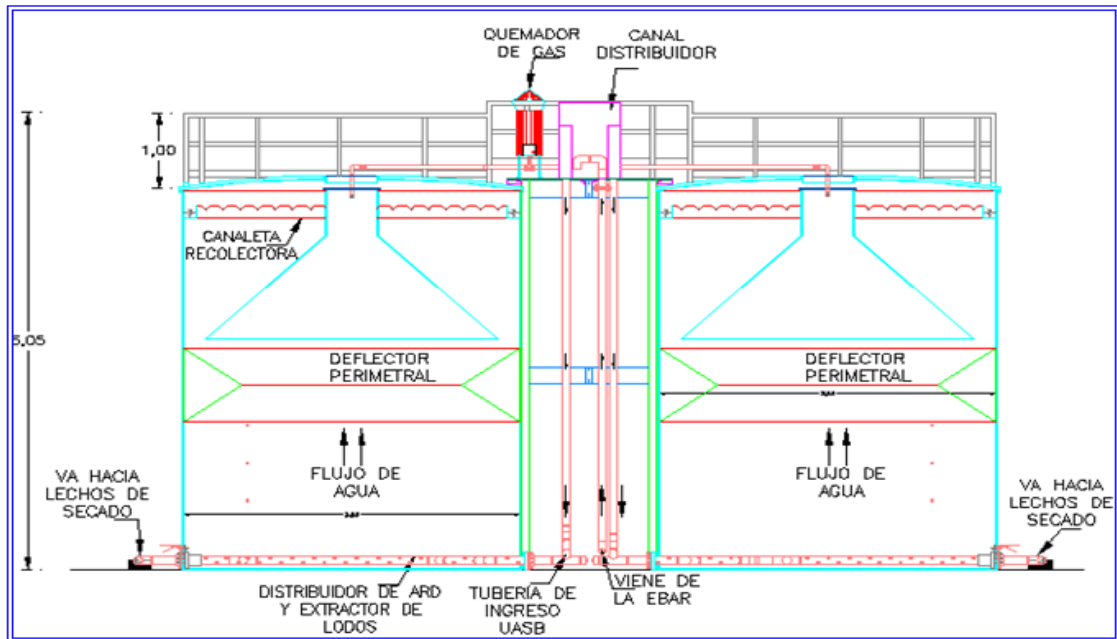
Las aguas residuales procedentes de la estación de bombeo llegarán a un canal de distribución, el cual contará con cuatro vertederos triangulares (dos vertederos para cada tren de tratamiento) para el control del caudal que ingresa al sistema y así continuar por dos tuberías de repartición del flujo de Ø 3" en PVC-P desde las cuales ingresan al reactor UASB por el fondo del mismo

Caudal que entra a canal común (Qd):	6,03 L/s
Radio del tanque R: (adoptado)	0,35m
Altura útil del tanque H_u (adoptado)	0,70m
Separación de los vertederos al tanque (A) (Adoptado)	0,15m
Longitud de cada vertedero: B	0,57m
Ángulo comprendido entre el triángulo 1-2-3 α :	110°
Área del segmento comprendido entre el ángulo α : As :	
Área del segmento As :	0,118m ²

Área del triángulo 1-2-3:	0,057m ²
Área total del tanque:	0,385m ²
Área neta tanque de aquietamiento:	
Área neta An:	0,264m ²
Volúmen útil del tanque de aquietamiento: $V = A_n \times h_u$	0,18m ³
Velocidad ascensional: $V_s = A_n / Q$	2,28 cm/s
Tiempo de detención (30s a 60s): (Td):	30,64s

Figura 3-6. Reactor UASB – Vista en planta y perfil





Fuente: PSMV del corregimiento Santa Rosa de Lima

VERTEDEROS DE ENTRADA A LOS REACTORES

Número de reactores:	2
Caudal por reactor:	3,02 Ls
Número de vertederos por reactor:	2
Caudal por vertedero: Q_v	1,51 L/s

Se utiliza un vertedero triangular de 90° para distribuir a cada tubería de entrada.

SISTEMA DE RECOLECCIÓN DEL EFLUENTE

Está conformada por una canaleta dentada, en acero inoxidable, que tiene 0,15m de ancho y una altura de 0,20m fijada al reactor perimetralmente, la altura del vertedero diente de sierra de 90° es de 0,05m; esta canaleta es utilizada para recolectar el efluente uniformemente y realizar la descarga en un canal de salida, provisto de una tubería de Ø4" que dirige dicho efluente hacia el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA).

SISTEMA EXTRACTOR DE LODOS

Para evacuar los lodos digeridos, se utilizara el mismo sistema de distribución del agua el cual estará ubicado en el fondo del reactor contará con una válvula mariposa o de apertura rápida para la extracción de lodos. El digestor tiene en el fondo tres tuberías recolectoras en PVC Ø4", con 11 orificios intercalados de Ø 1" cada 0,22m, sellada por un lado.

Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente -FAFA- y Filtro Grueso de Pulimento

Las ARD depuradas del sistema pasan a dos Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA) contruidos en fibra de vidrio con poliéster reforzado (PRFV) de Ø 2,35m y 3,00m de altura total, con capacidad paratratar 3,02 L/s en condiciones normales. La altura del medio filtrante (crispetas) es de 1,20m. Las aguas tratadas en el sistema UASB ingresan al FAFA por la parte inferior empleando un múltiple distribuidor en tubería perforada de PVC en forma de "CRUZ" (Ver figura 2-6).

Cuando el agua haya pasado por el medio filtrante, en la parte superior del FAFA será recolectada por una tubería de PVC Ø3 para transportarlashacia el Filtro Grueso de Pulimento. Los lodos producidos en el sistema FAFA, son transportados hacia el Lecho de secado empleando el mismo múltiple distribuidor de flujo que se encuentra en el fondo.

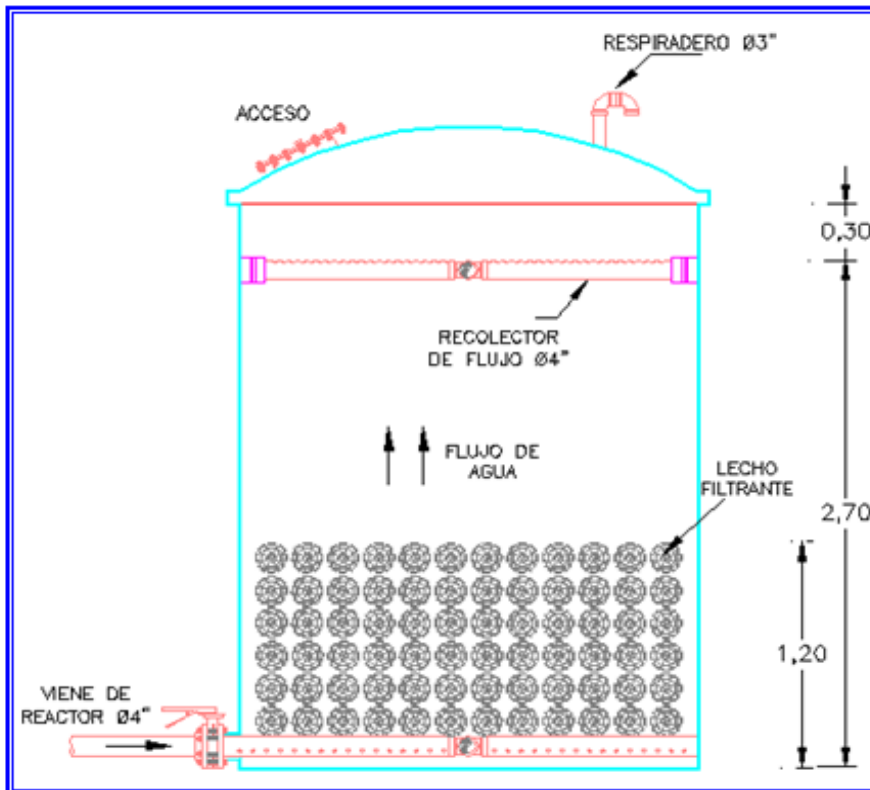
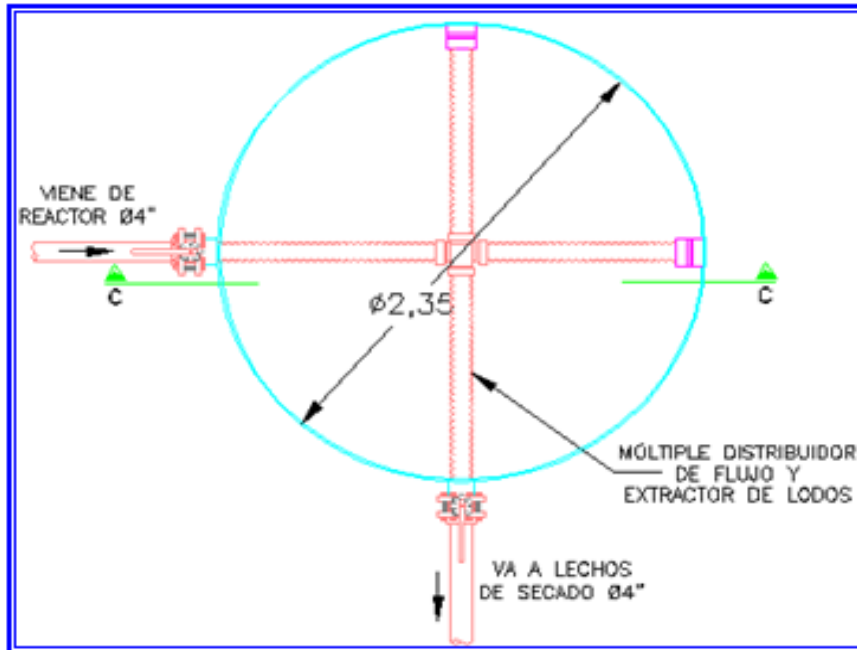
El tiempo de detención hidráulico (TDH) de cada FAFA es de 1,10h, es importante aclarar que según el RAS/2000 el TDH mínimo es de 2,00h, pero se ha encontrado eficiencias importantes para tiempo de detención hidráulicos menores, como es el caso de la planta de tratamiento del municipio Amalfi en el departamento de Antioquia la cual tiene un TDH de 1,00h. Por tal motivo se adoptó este tiempo para el diseño de dicha unidad, evitando así sobredimensionamientos y sobre costos.

El efluente del FAFA llega al Filtro Grueso de Pulimento construido en fibra de vidrio con poliéster reforzado, el cual tendrá un diámetro de 1,15m y una altura de 1,00m. El material filtrante utilizado es carbón activado, con una altura del lecho de 0,60m. Dicho filtro permite la remoción de los sólidos no tratados en los FAFA y neutraliza los olores producidos en los mismos. Las aguas finalmente tratadas en el Filtro Grueso de Pulimento son conducidas por medio de una tubería de PVC Ø3" para ser descargadas en época de invierno al caño contiguo a la PTAR y en época de verano para ser infiltradas en el terreno natural (Ver figura 2-6). Es importante mencionar que en el FAFA no se requiere la separación por fases, ya que los sólidos suspendidos arrastrados por el biogás hacia la superficie son inmediatamente retenidos por el material filtrante.

DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (FAFA)

Caudal de diseño:	6,03 L/s
Número de filtros:	2 un
Caudal de diseño:	3,02 L/s
DQO efluente:	157,38 mg/l
Carga orgánica:	0,16 Kg DQO/m ³
Carga Orgánica Volumétrica (COV) adoptada:	3,5 Kg DQO/m ³ -d
Volumen del filtro,	11,71 m ³
Altura útil del filtro,	2,70 m
Borde libre: B.L.	0,30m
Altura total del FAFA	3,00m
Área del filtro:	4,34 m ²
Diámetro del filtro:	2,35 m
Tiempo de retención hidráulico,	1,08 h
Velocidad Ascensional del flujo:	2,50 m/h
Porcentaje de huecos en el lecho filtrante:	0,90 %
Profundidad del lecho filtrante en plástico (P):	1,20 m
Área superficial de contacto del FAFA:	90 m ² /m ³
Volumen del filtro plástico del FAFA	5,21m ³
Área total de contacto del lecho filtrante:	468,54 m ²
Peso del lecho plástico del FAFA,	78,09 kg
Tiempo de retención hidráulico en el lecho:	0,48 h
Carga hidráulica aplicada:	0,56 m ³ /m ² -d
Carga orgánica aplicada COA kg/día DBO5 total:	5,74 Kg DBO/m ³ -d
Eficiencia de remoción:	91%
Eficiencia remoción total:	85%
Eficiencia remoción DBO suspendida,	85%

Figura 3-7. Filtro anaerobio de flujo ascendente proyectado - vista en planta y perfil



Fuente: PSMV del corregimiento Santa Rosa de Lima

Filtro grueso de pulimento de carbón activado

Consta de 1 unidad de sección circular, en cuyo interior se deposita carbón activado granular como material filtrante. (Ver figura 3-8).

DIMENSIONAMIENTO DEL FILTRO GRUESO DE PULIMENTO

Se asume una tasa de filtración de:	500m ³ /m ² -d
Caudal de diseño:	6,03 L/s
Número de módulos:	1
Caudal por módulo:	6,03 L/s
Área de filtración,	1,04 m ²
Diámetro del filtro:	1,15 m
Velocidad de filtración:	0,0058 m/s
Pérdida de carga:	0,1389 m
Altura del lecho:	0,80 m
Volumen filtro:	0,63 m ³
Tiempo de detención:	103,68 s
Área:	1,04 m ²
Borde libre asumido:	0,20 m
Altura total:	1,0 m

Sistemas complementarios de manejo de lodos

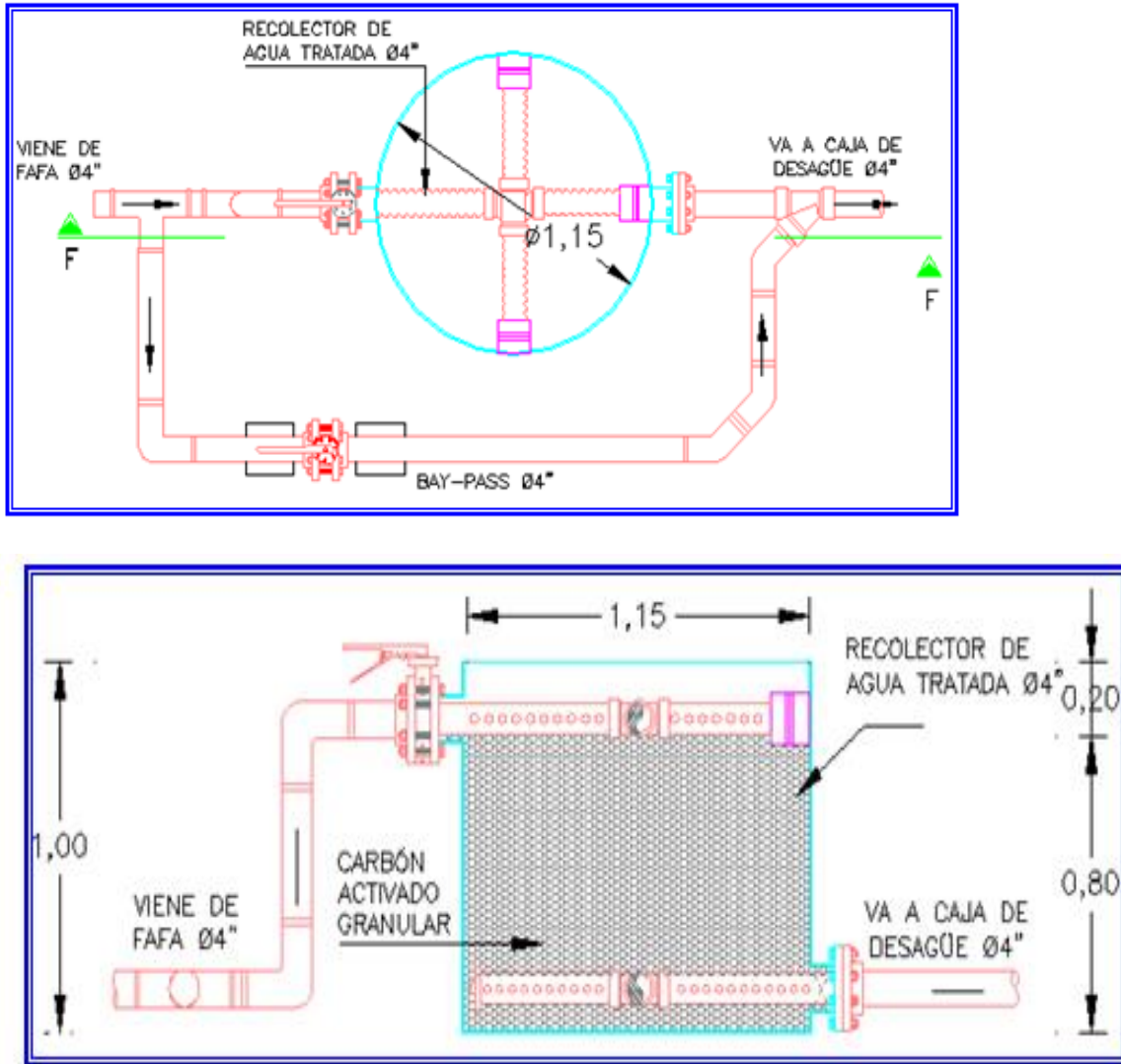
La PTAR proyectada tendrá además, procesos complementarios cuyas características y condiciones de funcionamiento, se describen a continuación:

Lechos de secado

Para la deshidratación y posterior manejo de los lodos producidos en el U.A.S.B., se proyecta un lecho de secado en fibra de vidrio con poliéster reforzado de Ø 2,10m y una profundidad de 1,00m, con un lecho filtrante mixto de grava y arena, en la parte inferior se tendrá un múltiple recolector en tubería de PVC Ø3" para evacuar el efluente hacia el caño contiguo a la PTAR. Los lodos digeridos secos deberán ser retirados del lecho y

conducidos a una cama de secado y almacenamiento, para reutilizarlo luego como mejorador de suelos

Figura 3-8. Filtro grueso de pulimento de carbón activado – Vista en planta y perfil

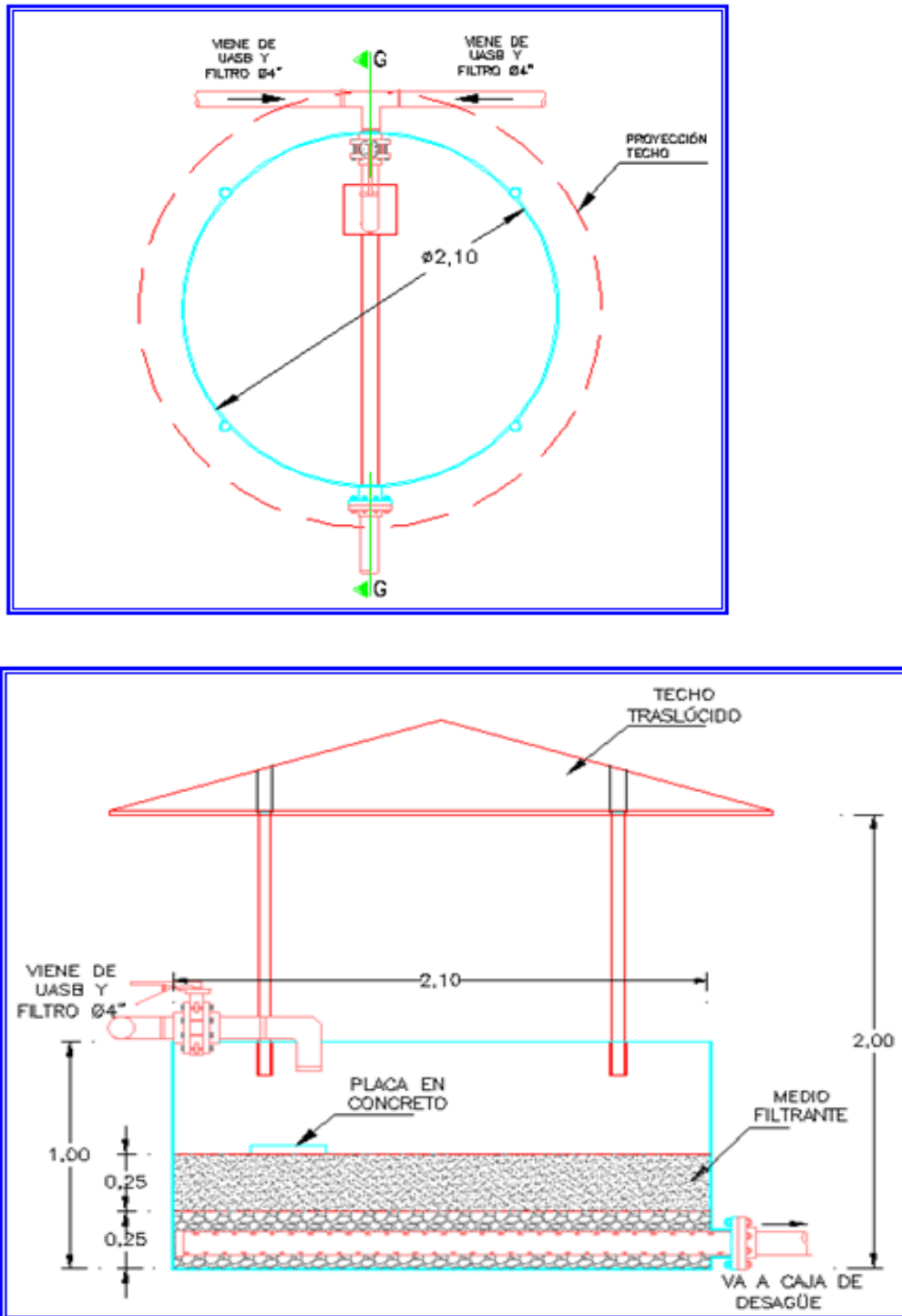


Fuente: PSMV del corregimiento Santa Rosa de Lima

El sistema de secado de lodos tiene una cubierta en poliéster reforzado con fibra de vidrio, para evitar su exposición a la lluvia, facilitar el acceso de los rayos solares y agilizar el secado de los lodos. El material seco debe rasparse de los lechos y transportarse hacia el lugar de disposición.

Las aguas depuradas dentro de todo el proceso serán descargadas a un canal de infiltración. El lodo deshidratado se retirará para ser dispuesto en un relleno sanitario, en un sitio autorizado.

Figura 3-9: Lechos de secado – Vista en planta y perfil



Fuente: PSMV del corregimiento Santa Rosa de Lima

Control de olores

A continuación del FAFA se proyecta la instalación de un Filtro grueso de pulimento de carbón activado con el cual se busca mejorar la eficiencia del tratamiento primario utilizado. El filtro de pulimento tiene por objeto una alta disminución de los olores producidos por el tratamiento del agua residual. Adicionalmente, como medida de mitigación se proyectó la siembra de árboles en todo el perímetro del lote de la PTAR y en ambos costados del canal de infiltración donde finalmente serán descargadas las aguas tratadas. Se recomienda la siembra de especies nativas para la formación de este tipo de barreras vivas.

Para evitar y controlar la generación de olores, se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:

La PTAR se encuentra alejada de la zona poblada del corregimiento, con lo cual se garantiza la disminución del impacto.

Adicionalmente como medida de mitigación se proyecta la siembra de árboles, en todo el perímetro del lote de la PTAR, el árbol recomendado es el Neem, árboles de origen asiático que presentan un crecimiento promedio de 5m en los primeros 3 años, alcanzando alturas de 10 m en 5 años o la siembra de especies nativas.

Durante la operación el pH de la PTAR, debe tener un rango entre 7,3 y 7,4, con el fin de evitar la producción de ácido sulfhídrico (H_2S), responsable de la generación de olores.

3.2.3 PTAR RELLENO SANITARIO LA PALANGANA DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA

Figura 3.10: Localización del Relleno sanitario La Palangana



La correcta operación, mantenimiento y control de la planta que trata los lixiviados del relleno sanitario “La Palangana” es condición necesaria para garantizar un efluente final de buena calidad, que permita su vertimiento en un cuerpo superficial, con el mínimo impacto ambiental sobre los recursos naturales, y a su vez, dar cumplimiento a los requerimientos de las autoridades de control ambiental de la ciudad de Santa Marta y el Departamento del Magdalena.

Los lixiviados son aguas residuales de características especiales que se generan por la percolación del agua a través de las capas de residuos sólidos, arrastrando consigo una serie de compuestos orgánicos e inorgánicos que hacen parte de las basuras originalmente depositadas.

Se instaló una planta de tratamiento que combina las operaciones y procesos fisicoquímicos y biológicos, pues permite mantener flexibilidad respecto a la carga aplicada y al caudal tratado, así como una capacidad de tratamiento constante a lo largo del tiempo, a medida que el lixiviado, por su antigüedad, va modificando su concentración.

Una vez construida la planta y lograda la estabilización de las diferentes operaciones y procesos unitarios se espera obtener una eficiencia en remoción de DBO, DQO mayor del 90%, sólidos suspendidos mayor del 80%, metales pesados mayores del 90%. Simultáneamente se podrá remover altas concentraciones de sulfato, fósforo, trazas orgánicas y microorganismos en el efluente final.

CRITERIOS DE DISEÑO

Caudal de diseño

A partir de la discusión del grupo asesor de INTERASEO S.A E.S.P en lo referente al diseño del Parque Ambiental La Palangana, incluyendo la generación de lixiviados se optó por un caudal de diseño de 3 l/s, para incluir un factor de seguridad que garantice periodos lluviosos, teniendo en cuenta que existen las lagunas de almacenamiento y estabilización que homogenizan el flujo y la carga orgánica que alimenta a las otras unidades del sistema de tratamiento.

Características de las aguas residuales

Los lixiviados son aguas residuales de características especiales que se generan por la percolación del agua a través de las capas de residuos sólidos, arrastrando consigo una serie de compuestos orgánicos e inorgánicos que hacen parte de las basuras originalmente depositadas.

Los lixiviados se caracterizan por su contenido de materia orgánica e inorgánica, grasas y aceites y presencia de metales pesados. En lixiviados de rellenos sanitarios nuevos, la materia orgánica tiene una alta fracción biodegradable, es decir, la relación DBO/DQO es mayor del 60%. Por su parte, en rellenos sanitarios “viejos” dicha fracción se reduce en proporción a la “edad” del relleno.

En tabla 3-9 se presentan los resultados de la caracterización de los lixiviados del Parque Ambiental La Palangana en el período 2004 a 2006. Sin embargo, en el arranque y puesta en marcha de la planta se tendrán que realizar muestreos para partir de datos ciertos en ese instante.

Tabla 3-9: Composición del lixiviado del relleno sanitario Parque Ambiental La Palangana de la ciudad de Santa Marta

Parámetro	Unidad	Noviembre de2004		Marzode2005	Noviembre de2005		Noviembre de2006	
		Tubo N°1	TuboN°2	PozoN°1	TuboN°1	Tubo N°2	TuboN°1	Tubo N°2
Aceitesy grasas	mg/l	*	*	*	14.8	16.8	94	97
DBO	mg O ₂ /l	5548.50	22254.00	5426.4	6990	17430	11302	11197
DQO	mg O ₂ /l	6417.10	26524.10	5998.14	10110	28720	18000	18000
OD	mg/l	*	*	*	0.98	0.65		
Ph	mg/l	7.06	6.15	7.94	7.63	8.38		
T°	mg/l	*	*	33	27.28	27.86		
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /l	3101.70	4522.70	6552	9150	4430	4445	3175
Conductividad	µS/cm	*	*	*	17560	16840		
Hierro total	mg/lFe	4.54	75.05	3.24	26,640	66,700	32,413	11,546
Nitrogeno total	mg/l	216.80	729.90	324.42	*	*	*	*
Nitrogeno amoniacal	mg/lN	*	*	*	593.6	857	829	854
SolidosDisueltos	mg/l	7488.00	21482.70	8094.17	13840	24644	10790	13540
SolidosSuspendidos	mg/l	60.00	220.00	172.5	340	840	2700	10540
SolidosTotales	mg/l	7548.00	21702.70	8266.67	14180	25484	8090	3000
Sulfatos	mg/l SO ₄	ND	411.30	ND	268.4	466.1	183.6	230.5
ColiformesTotales	UFC/100 ml	*	*	*	530x10 ⁴	250x10 ⁴	236 *10 ⁴	68 *10 ⁴
ColiformesFecales	UFC/100 ml	*	*	*	346x10 ⁴	100x10 ⁴	38 *10 ⁴	10 *10 ⁴
Cadmio	mg/l	*	*	*	<0,040	<0,040	*	*
Calcio	mg/l	532.64	1248.44	158.04	*	*	26,717	26.76
Cloruros	mg/l	1864.00	789.90	1918.38	5450	5150	5409	7097
Cromo	mg/l	*	*	*	0.171	0.197	0.28	0.48
Mercurio	mg/l	0.00	0.01	0.0017	<0,00088	<0,00088	<0,00001	0.0015
Niquel	mg/l	*	*	*	0.566	0.714	1,471	1,132
Plomo	mg/l	ND	ND	ND	<0,10	<0,10	0.318	0.659
Zinc	mg/l	*	*	*	0.879	0.758	1,424	2,921
Detergenteso tensoactivos	mg/l	0.16	0.30	0.54	0.99	0.61	0.662	0.797
Fenoles	mg/l	12.03	17.42	5.49	7.25	3.67	2.92	2.85
Cobre	mg/l	*	*	*	0.148	0.156		
Magnesio	mg/l	114.60	514.36	348.87			14,987	15.38
Fosforo total	mg/l	6.29	8.96	1.37			488.9	430.1
Cianuro	mg/l	ND	ND	ND				
dureza total	mg CaCO ₃ /l	1801.92	5235.49	2747.2				

Vale la pena resaltar que los resultados para esa fecha denotaban un alto contenido de materia orgánica biodegradable en el lixiviado en el punto de muestreo denominado pozo 1, y una disminución de la relación DBO/DQO en el pozo 2, lo cual indica una mayor antigüedad de los lixiviados del pozo 1. Ambos puntos se mezclan en la laguna primaria, con lo cual se homogenizan e igualan la carga orgánica e hidráulica que tratan las unidades subsiguientes de la PTAR.

ETAPAS DE TRATAMIENTO

La planta está conformada por las siguientes etapas de tratamiento:

Tratamientos preliminares

Como tratamiento preliminar se utiliza una cámara desarenadora, que es una unidad destinada a retener la arena y otros detritos minerales y pesados que son arrastrados con el lixiviado. Estos materiales son originados a partir de la operación de “lavado” del material de cobertura de la basura durante la percolación del agua a través de las diferentes capas y el arrastre de productos de la descomposición de las mismas.

Su finalidad es evitar la formación de depósitos inertes que tienen un efecto negativo en los procesos biológicos y que representan una carga inútil en las estructuras de tratamiento.

Tratamiento primario

Como tratamiento primario se utiliza un sistema de lagunas primaria y anaerobia en serie, separadas por un terraplén, cuyo objetivo es conformar dos zonas: en la primera ocurrirá la sedimentación, acumulación y extracción de sólidos, y la segunda servirá para compensar las variaciones de caudal de los lixiviados. En la primera estructura se produce no solo la retención de una alta fracción de los sólidos sedimentables, sino también de grasas y aceites, mediante la formación de una capa flotante que puede degradarse, por lo cual se debe estar removiendo permanentemente.

Tratamiento secundario (Anaerobio)

El tratamiento secundario consiste en reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente (RAMLFA ó UASB). En este tipo de reactor el desecho que se va a tratar se distribuye uniformemente por el fondo del tanque donde se pone en contacto, inicialmente, con un manto de lodo anaerobio, el cual tiene buenas propiedades de sedimentación. La degradación anaeróbica de los sustratos orgánicos ocurre en el lecho del lodo, donde se produce el biogás que es el encargado de generar la mezcla para lograr un buen contacto entre el agua residual y la biomasa, excluyéndose la presencia de mezcla mecánica.

El efluente desnatado del RAMLFA alimenta un filtro anaerobio de flujo ascendente. El principio básico de tratamiento lo realizan bacterias anaerobias que crecen y se adhieren a un soporte inerte, formando una capa biológica, que al ponerse en contacto con el agua residual estabiliza la materia orgánica y se produce metano como uno de los productos

finales. El medio de soporte está conformado por una columna aglomerada de *rosquetas* de 2.0 m de altura fabricadas en polipropileno.

Descripción del tratamiento anaerobio

El tratamiento anaerobio consiste en un híbrido entre el RAMLFA (reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente) seguido de un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA).

El objetivo del tratamiento secundario es remover la DBO y DQO soluble que escapa de la laguna anaerobia, además de remover cantidades adicionales de SS. Estas remociones se logran fundamentalmente por medio de procesos biológicos anaerobios, en donde se efectúan las mismas reacciones descritas anteriormente, pero bajo condiciones especiales, para facilitar la descomposición de los contaminantes orgánicos en períodos cortos.

Con esta etapa se pretende completar la eficiencia de remoción de DBO y DQO por encima del 80%, aunque no se remuevan cantidades significativas de nitrógeno, fósforo y bacterias patógenas.

Reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente (RAMLFA)

En el RAMLFA las aguas residuales afluentes se alimentan por el fondo mediante tuberías distribuidoras, buscando que las aguas residuales se pongan en contacto con un manto mixto de lodo anaeróbico, el cual tiene buenas propiedades de sedimentación. La degradación anaeróbica de los sustratos orgánicos ocurre en el lecho del lodo y como consecuencia de ello se produce el biogás, que es el encargado de generar la mezcla para lograr un buen contacto entre el agua residual y la biomasa, excluyéndose la presencia de mezcla mecánica.

Por tiempo de retención hidráulico se sedimentan gran parte de los sólidos suspendidos, produciéndose la estabilización de los mismos. El efluente busca la salida atravesando una ranura existente en el fondo del compartimiento superior o de sedimentación. Los sólidos que puedan ser arrastrados con el efluente se sedimentan por acción de las características especiales del diseño del compartimiento superior. El efluente es recogido uniformemente a lo largo del reactor mediante una tubería ahogada con orificios vertederos en el eje superior, para evitar el arrastre de natas. La espuma y las natas se acumulan en cámaras desnatadoras localizadas entre compartimientos de sedimentación. El gas producido en el proceso de digestión en el compartimiento inferior, así como en los desnatadores se recoge y se conduce a un quemador. Cuando hay una acumulación excesiva de lodos se extraen hacia lechos de secado, previo espesamiento para concentrarlos y minimizar el volumen.

Las principales ventajas del RAMLFA son: es sencillo de operar y no exige la supervisión por parte de personal especializado; no existe equipo mecánico que mantener; no requiere operarios calificados ni permanentes; su mantenimiento consiste en eliminar con

cierta frecuencia las natas de los diferentes compartimientos a través de las tapas de inspección que se dejan para tal fin; por tener un tiempo de retención hidráulico suficientemente alto y el contacto de las aguas residuales con lodos anaerobios se pueden lograr eficiencias de remoción hasta del 70% de DBO y mayor del 80% en sólidos suspendidos; cumple funciones de sedimentación, digestor y desnatación; el impacto ambiental es mínimo, debido a que el diseño concibe las estructuras como un sistema cerrado, provisto de respiraderos para la recolección de gases y su posterior quema.

El efluente desnataado del RAMLFA alimenta un filtro anaerobio de flujo ascendente. El principio básico de tratamiento lo realizan bacterias anaerobias que crecen y se adhieren a un soporte inerte, formando una capa biológica, que al ponerse en contacto con el agua residual estabiliza la materia orgánica y se produce metano como uno de los productos finales. El medio de soporte estará conformado por una columna de *rosquetas* de 2.0 m de altura fabricadas en polipropileno, tienen un volumen de vacío del 95% y una alta relación de volumen por unidad de área del orden de 30 ft²/ft³.

Dimensionamiento RAMLFA

Para el cálculo de las dimensiones y compartimientos se utilizan las siguientes expresiones [Cuervo H. F., 1987]:

$$L = (AR)^{0.5} F = \left(R \frac{Q_{\max}}{q} \right)^{0.5} F$$

$W = L / R$

Donde,

L: longitud del tanque Imhoff en metros.

R: relación largo a ancho del tanque (adimensional), varía entre 2 y 4.

W: ancho del tanque en metros.

F: Factor de seguridad, varía entre 1,2 y 1,5 (se asume dependiendo de la temperatura del agua residual).

A: Área superficial en m², es decir relación Q_{max}/q

Q_{max}: es el caudal máximo expresado en m³/día.

q: tasa de escurrimiento superficial, la cual puede adoptarse entre 20 y 40 (m³/(m².día)).

El valor de que se extrae de la curva que relaciona el porcentaje de remoción de sólidos suspendidos versus carga superficial aplicada en tanques de sedimentación de flujo continuo (L.G. Rich, Unit Operations of Sanitary Engineering, Jhon Wiley & Sons, Inc. New York, 1961).

El ancho de cada uno de los compartimientos de sedimentación puede calcularse mediante la ecuación:

$$W_s = \frac{L}{W} \cdot F_a$$

Donde F_a es el factor de anchura que puede asumirse entre 0.5 y 0.7. Tomando un valor promedio para F_a de 0.60 mediante la ecuación anterior se obtiene un ancho del compartimiento de sedimentación de 1.50 m.

La dimensión vertical del tanque se obtiene mediante las siguientes expresiones:

$$H_s = \frac{V_L}{WL}$$

$$H = H_s + 0.60W_s + 1.50$$

Donde H_s es la altura de lodos que no debe ser inferior a 1.5 m, V_L es el volumen del compartimiento de lodos en m^3 y H es la altura total de la lámina de agua en m que para este caso particular sería:

$$H = 1.5 + 0.60 \cdot 1.50 + 1.50 = 3.9 \text{ m}$$

La altura del borde libre recomendado debe estar entre 0.40 y 0.50 m

En la tabla 3-8 se presenta un resumen con las características básicas del diseño del reactor.

Tabla 3-9. Características Básicas del diseño del reactor del relleno Palangana

Datos del reactor o criterio de diseño	Valor asumido o calculado
Número de reactores en paralelo	1
Caudal de diseño máximo del reactor, Q_d	3.0 l/so 259m ³ /d

Temperatura de operación, T	28°C
Carga hidráulica superficial máxima, C _{sm}	10.8 m ³ /m ² /d
Velocidad ascensional crítica, V _{sc}	0.75 cm/min
Tiempo de retención hidráulica, TRH	8.9h
Altura total del reactor	4.5 m
Altura lámina de agua	4.0 m
Longitud del reactor	6.0 m
Ancho del reactor	4.0m
Número de sedimentadores	6
Eficiencia esperada de remoción DBO	60%
Eficiencia esperada de remoción SS	70%
Eficiencia esperada de remoción DQO	60%
Material de construcción	Concreto reforzado y fibra de vidrio

Filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA)

En general el sistema FAFA produce un perfil hidráulico de tipo flujo pistón y el diseño provee mecanismos de lavado a contracorriente para remover el exceso de lodos. La operación de limpieza mediante lavado a contracorriente consiste en abrir por 3 a 5 minutos una válvula que produce la salida de agua y el arrastre hidráulico de los sólidos de los intersticios del medio de soporte.

Con este sistema se pueden lograr una eficiencia adicional del orden del 40% en remoción de DBO₅, ocupa muy poca área, requiere mínima operación y mantenimiento, su arranque y puesta en marcha es sencilla y su estabilización se logra en un período de aproximadamente seis meses, debido a que el efluente del RAMLFA produce la auto inoculación del sistema. El impacto ambiental es mínimo, debido a que el diseño concibe las estructuras como un sistema cerrado provisto de respiraderos para la recolección, transporte y quema de los gases.

Para el cálculo de la eficiencia esperada se utilizó la expresión presentada por Young y McCarty (1969), modificada por Oh, Y. M., y Yang, B. S (1986):

$$E = 100[1 - S_k(\text{TRH})^{-m}]$$

Donde,

E = eficiencia de remoción de DQO soluble, %

TRH = tiempo de retención hidráulico en función del volumen de vacíos, horas

Sk y m = coeficientes relacionados con la configuración del reactor y el tipo de medio

Para medios sintéticos empacados Sk =1 y m = 0.55 a 0.40

Con el sistema dual RAMLFA-FAFA se pretende lograr una eficiencia conjugada en remoción de DBO y DQO por encima del 70%, aunque no se remuevan cantidades significativas de nitrógeno, fósforo y bacterias patógenas. En la tabla 2-4 se presentan las principales características y criterios de diseño del FAFA.

Tratamiento fisicoquímico

El efluente del reactor anaerobio es sometido como pulimento final a un proceso fisicoquímico de coagulación, floculación, sedimentación-clarificación, antes del reuso del mismo al interior de las instalaciones del relleno sanitario.

El tratamiento se realiza en una unidad compacta de floculación-clarificación estructurada en un tanque rectangular en lámina de acero al carbono con dimensiones interiores de 3.0 m de largo; 3.0 m de ancho y 3.5 m de altura; compartimiento de floculación hidráulica de flujo vertical con tres zonas de floculación definidas, sedimentador de alta tasa con módulos plásticos tipo panal inclinados 60° con la horizontal y almacenamiento de agua clarificada.

Se utilizan para remover compuestos que se escapan al tratamiento secundario de los lixiviados. Entre estos compuestos podemos citar el nitrógeno y el fósforo, metales pesados, DQO soluble que escapo al tratamiento biológico, además del color.

Tabla 3-11. Características generales y criterios de diseño FAFA

Datos del reactor o criterio de diseño	Valor asumido o calculado
Número de reactores en paralelo	1
Caudal máximo de diseño del reactor, Q_d	3 l/so 259m ³ /d
Temperatura de operación, T	28°C
Carga hidráulica superficial, C_s	21.6m ³ /m ² /d
Velocidad ascensional, V_s	1.5 cm/min
Caudal por metro lineal de vertedero, Q_v	0.25l/s-m
Número de vertederos orificios	60
Caudal por orificio vertedero	0.051 l/so 4.4 m ³ /d
Tiempo de retención hidráulica, TRH	2.2h
Eficiencia esperada remoción DBO	30%
Eficiencia esperada remoción SS	40%
Eficiencia esperada remoción DQO	30%
Altura total del reactor	3.9 m
Altura medio de soporte	2.0 m
Material de construcción	Concreto reforzado y discos de poliuretano

Aspectos hidráulicos y de operación

Floculación. En esta etapa las partículas que conforman la turbiedad y el color del desecho, al igual que los metales que pueden estar en forma de quelatos coloidales y los fosfatos son desestabilizadas por un agente externo o coagulante, aglutinándose en pequeñas masas llamadas floc.

Los dos objetivos básicos que se persiguen con la floculación son:

Reunir los microfloculos para formar partículas mayores con peso específico superior al agua.

Compactar el floc (disminuyendo su grado de hidratación) para producir una baja concentración volumétrica que permita una alta eficiencia en la fase de separación (sedimentación - filtración).

En un floculador la concentración de flóc es inversamente proporcional al gradiente de velocidad G y al tiempo de floculación t , conclusión esta de gran valor práctico. En otras palabras, esto quiere decir que es posible variar el volumen del flóc, cambiando la energía que se le comunique a la masa líquida o el periodo de retención hidráulico del floculador.

Para controlar el gradiente se utiliza un floculador hidráulico de tabiques y flujo vertical con tres (3) zonas definidas por el espaciamiento entre tabiques. El menor se localiza al iniciar y el mayor espaciamiento en la zona media y a la salida, con lo cual se logra disminuir la velocidad de las partículas. El tiempo de retención hidráulico es de aproximadamente 35 minutos para garantizar una buena formación del flóculo, y tener cierta flexibilidad para los cambios en la calidad del agua.

Sedimentación-clarificación. El proceso de sedimentación-clarificación se proyecta para remover un alto porcentaje de las partículas que se aglomeran en el proceso de floculación.

Tomando como base el caudal de 3 l/s (259 m³/d), la carga superficial o velocidad de sedimentación crítica es del orden de 115 m³/m²/d. Este valor permite obtener un buen clarificado que facilita la aplicación de cloro como agente oxidante.

Para el drenaje de lodos en la zona de sedimentación se cuenta con la válvula (2), la cual se debe abrir cuando el volumen de sedimento lo indique. De otra parte, para limpiar los diferentes compartimientos del floculador se cuenta con una válvula (1), que se debe abrir cuando se observe acumulación de material sedimentado, que puede ocurrir cuando la planta no esté funcionando.

MANEJO Y TRATAMIENTO DE LODOS

Producto de la remoción de la materia orgánica en el RAMLFA, el FAFA y de la clarificación del agua residual en la unidad compacta fisicoquímica, se generan lodos biológicos y fisicoquímicos, respectivamente. Estos se deben remover con cierta frecuencia, desaguar y secar, antes de su disposición final en el relleno sanitario.

Lechos de secado

El método de lechos de secado es el sistema más empleado de deshidratación de lodos por su bajo costo, escaso mantenimiento que precisan, y el elevado contenido en sólidos del producto final. Una vez seco, el lodo se retirará y se dispondrá en el relleno sanitario.

Se utilizarán lechos de secado convencional de arena como medio filtrante, soportado en un lecho de grava de 3/8" a 1/2" y de 0,30 m de espesor, para minimizar la pérdida de arena con la extracción de los lodos secos. Sobre la arena estará localizada una tela filtrante para minimizar su colmatación y aumentar el tiempo de recambio y reposición.

Tabla 3-12. Características generales y criterios de diseño unidad compacta de precipitación- clarificación

Datos del reactor o criterio de diseño	Valor asumido o calculado
Número de reactores	1
Caudal máximo de diseño por reactor, Qd	3.0 l/so259m ³ /d
Temperatura de operación, T	28°C
Tiempo de retención hidráulica floculación	75minutos
Número de compartimientos floculación	3
Área de sedimentación, As	3m ²
Tasa superficial, Cs	86.4m ³ /m ² /d
Tipo de coagulante	PCAy ayudante de coagulación
Eficiencia esperada remoción DBO	30%
Eficiencia esperada remoción SST	80%
Eficiencia esperada remoción DQO	30%
Otras sustancias o materiales removibles	Metales pesados, color, turbiedad y microorganismos

Material de construcción	Acero al carbono con anticorrosivo y epóxica
--------------------------	--

El lodo se extrae hidráulicamente de los reactores RAMLFA y FAFA o del clarificador y se vierte sobre una *celda* o *cámara* de 2,0 m x 3,0 m, formando una capa de 30 a 40 cm de espesor y se deja secar. El lodo se deshidrata por drenaje a través del lecho de arena, y por evaporación desde la superficie expuesta al aire. Como la mayor parte del agua se extrae por drenaje, los lechos están equipados con tuberías de drenaje inferior dispuestas con pendiente del 1% que recogen las aguas infiltradas y la entrega a una tubería de PVC para su descarga a un tanque donde se almacena y se devuelve por bombeo al RAMLFA.

El lodo se debe extraer de los lechos después de que se haya secado y drenado suficientemente para que sea paleable. El lodo seco posee una textura gruesa y agrietada, El contenido de humedad, después de 8 a 10 días en condiciones favorables (sin lluvia), es del orden del 60%. La extracción del lodo seco se realizará manualmente con palas cargando carretillas. Para evitar que la lluvia interfiera con el proceso de pérdida de agua, las celdas se protegerán con un techo.

ACTIVIDADES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO RUTINARIOS

Entre las actividades rutinarias que debe realizar el operador están:

Remover la arena que se retiene en los desarenadores y hacerles mantenimiento en general.

Remover las natas, espumas, grasas y aceites que se acumulen en la parte superior del sedimentador primario, RAMLFA y unidad compacta de clarificación utilizando un cedazo. Estos materiales deben almacenarse y disponerse adecuadamente para evitar los malos olores como producto de su descomposición.

Preparar la solución de los químicos que se deben utilizar en la unidad de clarificación.

Medir diariamente y controlar en el efluente del reactor anaerobio en la etapa de arranque: el pH, el cual debe estar entre 7,0 y 7,5; y la capacidad buffer (ideal entre 0,20 y 0,40), con el fin de controlar la acidificación del manto de lodos.

En el caso en que el pH este por debajo de 7,0 se debe dosificar solución de cal al 2%, o de NaOH 1.0N hasta llevar el pH al rango deseado.

Una vez estabilizado el sistema debe mantener el control del mismo, midiendo cada uno de los parámetros.

Realizar el lavado del filtro de arena y antracita.

Remover sólidos secos de los lechos de secado, para lo cual utilizará una pala y un coche.

Recoger las muestras del afluente y el efluente cuando sea necesario.

Con una frecuencia mensual, medir el espesor de la capa de lodo en el RAMLFA, como se explica en el numeral sobre procedimiento para medición de lodos.

Evacuar lodos del RAMLFA cada que sea necesario, después de que estos hayan alcanzado una altura de 2,0 metros. Sin embargo, después de 90 días es conveniente crear una dinámica poblacional, por lo cual se recomienda extraer cada mes una “cochada” equivalente al volumen del espesador.

Realizar evacuación de lodos de FAFA y unidad compacta de tratamiento fisicoquímico cada que sea necesario.

Para mantener unas buenas condiciones ambientales para el cultivo anaerobio, el reactor se debe alimentar una vez a la semana con 10 kg de melaza y 1.0 kg urea.

3.2.4 PTAR Maltería Cartagena

Localización del sistema de tratamiento

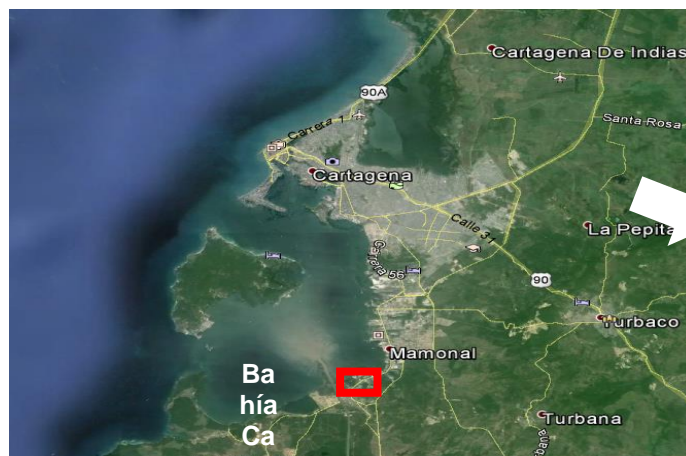
El Sistema de tratamiento de aguas residuales está ubicado en un lote aledaño a las instalaciones portuarias, emplazado en el área de manglar (ver Figura 3-11, a continuación, tomada de Google Earth). Las coordenadas en donde se encuentra son:

Norte: 10° 17' 39.4”

Oeste: 75° 31' 2.4”

Altitud: 5 msnm

Figura 3-11. Localización del vertimiento final de la empresa Maltería





Fuente: Google Earth

En la siguiente fotografía 3-6 se puede apreciar el sitio (único) de descarga del vertimiento a la bahía de Cartagena:

Foto 3-6: Ubicación de descarga final de la PTAR y del sitio de vertimiento



Fuente: Autor, durante visita

Componentes y Funcionamiento del Sistema de tratamiento de aguas residuales

Para el tratamiento de los residuos líquidos producto de la actividad industrial de la planta, Maltería Tropical cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales compuesta por:

- Tratamiento primario: Cribado, piscina de igualación, desarenador y tamizado para remoción de sólidos. Este sistema garantiza que las etapas posteriores no tendrán afectaciones asociadas a materiales sólidos externos dentro de los tanques de trabajo.
- Tratamiento secundario: Remoción de carga orgánica (DBO₅ y DQO) gracias al trabajo de dos reactores anaerobios de flujo ascendentes (UASB – “Upflow Anaerobic Sludge Blanket”), cuya capacidad combinada es de 70 m³/h (70 l/s).

Más adelante se muestra un diagrama de flujo, con la distribución de los equipos y tanques que componen el sistema de tratamiento de aguas residuales de Maltería Tropical. En él se distinguen los siguientes elementos:

Sistema primario: pre-tratamiento

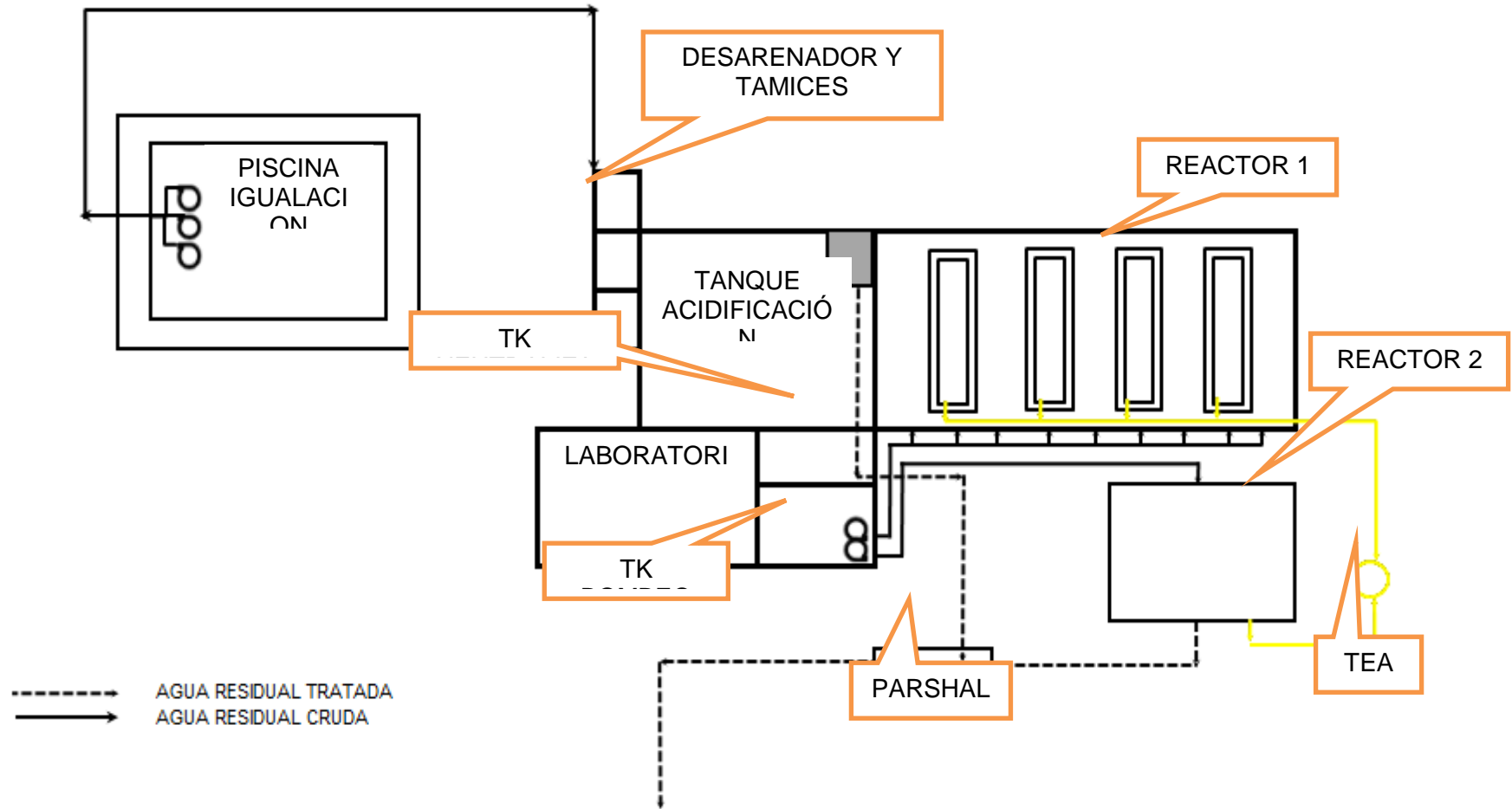
Línea de conducción de agua residual

En esta unidad se reciben las aguas residuales de la fábrica y desemboca en la piscina de igualación, donde se cuenta con una rejilla que sirve de cribado inicial.

Piscina de Igualación

Las aguas cribadas son recibidas en la piscina donde se cuenta con 3 bombas instaladas. Cada bomba puede asegurar un flujo de 60 m³/h de manera independiente y se tienen listas y en sitio a manera de stand by. La piscina tiene capacidad para recibir hasta 1500 m³ de agua, es decir 1.5 veces lo que se procesa en 1 día promedio de trabajo.

Figura 3-12. Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales usado en Maltería Tropical



Fuente: Maltería Cartagena

Tamices estáticos

Los tamices estáticos (3 en total) retiran sólidos de tamaño superior a 0,5 mm tales como cascarilla y cebada húmeda principalmente. El sistema está dimensionado para cubrir las necesidades con dos tamices en caso de falla. El agua que pasa por los tamices cae al tanque de acidificación.

Foto 3-7: Piscina de igualación.



Fuente: Autor, durante visita

Foto 3-8: Tamices estáticos.



Fuente: Autor, durante visita

Sistema secundario: acidificación y metano-génesis

Tanque de acidificación

En esta unidad se dan las primeras fases del proceso biológico anaerobio, (hidrólisis, acidificación y parcialmente la acetogénesis), gracias al trabajo de microorganismos específicos. La hidrólisis se refiere al rompimiento de macromoléculas, la acidificación a la transformación a ácidos grasos y la acetogénesis a la transformación a ácido acético; estas reacciones se controlan por tiempo de residencia del agua (caudal de operación y nivel del tanque), el cual no debe ser inferior a 5-6 horas. Otros parámetros de control importantes son, AGV que indican la transformación de la materia orgánica a ácidos grasos (300-500 mg/l), pH (5,5 a 6,5) y la alcalinidad. Así pues, el objetivo de esta unidad es transformar la materia orgánica a ácidos grasos menos complejos manteniendo un ambiente ligeramente ácido para la acción de los microorganismos evitando altos tiempo de residencia que incrementen los consumos de soda. Los equipos involucrados en esta operación son:

- Tanque de acidificación
- Mezcladores sumergibles
- Rebose por gravedad

El agua ingresa por gravedad a la parte superior – oriental del tanque de acidificación y sale por la parte superior occidental (evitando flujos en contracorriente), dentro del tanque se encuentra instalado un mezclador sumergible tipo FAN encargado de mezclar el agua con los microorganismos. El agitador trabaja de manera continua.

Tanque de neutralización

El agua proveniente del tanque de acidificación, pasa a un sector de neutralización, en donde se mezcla con el agua recirculada del Reactor 1 (comúnmente entre 12 y 15 m³/h) y se acondiciona el pH entre 6,8 y 7,2 unidades, para luego enviarlo al tanque de bombeo hacia reactores anaeróbicos.

Bombeo a reactores anaerobios

Esta unidad envía el agua acidificada y neutralizada a los dos reactores anaerobios. El caudal máximo de alimentación al reactor 1 es de 65 m³/h y al reactor 2 es de 17 m³/h, con una DQO máxima 2500 mg/l para una carga máxima de 3.900 Kg/día en el reactor 1 y 1.090 kg/día en el reactor 2. La máxima concentración de SST es de 500 mg/l, el pH de alimentación debe ser entre 6,8 y 7,2.

- Bombas de alimentación a los reactores
- Medidores de flujo hacia reactores

El sistema cuenta con una bomba para cada reactor y dos en stand-by para cada equipo, es decir, una redundancia del 100%. El encendido y apagado de las bombas se da automáticamente en función de nivel del tanque de bombeo. La regulación del caudal de alimentación a cada reactor se realiza mediante la operación de las válvulas y se regula manualmente por el caudal de recirculación.

Foto 3-9: Recirculación y tanques de neutralización y bombeo (al fondo).



Fuente: Autor, durante visita

Reactores anaerobios

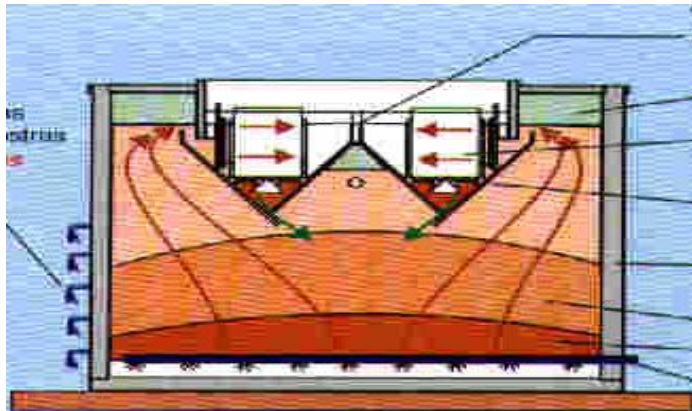
En esta unidad se dan las reacciones metano-génicas por medio de las cuales se transforma el ácido acético a metano y otros biogases. Los reactores anaerobios de la PTAR de Maltería Tropical son del tipo manto de lodos UASB.

El reactor está conformado por una serie de distribuidores en forma de “U” en tubería perforada, una campana de separación de biogás y un decantador de flujo cruzado, todo esto dentro de un mismo tanque. El funcionamiento, consiste en ingresar al reactor, por la parte inferior, las aguas previamente acidificadas y neutralizadas (pH entre 6,8 y 7,2), a través de los distribuidores en forma de “U” perforado. Las aguas distribuidas uniformemente atraviesan un manto de lodos, compuesto por una serie de microorganismos, principalmente acetogénicos y metanogénicos.

Cuando los lodos granulares, realizan la absorción de la materia orgánica y la transforman a metano (principalmente), estos se hinchan debido al biogás producido y normalmente son arrastrados por el agua, saliendo del manto de lodos. En su ascenso el agua y el lodo se encuentran con unas campanas en donde los microorganismos se estrellan con ella, produciendo una desgasificación del lodo (salida de biogás del microorganismo). El biogás por su bajo peso específico sube de inmediato a la superficie del tanque o a la parte superior de la campana, produciendo un colchón de biogás,

mientras el lodo recupera su peso específico decanta ingresando de nuevo al manto de lodos. Los gases se incineran mediante unas teas instaladas para tal fin. El siguiente es un esquema de un reactor anaerobio y se muestra fotografía de las teas.

Figura 3-13: Esquema de un reactor anaerobio



Fuente: Maltería

Foto 3-10: Panorámica Reactor 1 y 2. Detalle de recolección de gas en Reactor 1.



Fuente: Autor, durante la visita

Foto 3-11: Teas quemando gas generado en reactores.



Fuente: Autor, durante visita

Las aguas clarificadas se recolectan en unas canaletas que envían el agua hacia la columna selectora o la caja de salida de agua del reactor. Los parámetros de control de esta unidad son:

pH (6,8 a 7,6)

Carga típica 3900 Kg DQO/día en el sistema

Carga máxima de alimentación 4500 Kg DQO/día.

Relación de DQO/DBO₅ 1.4 a 1.7

SST en la entrada 500 mg/l

Caudal máximo de alimentación al sistema 85 m³/h con recirculación de agua tratada.

AGV menor a 100 mg/l.

Alcalinidad mayor a 500 mg/l

Esta etapa incluye los siguientes equipos:

Reactores anaerobios

Bombas de recirculación

Medidor de flujo

Interruptor de nivel

El agua clarificada se recoge en una canaleta con vertedero, de esta caja el agua se envía a descarga y una porción se recircula por medio de bombas destinadas para tal fin. Cada reactor cuenta con medidores de presión interna, cuando la presión es mayor a 40 mbar o cuando la presión es negativa, una válvula hidráulica pone el tanque a la atmósfera y evita algún colapso estructural.

Las dimensiones y los tiempos de retención (a caudal de trabajo y de diseño), para esta segunda etapa (acidificación, reactores anaerobios), se muestran a continuación.

Tabla 3-13: Dimensiones y tiempos de retención, para área de acidificación – reactores anaerobios.

	TANQUE ACIDIFICACIÓN	TANQUE NEUTRALIZACIÓN	TANQUE DE BOMBEO	REACTOR ANAERÓBIO 1	REACTOR ANAERÓBIO 2
DIMENSIONES	m				
Altura total	3,50	3,20	3,10	6,20	6,20
Altura operativa	3,40	3,10	3,00	6,00	6,00
Largo	8,75	1,75	2,40	14,00	6,00
Ancho	8,80	1,75	1,75	7,00	4,20
VOLUMENES	m ³				
Volumen total	269,5	9,8	13,0	607,6	156,2
Volumen operativo	261,8	9,5	12,6	588,0	151,2
CAUDALES	m ³ /h				
Caudal diseño	70	80	80	70	17
Caudal trabajo	60	70	70	60	15
TIEMPO DE RETENCIÓN	min				
A caudal diseño	231	7	10	521	551
A caudal trabajo	262	8	11	588	605

Esto indica que desde que el agua ingresa al tanque de acidificación hasta cuando sale de cada reactor, han transcurrido 14.5 horas a caudal de trabajo.

3.2.5 PTAR Bavaria Barranquilla

La planta de tratamiento de aguas residuales industriales está ubicada en un lote de la empresa, aledaño a sus instalaciones productivas, emplazado entre las carreras 38 y 41 y calles 8 y ribera occidental del caño de la Ahuyama, de la ciudad de Barranquilla (ver Figura 2.14, a continuación, tomada de Google Earth). Las coordenadas en donde se encuentra son:

Norte: 10° 58' 30.3"

Oeste: 74° 46' 12.3"

Altitud: 5 msnm

Figura 3-14: Localización del Sistema de tratamiento de aguas residuales



Fuente: Google earth

En la foto 3.12: se puede apreciar el sitio (único) de descarga del vertimiento al Caño de La Ahuyama y cuyas coordenadas fueron establecidas arriba, mediante un GPS Garmin, el día 6 de noviembre de 2012:

Foto 3-12.: Ubicación del emisario final de la PTAR y del sitio de vertimiento.



Fuente: Bavaria Barranquilla

▪ Componentes y Funcionamiento del Sistema de tratamiento

Para el tratamiento de los residuos líquidos producto de la actividad industrial de la planta, la Cervecería Águila cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales compuesta por:

Tratamiento primario: Remoción de carga orgánica (DBO_5 y DQO) gracias al trabajo de dos reactores anaerobios de flujo ascendentes y manto de lodo (denominados UASB – “UpFlow Anaerobic Sludge Blanket”), tipo UASB-PPS/CF diseñados por la firma Biotecs, cuya capacidad es de $252 \text{ m}^3/\text{h}$ (70 l/s).

Tratamiento secundario: Remoción de carga orgánica y de Nitrógeno total en un sistema biológico aerobio de lodos activados de una etapa, donde se elimina materia orgánica y se realiza la nitrificación y desnitrificación del agua en un cultivo suspendido pre-anóxico. En esta etapa también se remueve fósforo gracias a un proceso físico-químico de precipitación con alumbre. La capacidad de este sistema es de $180 \text{ m}^3/\text{h}$ (50 l/s).

Tratamiento Terciario: Remoción de sólidos suspendidos en un decantador circular y deshidratación de lodos. La capacidad de este sistema es de $252 \text{ m}^3/\text{h}$ (70 l/s).

En la siguiente página se muestra un diagrama de flujo, con la distribución de los equipos y tanques que componen el sistema de tratamiento de aguas residuales de la Cervecería Águila. En él se distinguen los siguientes elementos:

Sistema primario: pre-tratamiento

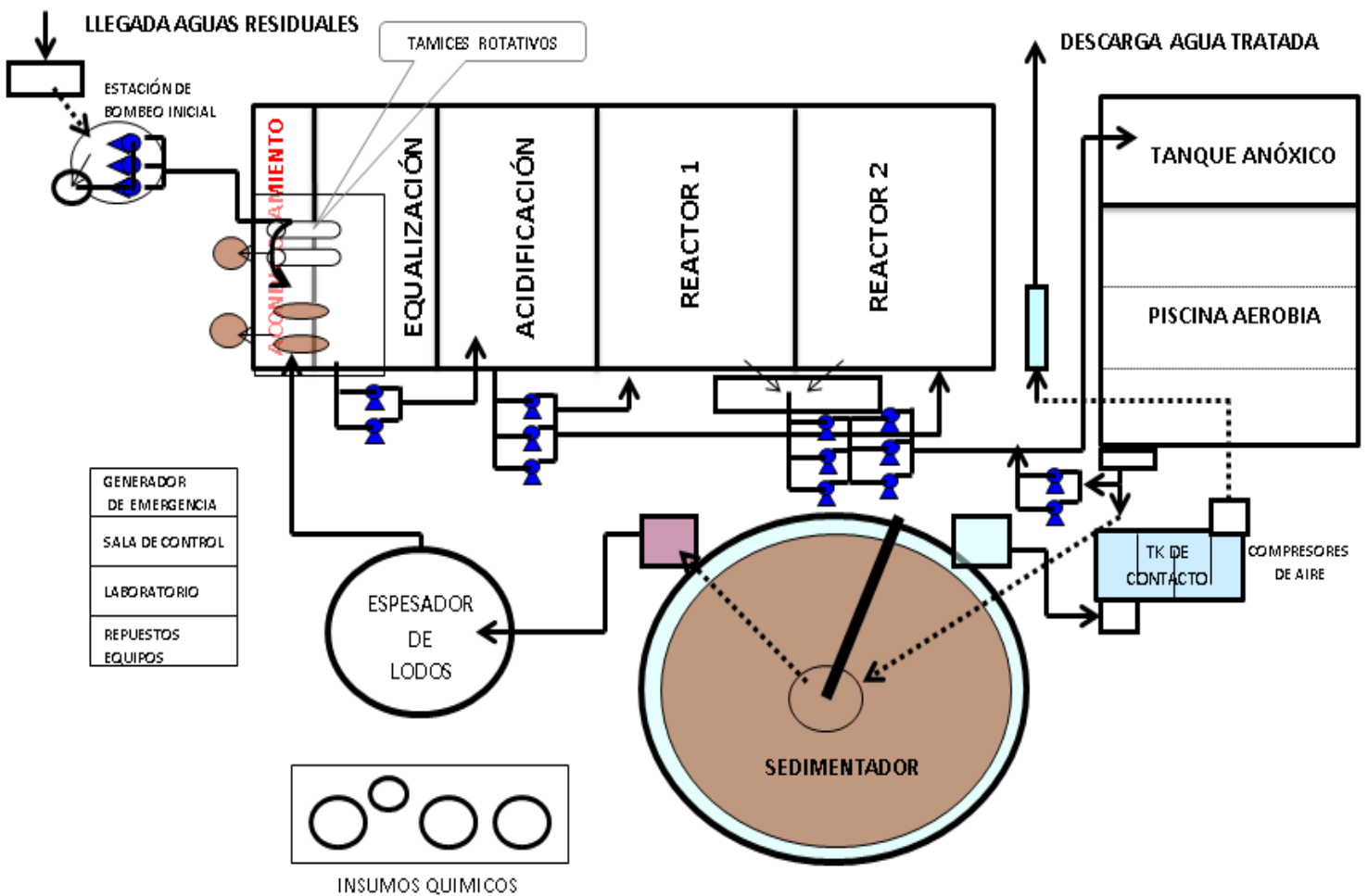
Estación de bombeo inicial

En esta unidad se reciben las aguas residuales de la fábrica y se impulsan a las unidades de tamizado, incluye los siguientes equipos:

- Separador de sólidos, Pozo de bombeo inicial, 3 Bombas, Medidor de caudal, Controlador de nivel E Interruptor de nivel

Las aguas residuales de la fábrica ingresan al pozo de bombeo por medio de una tubería de 14". En la entrada del pozo se encuentra un separador de sólidos tipo canastilla con barrotes y malla de orificio de 5 milímetros la cual retiene sólidos gruesos como vidrio, etiquetas, etc.

Figura 3.15: Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales usado



Fuente: Bavaria Barranquilla

Las aguas desbastadas son bombeadas a los tamices ubicados sobre el tanque de acondicionamiento. El sistema de bombeo opera en cascada, es decir, cuando el nivel en el pozo se encuentra en la mitad (LSM), se opera con una bomba, si el nivel llega a alto (LSH), se enciende la segunda bomba y si el nivel llega a bajo (LSL) se suspende el bombeo. Adicionalmente, el sistema electrónico permite rotar las bombas, para lograr que el tiempo de funcionamiento sea similar en las tres.

Tamices rotativos

Los tamices rotativos (2 en total) retiran sólidos de tamaño superior a 0,5 mm tales como cascarilla, arena, tierras diatomáceas, etc. El sistema está dimensionado para cubrir las necesidades con un solo tamiz, de tal forma que el otro permanece en Stad-By. Los sólidos se retiran por medio de una cuchilla raspadora y una banda transportadora, la cual los conduce a una tolva metálica para su almacenamiento. El agua que pasa por los tamices cae al tanque de acondicionamiento desde donde por gravedad se alimenta el tanque de neutralización. En caso de mantenimiento o falla de uno o ambos tamices, existe una válvula que permite alimentar el agua directamente al tanque de neutralización. A continuación se muestra un diagrama del sistema de bombeo inicial y tamizado, según lo muestra el sistema supervisor WANDERWARE.

Fotografía 3.13. Tamiz utilizado en las primeras etapas de tratamiento de las aguas residuales, en la Planta de Bavaria.



Fuente: Autor, durante visita

Tanque de neutralización o acondicionamiento

Esta unidad se diseñó con el propósito de dosificar y mezclar ácido clorhídrico cuando los valores de pH del vertimiento estuvieran por encima de 10.5, sin embargo, en razón a los “bajos” caudales de tratamiento actuales y al nivel de operación en los tanques ecualización y acidificación, sumado a la capacidad buffer que ha desarrollado el sistema, es posible (por experiencia de la planta) recibir descargas puntuales con pH superior a 11.0 sin que la etapa de acidificación se vea afectada. La unidad de acondicionamiento involucran los siguientes equipos:

- Tanque de acondicionamiento
- Tanque de desgasificación de vapores
- Bomba de transferencia de químicos
- Sensor de nivel ultrasónico
- Equipo controlador de pH

Las aguas tamizadas ingresan al tanque de neutralización por medio de un tubo sumergido y se conducen por un vertedero hacia el tanque de ecualización; a la salida existe una toma-muestra que monitorea el pH.

Tanque de ecualización

El objetivo de esta unidad es igualar los caudales y homogenizar el vertimiento, con el fin de minimizar las fluctuaciones de caudal, carga y pH que ingresan a las siguientes unidades de tratamiento, incluye los equipos:

- Tanque de ecualización
- Mezcladores sumergibles
- Controlador de Nivel

El agua (previamente acondicionada), ingresa al tanque de ecualización por la parte superior y sale por la parte inferior desde donde alimenta las bombas de envío a acidificación. El nivel de agua es una variable de proceso que puede oscilar entre 3,5 y 6.0 metros dependiendo del tiempo de retención que se desee mantener, es decir, el grado de reducción de pH que se desea obtener. Además, el sistema de control de nivel permite enclavar un lazo de control que enciende las bombas de transferencia del agua a acidificación y el encendido y apagado de los mezcladores sumergidos. El tanque cuenta con dos agitadores sumergidos encargados de garantizar la mezcla completa de las aguas y evitar decantación de sólidos.

Esto indica que desde que el agua ingresa al sistema de tratamiento hasta que sale del tanque de ecualización, han transcurrido cerca de nueve horas, a caudal de trabajo, o cuatro horas, a caudal máximo.

Sistema primario: acidificación y metanogénesis

Unidad de bombeo a acidificación

Esta unidad de bombeo puede enviar el agua a la unidad de acidificación e incluye los siguientes equipos:

- 2 Bombas centrífugas
- 4 Válvulas automáticas
- 1 Medidor de flujo
- 1 Controlador de nivel
- 1 Interruptor de nivel

Por medio de la CPU se puede fijar el caudal de entrada al tanque de acidificación y gracias a la acción sobre las válvulas automáticas de control se puede ajustar el caudal al valor deseado.

Tanque de acidificación

En esta unidad se dan las primeras fases del proceso biológico anaerobio, (hidrólisis, acidificación y parcialmente la acetogénesis), gracias al trabajo de microorganismos específicos. La hidrólisis se refiere al rompimiento de macromoléculas, la acidificación a la transformación a ácidos grasos y la acetogénesis a la transformación a ácido acético; estas reacciones se controlan por tiempo de residencia del agua (caudal de operación y nivel del tanque), el cual no debe ser inferior a 5-6 horas. Otros parámetros de control importantes son, AGV que indican la transformación de la materia orgánica a ácidos grasos (300-500 mg/l), pH (5,5 a 7.0) y la alcalinidad. Así pues, el objetivo de esta unidad es transformar la materia orgánica a ácidos grasos manteniendo un ambiente ligeramente ácido para la acción de los microorganismos evitando altos tiempos de residencia que incrementen los consumos de soda. Los equipos involucrados en esta operación son:

- Tanque de acidificación
- Mezcladores sumergibles
- Controlador de nivel
- Interruptor de nivel
- Controlador, medidor de temperatura

El agua ingresa por bombeo a la parte superior del tanque de acidificación y sale por la parte inferior (evitando flujos en contracorriente), dentro del tanque se encuentran instalados dos mezcladores sumergibles encargados de mezclar el agua con los microorganismos. Los agitadores trabajan en forma automática en función de un controlador de nivel que los apaga si el nivel es bajo. El tanque cuenta también con un medidor-indicador de temperatura cuya función es evitar el ingreso de vertimientos con

temperaturas superiores a 41° C, lo cual se logra mediante el apagado automático de las bombas de alimentación del reactor.

Bombeo a reactores anaerobios

Esta unidad envía el agua acidificada y neutralizada a los dos reactores anaerobios. El caudal máximo de alimentación a cada reactor es de 125 m³/h, con una DQO máxima 2.500 mg/l para una carga máxima de 7.500 Kg/día. La máxima concentración de SST es de 500 mg/l, el pH de alimentación debe ser entre 6,8 y 7,2 aunque actualmente, gracias al poder buffer y al alto tiempo de retención, se alimenta agua con pH hasta de 6.6. Los equipos involucrados son:

- Bombas de alimentación a los reactores
- Medidores de flujo
- Controladores de pH
- Válvulas automáticas
- Controlador de nivel

El sistema cuenta con tres bombas una para cada reactor y una en stand-by para ambos equipos, es decir, una redundancia del 50%. El encendido y apagado de las bombas se da automáticamente en función de nivel de cada reactor. La regulación del caudal de alimentación a cada reactor se realiza mediante la operación de las válvulas automáticas que abren o cierran en función de un set-point y la indicación de los controladores de caudal.

Cuando la temperatura del agua dentro del tanque de acidificación sobrepase los 41° C, las bombas se apagan.

Reactores anaerobios

En esta unidad se dan las reacciones metano-génicas por medio de las cuales se transforma el ácido acético a metano y otros biogases. Los reactores anaerobios de la PTAR de la Cervecería Águila son del tipo manto de lodos UASB modificado, patentado por BIOTECS.

El reactor está conformado por una serie de distribuidores en forma de “U” en tubería perforada, una campana de separación de biogás y un decantador de flujo cruzado, todo esto dentro de un mismo tanque. El funcionamiento, consiste en ingresar al reactor, por la parte inferior, las aguas previamente acidificadas y neutralizadas (pH entre 6,8 y 7,2), a través de los distribuidores en forma de “U” perforado. Las aguas distribuidas uniformemente atraviesan un manto de lodos, compuesto por una serie de microorganismos, principalmente acetogénicos y metanogénicos.

Cuando los lodos granulares, realizan la absorción de la materia orgánica y la transforman a metano (principalmente), estos se hinchan debido al biogás producido y normalmente son arrastrados por el agua, saliendo del manto de lodos. En su ascenso el agua y el lodo se encuentran con unas campanas en donde los microorganismos se estrellan con ella, produciendo una desgasificación del lodo (salida de biogás del microorganismo). El biogás por su bajo peso específico sube de inmediato a la superficie del tanque o a la parte superior de la campana, produciendo un colchón de biogás, mientras el lodo recupera su peso específico decanta ingresando de nuevo al manto de lodos. Los gases se incineran mediante unas teas instaladas para tal fin.

Foto 3-14. Teas quemando el gas metano generado en la operación



Fuente: Autor, durante la visita

Algunos microorganismos desgasificadores alcanzan a escapar con el agua hasta la parte superior, en donde en forma transversal al flujo de alimentación ingresan a un decantador de flujo cruzado, el cual tiene como función, separar por decantación los lodos del agua. Los lodos caen a una tolva troncocónica la cual interconecta su fondo con el manto de lodos. Las aguas clarificadas se recolectan en unas canaletas que envían el agua hacia la columna selectora o la caja de salida de agua del reactor. Los parámetros de control de esta unidad son:

- pH (6,8 a 7,6)
- Carga máxima 6,3 Kg DQO/m³/día por reactor
- Carga máxima de alimentación 313 Kg DQO/h y/o 7.500 Kg/día por reactor.
- Relación de DQO/DBO₅ 1.5 a 1.6
- SST en la entrada 500 mg/l
- Caudal máximo de alimentación 125 m³/h (por reactor) de efluente crudo y 190 m³/h con recirculación de agua tratada.
- AGV menor a 100 mg/l.

- Alcalinidad mayor a 500 mg/l

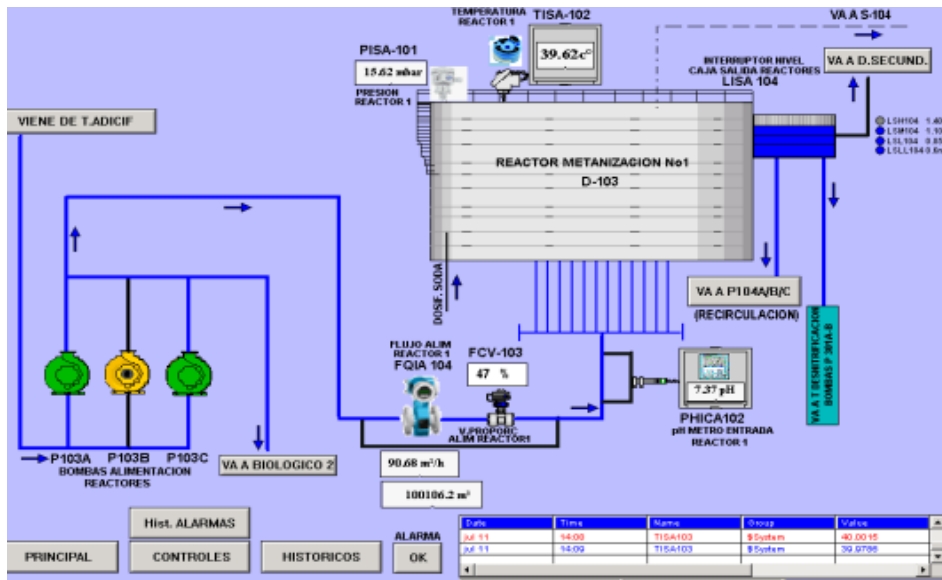
Esta etapa incluye los siguientes equipos:

- Reactores anaerobios
- Decantadores de flujo cruzado
- Bombas de recirculación
- Controlador de temperatura
- Controlador de presión
- Medidor de flujo
- Interruptor de nivel

Durante la operación se debe tener precaución con los incrementos de carga (deben ser graduales) y de no superar la carga máxima de 7.500 Kg/día de DQO ni la carga hidráulica de 125 m³/h. Cada Distribuidor en “U” posee dos válvulas, mientras una está abierta y la otra debe estar cerrada y cada 24 horas se rotan. El agua clarificada se recoge en una canaleta con vertedero, de esta caja el agua se envía al sistema de tratamiento secundario (aerobio) y una porción se recircula por medio de bombas destinadas para tal fin. Cada reactor cuenta con medidores de presión interna, cuando la presión es mayor a 40 mbar o cuando la presión es negativa, una válvula hidráulica pone el tanque a la atmósfera y evita algún colapso estructural. A continuación se muestra un diagrama de los reactores anaerobios según lo muestra el sistema supervisor Wanderware.

Las dimensiones y los tiempos de retención (a caudal de trabajo y de diseño), para esta segunda etapa del tratamiento primario (acidificación, reactores anaerobios), se muestran a continuación.

Figura 3-16. Diagrama de los reactores anaerobios según lo muestra el sistema supervisor Wanderware



Fuente: Bavaria Barranquilla

Tabla 3-14. Dimensiones y tiempos de retención, para esta segunda etapa del tratamiento primario.

TANQUE HIDRÓLISIS - ACIDIFICACION		REACTOR ANAEROBIO 1		REACTOR ANAEROBIO 2	
DIMENSIONES	m	DIMENSIONES	m	DIMENSIONES	m
Altura total	7,0	Altura total	6,5	Altura total	6,5
Altura operativa	4,9	Altura operativa	6,0	Altura operativa	6,0
Largo	22,0	Largo	22,0	Largo	22,0
Ancho	7,1	Ancho	9,0	Ancho	9,0
VOLUMENES	m ³	VOLUMENES	m ³	VOLUMENES	m ³
Volumen total	1.093	Volumen total	1.287	Volumen total	1.287
Volumen operativo	762	Volumen operativo	1.188	Volumen operativo	1.188
CAUDALES	m ³ /h	CAUDALES	m ³ /h	CAUDALES	m ³ /h
Caudal de diseño	250	Caudal de diseño	125	Caudal de diseño	125
Caudal de trabajo	110	Caudal de trabajo	50	Caudal de trabajo	60
TIEMPO DE RETENCION	min	TIEMPO DE RETENCION	min	TIEMPO DE RETENCION	min
A caudal máximo	183	A caudal máximo	570	A caudal máximo	570
A caudal de trabajo	416	A caudal de trabajo	1426	A caudal de trabajo	1188

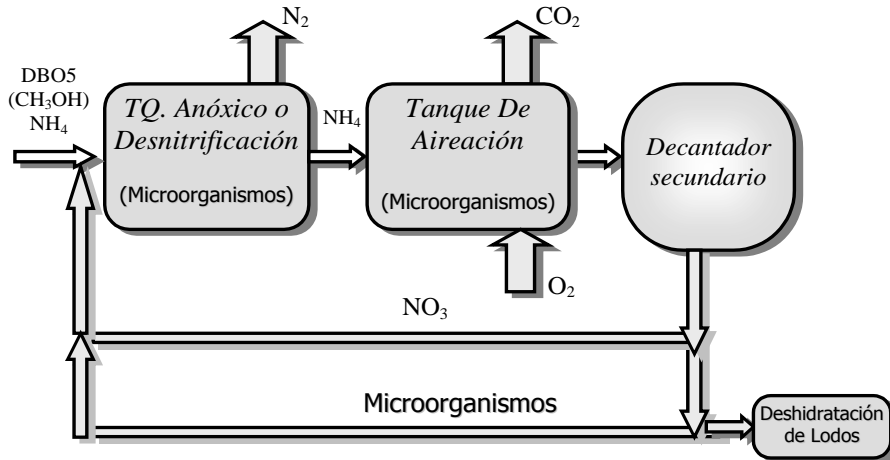
Fuente: Bavaria

Esto indica que desde que el agua ingresa al tanque de acidificación hasta cuando sale de cada reactor, han transcurrido 12.5 horas a caudal de trabajo que en últimas es el mismo caudal máximo, pues siempre se ajusta con agua recirculada. Este tiempo, sumado al tiempo del pre-tratamiento, da un total de 21.5 horas de retención en el tratamiento primario, a caudal de trabajo (110 m³/h).

Sistema secundario: remoción de nitrógeno

En el esquema siguiente se observa el desarrollo total de las remociones de materia orgánica y de nitrógeno logrados en el tratamiento secundario.

Figura 3.17: Esquema que indica la remoción de nitrógeno.



Fuente: Bavaria Barranquilla

Estación de bombeo inicial

En ésta unidad es envía el agua residual tratada por los reactores anaerobios hasta el tanque anóxico o de desnitrificación. Incluye los siguientes equipos:

- Caja de salida de los reactores
- Bombas
- Medidor de caudal
- Interruptor de nivel
- Canaleta Parshall de ingreso
- Tanque Anóxico

El agua resultante del tratamiento anaerobio se impulsa hacia el tanque anóxico gracias a la operación de bombas de $180 \text{ m}^3/\text{h}$ de capacidad. Dentro de la caja existe un vertedero, cuyo fin principal es desviar las aguas directamente al decantador secundario, cuando por razones de operación no se permita la alimentación al tratamiento secundario. Antes del ingreso del agua cruda al tanque anóxico, existe una mezcla con una porción del agua de salida del tratamiento aerobio con el fin de mantener la cantidad de lodo dentro del sistema, en la actualidad, se están recirculando $350 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua de salida, es decir, al sistema secundario o de pulimiento le están ingresando realmente: $(350+110) = 450 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua a caudal de trabajo.

Nitrificación / Desnitrificación

La nitrificación / desnitrificación es la eliminación de un porcentaje de la materia orgánica medida como DBO_5 y el Nitrógeno total. Los equipos incluidos son:

- Canaleta parshall
- Tanque Anóxico o de desnitrificación
- Tanque de aireación o nitrificación

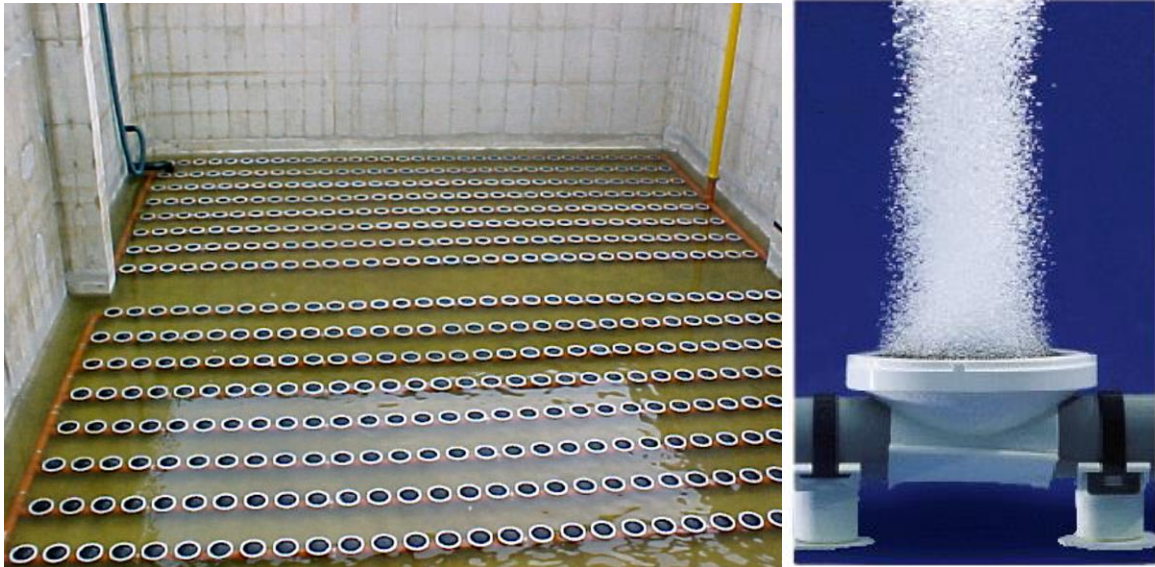
- Caja de salida agua de aireación
- Decantador secundario
- Pozo de bombeo de lodos
- Bomba de recirculación
- Bombas de recirculación a desnitrificación
- Bombas de recirculación de lodos
- Sopladores de aire
- Medidor de flujo lodos recirculados
- Medidor de Oxígeno
- Válvula automática
- Termostatos de sopladores
- Ventiladores de cabina insonora

Las aguas residuales ingresan al tanque anóxico a través de la canaleta parshall, allí, los nitratos presentes son despojados del oxígeno y se libera N_2 mientras que la materia orgánica y el nitrógeno amoniacal pasan por esta unidad sin tener ningún efecto e ingresan al tanque de aireación, en el TK de aireación toman lugar dos tipos de reacción:

- La materia orgánica carbonácea es consumida por una serie de microorganismos, los cuales la transforma en nuevas células (biomasa), CO_2 y agua
- El nitrógeno amoniacal, con ayuda de oxígeno, alcalinidad y microorganismos se transforma en nuevas células (biomasa), agua y nitratos, proceso llamado nitrificación.

Los microorganismos en este tanque son estrictamente aerobios por lo cual se requiere inyectar oxígeno, para ello se cuenta con un par de compresores o sopladores, una red de distribución de aire y una serie de difusores micro porosos ubicados en el fondo del tanque.

Foto 3.15: Sistema de aireación



Fuente: Bavaria Barranquilla

La inyección de aire garantiza una mezcla adecuada entre los microorganismos y el agua residual. El funcionamiento del soplador está controlado automáticamente por un lazo de control que los pone en marcha cuando el oxígeno disuelto está por debajo 1.5 ppm y lo apaga cuando llega a 2.8 ppm, también es posible operar los sopladores por medio de set-point de tiempo ON y tiempo OFF, en caso de tener inconvenientes con los sensores de oxígeno. Los compresores se encuentran encerrados en una cabina insonorizada por medio de la cual se control el nivel de ruido emitido.

En el tanque aerobio el nitrógeno amoniacal se transforma a nitrito y luego a nitrato: el efluente del tanque se conduce por un conducto sumergido a la caja de salida y de ahí, tiene dos caminos seleccionados, el primero es una recirculación hacia el tanque anóxico y la segunda es la conducción hacia el decantador secundario. La recirculación del licor mixto tiene como función eliminar el nitrógeno que ya no está en forma de amonio sino de nitrato.

Al llegar las aguas al tanque anóxico (bajo en oxígeno), por reacción con una fuente de carbono y a través de microorganismos de ambiente anóxico, los nitratos son transformados en nitrógeno gaseoso, logrando de esta manera la remoción del nitrógeno (desnitrificación).

Esto indica que en el sistema de tratamiento secundario, el agua toma 3.7 horas, a caudal máximo o 4.3, a caudal de trabajo.

Sistema secundario: remoción de fósforo

El objetivo de esta unidad es eliminar el fósforo por precipitación química con cloruro férrico o sulfato de aluminio. Los equipos involucrados son:

- Canaleta tanque de aireación
- Bomba dosificadora de Cloruro férrico ó sulfato de aluminio
- Tanque de almacenamiento de cloruro férrico o sulfato
- Sensor de nivel

Las aguas del tanque anóxico pasan por gravedad a través de una canaleta al tanque de aireación, en el punto de caída se dosifica una solución de cloruro férrico o de sulfato de aluminio, en el tanque de aireación, por medio de la agitación producida por las burbujas de aire, se logra una mezcla completa entre el producto químico y el agua, con el fin de separar los precipitados en el decantador.

Los lodos con el precipitado se disponen junto con los sólidos generados por el proceso biológico. La inyección de la solución se hace mediante la bomba dosificadora. El sistema de dosificación es automático y solamente el operario modifica el valor de la dosis a aplicar. En ensayo de determinación de la dosis se realiza en sitio sobre una muestra de agua tomada en la planta, buscando la dosis requerida para garantizar un fósforo máximo de 5 mg/l.

Sistema terciario

Decantador de sólidos

El objetivo de esta unidad es remover los lodos producidos en el tratamiento secundario y los sólidos que hayan podido pasar del tratamiento primario. Los equipos Involucrados en esta etapa son:

- Decantador secundario
- Puente barredor
- Bombas de extracción de lodos

El agua tratada resultante del tratamiento secundario se envía por gravedad a un decantador circular con puente barredor. El agua ingresa por el centro y sale a través de una canaleta perimetral exterior. Los lodos que se depositan en el fondo y los sólidos que se encuentran en la superficie del decantador, son removidos por un barredor que gira a razón de dos revoluciones por hora. El agua clarificada se recoge por una canaleta perimetral que la conduce a un pozo desde donde por gravedad se alimenta el tanque de contacto. Los lodos extraídos por el decantador son enviados al espesador de lodos por medio, de un sistema de bombeo.

Foto 3.16. Decantador de lodos



Fuente: Autor, durante visita

Del tanque de contacto se envía el agua por gravedad a la canaleta parshall de salida que a su vez conduce el agua hacia el emisario final (el caño la Ahuyama).

Las dimensiones y los tiempos de retención (a caudal de trabajo y de diseño), para el tratamiento terciario (decantación y desinfección), se muestran a continuación.

Tabla 3-15: Dimensiones y tiempos de retención, para el tratamiento terciario.

DECANTADOR	
DIMENSIONES	m
Altura cilíndrica	2,5
Altura del cono	2,0
Diámetro	10,0
VOLUMENES	m ³
Volumen total	990,0
CAUDALES	m ³ /h
Caudal de diseño	250
Caudal de trabajo	110
TIEMPO DE RETENCION	min
A caudal máximo	238
A caudal de trabajo	540

TANQUE DE CONTACTO	
DIMENSIONES	m
Altura total	1,8
Altura operativa	1,5
Largo	7,0
Ancho	4,0
VOLUMENES	m ³
Volumen total	50
Volumen operativo	42
CAUDALES	m ³ /h
Caudal de diseño	180
Caudal de trabajo	110
TIEMPO DE RETENCION	min
A caudal máximo	14
A caudal de trabajo	23

Esto indica que en el sistema de tratamiento terciario, el agua toma 4.2 horas, a caudal máximo o 9.4, a caudal de trabajo.

En resumen, los tiempos de residencia, bajos las condiciones actuales de operación (110 m³/h) y a caudal máximo de trabajo son:

Tabla 3-16: Tiempos de residencia, bajo las condiciones actuales de operación a caudal máximo de trabajo.

EQUIPO	Minutos	Horas	%	EQUIPO	Minutos	Horas	%
Bombeo inicial	24	0,4	1,0%	Bombeo inicial	11	0,2	0,8%
Acondicionamiento	136	2,3	5,8%	Acondicionamiento	60	1,0	4,1%
Ecuilización	378	6,3	16,1%	Ecuilización	167	2,8	11,4%
Acidificación	416	6,9	17,8%	Acidificación	183	3,1	12,5%
Reactor anaerobio	570	9,5	24,3%	Reactor anaerobio	570	9,5	38,9%
TK anóxico	74	1,2	3,2%	TK anóxico	64	1,1	4,4%
TK aireación	182	3,0	7,8%	TK aireación	158	2,6	10,8%
Decantador	540	9,0	23,0%	Decantador	238	4,0	16,2%
TK contacto	23	0,4	1,0%	TK contacto	14	0,2	1,0%
TOTAL TRATAMIENTO	2343	39,05		TOTAL TRATAMIENTO	1465	24,42	

3.3 Eficiencia de los sistemas de tratamiento

3.3.1 Datos de caracterización de las aguas residuales de las plantas seleccionadas.

- **PTAR Santa Rosa de Lima**

En el momento de la realización de la tesis el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Santa Rosa de Lima, tenía 1 mes de funcionamiento, por lo cual aún no existían caracterizaciones, debido a que el sistema todavía no se encontraba estabilizado.

- **PTAR Gran Central de Abastos**

Tabla 3-17: Caracterización correspondiente al año 2008

Parámetro	Concentración		Carga, Kg/día		%Rem	Norma ambiental
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
Caudal, L/s	3,76	3,76	3,76	3,76		-----
Temperatura, °C	28,2 – 30,5	29,2 – 30,9	28,2 – 30,5	29,2 – 30,9		<40°C
pH, unidades*	7,20 – 7,67	7,27 – 7,42	7,20 – 7,67	7,27 – 7,42		5 – 9 unid.
DBO ₅ , mg O ₂ /L	224,16	27,73	72,82	9,01	87,63%	Rem>80%
DQO, mg O ₂ /L	338,40	42,40	109,93	13,77	87,47%	-----
Sólidos suspendidos totales, mg/L	171,20	25,67	55,62	8,34	85,01%	Rem>80%
Grasas y/o aceites, mg/L	186,41	21,78	60,56	7,08	88,31%	Rem>80%

Tabla 3-18: Caracterización correspondiente al año 2010

Parámetro	Concentración		Carga, Kg/día		%Rem	Norma ambiental
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
Caudal, L/s	3,94	3,94	3,94	3,94		-----
Temperatura, °C	30,7 – 31,2	29,7 – 31,1	30,7 – 31,2	29,7 – 31,1		<40°C
pH, unidades*	6,37 – 7,45	6,34 – 7,88	6,37 – 7,45	6,34 – 7,88		5 – 9 unid.
DBO ₅ , mg O ₂ /L	257,6	48,80	87,61	16,60	81,06%	Rem>80%
DQO, mg O ₂ /L	375,8	74,40	127,81	25,30	80,20%	-----
Sólidos suspendidos totales, mg/L	601,0	19,60	204,41	6,67	96,74%	Rem>80%
Grasas y/o aceites, mg/L	170,2	30,40	57,89	10,34	82,14%	Rem>80%

Tabla 3-19: Caracterización correspondiente al año 2011

Parámetro	Concentración		Carga, Kg/día		%Rem	Norma ambiental
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
Caudal, L/s	2,29	2,29	2,29	2,29		-----
Temperatura, °C	28,4 – 31,9	28,7 – 34,4	28,4 – 31,9	28,7 – 34,4		<40°C
pH, unidades*	6,93 – 7,62	6,76 – 7,24	6,93 – 7,62	6,76 – 7,24		5 – 9 unid.
DBO ₅ , mg O ₂ /L	313,60	21,80	61,93	4,30	93,05%	Rem>80%
DQO, mg O ₂ /L	480,00	32,00	94,78	6,32	93,33%	-----
Sólidos suspendidos totales, mg/L	154,80	<25	30,57	4,94	83,85%	Rem>80%
Grasas y/o aceites, mg/L	151,20	<20	29,86	3,95	86,77%	Rem>80%

Tabla 3-19: Caracterización correspondiente al año 2013

Parámetro	Concentración		Carga, Kg/día		%Rem	Norma ambiental
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
Caudal, L/s	2,35	2,35	2,35	2,35		-----
Temperatura, °C		30,0 -31,4		30,0 -31,4		<40°C
pH, unidades*		7,23 – 7,56		7,23 – 7,56		5 – 9 unid.
DBO ₅ , mg O ₂ /L	156	31,2	31,73	6,3	80%	Rem>80%
DQO, mg O ₂ /L	307	61	62,44	12,5	80%	-----
Sólidos suspendidos totales, mg/L	131	<25	26,64	5,1	80,9%	Rem>80%
Grasas y/o aceites, mg/L	146	29	29,69	5,9	80,13%	Rem>80%

▪ PTAR Maltería Cartagena

Tabla. 3-21: Caracterizaciones DBO, PTAR Maltería tropical S.A., desde 2002 hasta 2013

FECHA	AÑO	LABORATORIO	DBO (mg/Lt)		
			ENTRADA	SALIDA	% REMOCION
22-26 ABR/02	2002	SGS	2460	135	94,51
29JULIO-2 AGO/02	2002	SGS	2453,4	137	94,41
29JULIO-2 AGO/02	2002	CARDIQUE	2681	184	93,14
25-29 NOV/02	2002	SGS	2388	122	94,91
10-14 MAR/03	2003	SGS	2496	122	95,1
24-28 JUNIO/03	2003	SGS	1446	194	86,57
24-28 JUNIO/03	2003	CARDIQUE	4850	181	96,27
6-10 OCT/03	2003	SGS	2060	190	90,78
1-6 DIC /03	2003	SGS	1248	185	85,18
1-6 DIC /03	2003	CARDIQUE	3640	508	86,04
12-16 ABR/04	2004	SGS	2700	266	90,16
12-16 JUL/04	2004	SGS	2034	196	90,38
12-16 JUL/04	2004	CARDIQUE	4540	148	96,74
25-29 OCT/04	2004	SGS	2460	163	93,37
6-13 DIC /04	2004	SGS	4131	167	95,98
6-13 DIC /04	2004	CARDIQUE	5160	162	96,86
10-14 MAY/05	2005	SGS	3150	92	97,07
8-12 AGO/05	2005	SGS	1800	104	94,23
24-28 OCT/05	2005	SGS	2020	125	94,34
19-23 DIC /05	2005	SGS	2220	131	94,11
27 JUN-01 JUL/06	2006	SGS	2040	150	92,66
30 MAY-5JUN/07	2007	SGS	1872	123	93,41
30 MAY-5JUN/07	2007	CARDIQUE	3050	580	80,98
8-12 OCTUBRE/2007	2007	SGS	2445	123	94,98
8-12 OCTUBRE/2007	2007	CARDIQUE	2238	210	90,64
7-11 ABRIL/2008	2008	CARDIQUE	3950	315	92,03
7-11 ABRIL/2008	2008	SGS	4050	648	84,00
19-23 DICIEMBRE/2008	2008	SGS	1632	245	84,96
20-24 ABRIL/2009	2009	CARDIQUE	2857	305	89,32
27-30 OCT.-3 NOV./2009	2009	CARDIQUE	2661	138	94,81

28-30 ABRIL 3-4 MAYO	2010	CARDIQUE	4280	144	96,64
16-20 NOV 2010	2010	SGS	1356	124	90,86
20-24 junio 2011	2011	SGS	2675	488	81,74
05-12 DIC 2011	2011	CARDIQUE	2023	178	91,20
25 y 28-31 MAY 2012	2012	CARDIQUE	2443	166	93,21
03-07 DIC 2012	2012	CARDIQUE	2036	154	92,44
04-07 JUN Y 12 JUN 2013	2013	CARDIQUE	2435	173	92,88

Tabla 3-22: Caracterización de SST, PTAR Maltería tropical S.A., desde 2002 hasta 2013

FECHA	AÑO	LABORATORIO	SST (mg/Lt)		
			ENTRADA	SALIDA	% REMOCION
22-26 ABR/02	2002	SGS	2207	238	89,21
29JULIO-2 AGO/02	2002	SGS	2078,8	284,2	86,33
29JULIO-2 AGO/02	2002	CARDIQUE	1892	232,8	87,70
25-29 NOV/02	2002	SGS	2055	237	88,47
10-14 MAR/03	2003	SGS	1803	242	86,58
24-28 JUNIO/03	2003	SGS	2000	290	85,5
24-28 JUNIO/03	2003	CARDIQUE	528,7	320,6	95,69
6-10 OCT/03	2003	SGS	1969	234	88,12
1-6 DIC /03	2003	SGS	2271	264	88,37
1-6 DIC /03	2003	CARDIQUE	1305,8	250	80,85
12-16 ABR/04	2004	SGS	2166	115	94,67
12-16 JUL/04	2004	SGS	2515	122	95,15
12-16 JUL/04	2004	CARDIQUE	1564	78,6	94,97
25-29 OCT/04	2004	SGS	2158	199	90,81
6-13 DIC /04	2004	SGS	1950	214	89,04
6-13 DIC /04	2004	CARDIQUE	1550,6	337,5	78,23
10-14 MAY/05	2005	SGS	2140	227	89,4
8-12 AGO/05	2005	SGS	976	102	89,6
24-28 OCT/05	2005	SGS	2001	141	92,95
19-23 DIC /05	2005	SGS	1377	131	90,49
27 JUN-01 JUL/06	2006	SGS	3321	143	95,69
30 MAY-5JUN/07	2007	SGS	2378	144	93,94
30 MAY-5JUN/07	2007	CARDIQUE	360	189,83	47,27
8-12 OCTUBRE/2007	2007	SGS	4254	303	92,88
8-12 OCTUBRE/2007	2007	CARDIQUE	686,32	324,98	52,65
7-11 ABRIL/2008	2008	CARDIQUE	1132,34	389,28	65,62
7-11 ABRIL/2008	2008	SGS	465	150	67,74
19-23 DICIEMBRE/2008	2008	SGS	3820	440	88,48
20-24 ABRIL/2009	2009	CARDIQUE	1399,72	218,27	84,41
27-30 OCT.-3 NOV./2009	2009	CARDIQUE	847,2	104	87,72
28-30 ABRIL 3-4 MAYO	2010	CARDIQUE	1415,84	231,5	83,65
16-20 NOV 2010	2010	SGS	548,77	84,42	84,62
20-24 junio 2011	2011	SGS	1693,9	213,27	87,41
05-12 DIC 2011	2011	CARDIQUE	1258	178,8	85,79
25 y 28-31 MAY 2012	2012	CARDIQUE	1098	125	88,64

03-07 DIC 2012	2012	CARDIQUE	1130	213	81,17
04-07 JUN Y 12 JUN 2013	2013	CARDIQUE	1905	194	89,80

Datos de operación actuales

Tabla: Registro de operación PTAR Maltería enero – agosto 2013

MUESTRA	VARIABLE	ESPECIFICACION	RESULTADOS ENERO - AGOSTO 2013								
			ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	
CAUDAL TRATADO (m3/mes)			28.655	26.282	26.773	32.448	28.835	28.279	33.656	30.797	
DESCARGA DE TINA	DQO	No se especifica	3.470	3.300	3.350	3.300	3.350,00	3.360,00	3.320,00	3.550,00	
	pH		6,45	6,30	6,15	6,4	6,20	6,40	6,30	6,40	
	AGV / ALC		1,09	1,12	0,97	0,8	1,03	1,12	1,05	1,10	
	SST		470	485	360	430	320,00	392,75	425,00	296,67	
	DBO ₅		1.900	1.920	1.250	1.700	1.250,00	2.435,00	1.300,00	1.350,00	
	NITRÓGENO TOTAL			82,10	65			18,80	#DIV/0!	#DIV/0!	
	FÓSFORO TOTAL			23			29	29,00	53,00	#DIV/0!	#DIV/0!
	GRASAS Y ACEITES			N.D.	N.D.	N.D.	8	7,75	N.D.	N.D.	N.D.
ENTRADA TAMICES	DQO	No se especifica	2.820	2.850	2.500	2.150	2.300,00	2.350,00	2.400,00	2.260,00	
	pH		5,75	5,45	6	6	5,50	5,90	5,80	5,50	
ACIDIFICACIÓN	DQO	No se especifica	2.300	2.150	2.150	2.000	2.055,00	2.180,00	2.180,00	1.850,00	
	pH		5,82	5,55	5,80	5,9	5,70	5,80	5,50	5,60	
	AGV / ALC		1,24	1,24	1,14	1,1	1,18	0,98	0,97	1,10	
ENTRADA REACTORES	pH	6,7 a 7,2	6,90	6,85	6,90	6,9	6,90	6,90	6,90	6,90	
	DQO	1500 a 2500 mg/l	1.650	1.720	1.450	1.450	1.650,00	1.750,00	1.610,00	1.655,00	
SALIDA REACTOR 1	SÓLIDOS SEDIMENTABLES	< 4,0 ml/l	0,48	0,45	0,45	0,5	0,49	0,48	0,49	0,49	
	CAUDAL DE SALIDA	< 54 m ³ /h	30	30	30	28	35,41	28,07	33,80	31,70	
	AGV / ALC	< 0,1	0,09	0,09	0,09	0,1	0,09	0,09	0,09	0,09	
	pH	6,7 a 7,2	7,10	7,15	7,10	7,2	7,10	7,10	7,20	7,15	
	DQO	< 700 mg/l	580	560	530	510	525	590,00	560,00	543,00	
	SST	< 600 mg/l	60	60	140	185	161,25	194,00	146,38	101,67	
	DBO ₅	< 250 mg/l	160	135	105	215	130,00	173,40	123,33	65,00	
	NITRÓGENO TOTAL	No se especifica		56	38,40			57,38	#DIV/0!	#DIV/0!	
	FÓSFORO TOTAL	No se especifica	20,00			20	20,00	46,60	#DIV/0!	#DIV/0!	
	GRASAS Y ACEITES	< 15 mg/l	N.D.	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D.	N.D	N.D	
SALIDA REACTOR 2	CAUDAL DE SALIDA	< 54 m ³ /h	12,62	12,62	12,62	13	12,65	12,62	11,82	9,69	
	AGV / ALC	< 0,1	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	
	pH	6,7 a 7,2	7	7	7,05	7,0	7,04	7,10	7,20	7,20	
	DQO	< 700 mg/l	525	525	525,00	450	510,00	580,00	540,00	540,00	
	DBO ₅	< 250 mg/l	120	135	105,00	130	130,00	173,40	125,00	65,00	
			0,70	0,70	0,71	0,68	0,74	0,69	0,74	0,77	
			0,30	0,30	0,29	0,32	0,26	0,31	0,26	0,23	
UNITARIO DQO REACTOR 1	No se especifica	1,00	0,97	1,14	0,51	0,97	0,37	1,22	1,13		
KG DQO REACTOR 2/TON MALTA	No se especifica	0,29	0,25	0,30	0,40	0,34	0,35	0,40	0,34		
UNITARIO DBO₅ REACTOR 1/TON MALTA	No se especifica	0,28	0,23	0,21	0,54	0,24	0,31	0,27	0,13		
KG DBO₅ REACTOR 2/TON MALTA	No se especifica	0,07	0,07	0,06	0,10	0,09	0,12	0,09	0,04		
UNITARIO SÓLIDOS REACTOR 1/TON MALTA	No se especifica	0,14	0,13	0,16	0,51	0,40	0,49	0,38	0,28		
% REMOCION SÓLIDOS SISTEMA	No se especifica	96,66%	95,71%	95,42%	87,79%	88,77%	86,73%	90,98%	92,66%		

Fuente: Maltería, Cartagena

Tabla Condiciones de carga y producción de biogás PTAR Maltería enero – agosto 2014

		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Promedio
Carga total entrada	kg DQO	80807	74904	66933	69763	66321	66456	80774	69601	71945
Días de trabajo		23	22	19	22	21	21	24	21	22
Carga entrada R1	kg DQO	56778	52701	47294	47388	48864	45846	59853	53307	51504
Carga salida R1	kg DQO	11678	10355	10026	11241	11154	11510	13966	12808	11592
VolReactor1 m3	711	96	89	80	80	82	77	101	90	87
Carga	kg DQO/m3/d	4,2	4,0	4,1	3,7	3,9	3,6	4,2	4,2	4,0
Caudal tratado	m3/d	872	823	973	1008	999	918	1026	1110	966
	m3/h	36	34	41	42	42	38	43	46	40
TRH	h	19,6	20,7	17,5	16,9	17,1	18,6	16,6	15,4	18
Remoción DQO	% Carga	79%	80%	79%	76%	77%	75%	77%	76%	77%
Prod. Metano	m3/d	441,4	418,9	421,3	397,1	464,5	412,1	460,3	432,4	431
Carga entrada R2	kg DQO	24029	22203	19638	22375	17457	20609	20921	16295	20441
Carga salida R2	kg DQO	4474	4090	4124	4683	3871	5087	4707	3893	4366
VolReactor2 m3	150	192,23	177,62	157,11	179,00	139,66	164,88	167,37	130,36	164
Carga	kg DQO/m3/d	8,3	7,9	8,1	8,2	6,6	7,8	6,9	6,1	7,5
Caudal tratado	m3/d	369	347	404	476	357	413	359	339	383
	m3/h	15	14	17	20	15	17	15	14	16
TRH	h	9,8	10,4	8,9	7,6	10,1	8,7	10,0	10,6	10
Remoción DQO	% Carga	81%	82%	79%	79%	78%	75%	78%	76%	78%
Prod. Metano	m3/d	186,8	176,5	174,9	187,5	165,9	185,3	160,9	132,2	171
Caudal Total Tratado	m3/d	1241	1169	1377	1484	1356	1330	1385	1449	1349
Carga total salida	kg DQO	16151	14445	14150	15924	15025	16597	18673	16701	15958
Carga total removida	kg DQO	64656	60458	52782	53839	51296	49859	62101	52900	55986
		19397	18138	15835	16152	15389	14958	18630	15870	16796
Remoción Total DQO	% Carga	80%	81%	79%	77%	77%	75%	77%	76%	78%
Producción Biogás	m3	14503	13381	11592	12784	13402	12700	15091	12003	
	kg	16679	15388	13331	14702	15412	14605	17355	13804	
Metano (CH₄)	m3	9717	8965	7767	8566	8979	8509	10111	8042	

Fuente: Maltería, Cartagena

▪ **PTAR Bavaria Barranquilla**

Tabla 3-23. Caracterización correspondiente al año 2004

Parámetro	Concentración		Carga, Kg/día		%Rem	Norma ambiental
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
Caudal, L/s	32,02	42,24	32,02	42,24		-----
Temperatura, °C	35,7-42,2	31,9-39,2	35,7-42,2	31,9-39,2		<40°C
pH, unidades*	9,80-12,08	6,83-7,66	9,80-12,08	6,83-7,66		5 – 9 unid.
DBO ₅ , mg O ₂ /L	2191,35	177,3	6034,54	644,13	89,33%	Rem>80%
DQO, mg O ₂ /L	3303,5	281,8	9097,18	1023,82	88,75%	-----
Sólidos suspendidos totales, mg/L	348	43,5	958,32	157,89	83,52%	Rem>80%

La planta de tratamiento de aguas residuales industriales de la planta Bavaria S.A., Barranquilla, hasta el 2004 contaba solo con tratamiento primario y con los reactores

UASB, en la tabla 3-21, se observan valores de remoción por encima del 80%, valor exigido por la normatividad colombiana vigente.

A partir del 2005, se incorporó a la planta de tratamiento un equipo de aireación con el fin de remover nitrógeno. Con este proceso se logró aumentar el porcentaje de remoción de los parámetros sujetos a la regulación ambiental. Sin embargo, como se puede observar en la caracterización del 2004, los reactores UASB contaban con porcentajes de remoción por encima del 80%, lo cual de por sí equivale a un tratamiento secundario.

Tabla 3-24: Caracterización correspondiente al año 2011

Parámetro	Concentración		Carga, Kg/día		%Rem	Norma ambiental
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
Caudal, L/s	27,91	29,91	27,91	29,91		-----
Temperatura, °C	29-42,7	31,10-36,80	29-42,7	31,10-36,80		<40°C
pH, unidades*	8,69-12,47	6,76- 8,15	8,69-12,47	6,76- 8,15		5 – 9 unid.
DBO ₅ , mg O ₂ /L	1853	49,85	4467,93	125,84	97,18%	Rem>80%
DQO, mg O ₂ /L	3362	88,1	8106,4	222,4	97,26%	-----
Sólidos suspendidos totales, mg/L	10193,5	29,2	24578,4	73,71	99,7%	Rem>80%
Grasas y/o aceites, mg/L	1081	20	2606,5	50,49	98,06%	Rem>80%

Tabla 3-25: Caracterización correspondiente al año 2013

Parámetro	Concentración		Carga, Kg/día		%Rem	Norma ambiental
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
Caudal, L/s	16,9	17,8	16,9	17,8		-----
Temperatura, °C	33,7 – 41,8	32,7 – 37,6	33,7 – 41,8	32,7 – 37,6		<40°C
pH, unidades*	6,74- 12,10	7,51-8,28	6,74- 12,10	7,51-8,28		5 – 9 unid.
DBO ₅ , mg O ₂ /L	1488,2	67,8	1084,85	51,99	95,21%	Rem>80%
DQO, mg O ₂ /L	3582,4	164	2611,5	125,84	95,18%	-----
Sólidos suspendidos totales, mg/L	561,1	83,7	408,91	64,25	84,29%	Rem>80%
Grasas y/o aceites, mg/L	1201,3	20,3	875,7	15,6	98,22%	Rem>80%

▪ **PTAR Postobón Malambo**

En el momento de la realización de la tesis el sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa Postobón, tenía (dos) 2 meses de funcionamiento, por lo cual aún no se disponía de datos de operación.

▪ **PTAR Relleno Palangana Santa Marta**

Al momento de llevar a cabo la revisión documental las caracterizaciones que reposaban en los expedientes de la Autoridad ambiental competente Corpamag, se encontraban incompletos. Se manifestó por parte del funcionario del área de archivo de los expedientes que parte del material de las caracterizaciones reposa en manos del funcionario que le realiza seguimiento y control al relleno sanitario. En las visitas a esa entidad no fue posible hacer contacto con el funcionario encargado para que facilitara la información correspondiente a las caracterizaciones de los lixiviados tratados y

generados por el relleno sanitario La Palangana. Por esa razón, no se pudo disponer de los datos necesarios para la evaluación de esta planta.

Sin embargo posteriormente fue suministrada información por parte de la empresa consultora contratada para llevar a cabo el arranque de la PTAR.

Piscina No. 1 Lixiviado		Piscina 2. Lixiviado
Fecha: 22-04-2009		
pH, Unidades	8,18	8,32
DBO ₅ , mg/L	153,7	200
DQO, mg/L	6666	5333
Sulfatos, mg/L	2030	1770
Sólidos Disueltos Totales, mg/L	14370	13245
Alcalinidad, mg/L	7904	5434
Nitrógeno amoniacal, mg/L	803,9	254,7
Hierro Total, mg/L	5,44	5,01
Conductividad, μ S/cm	19684	18144
Grasas y Aceites, mg/L	61	27
Fenoles totales, mg/L	<0,001	<0,0001
Plomo, mg/L	0,67	0,66
Cadmio, mg/L	<0,039	<0,039
Cromo, mg/L	<0,035	<0,035
Mercurio, mg/L	<0,0015	0,0022
Niquel, mg/L	0,97	0,93
Zinc, mg/L	0,54	0,23
Cobre, mg/L	<0,035	0,37
Sólidos Totales, mg/L	15725	14190
Tensoactivos	1,59	1,91
Oxígeno disuelto	0,16	0,12
Coliformes Totales, NMP/100ml	35*10 ²	17*10 ²
Coliformes Fecales, NMP/100ml	35*10 ²	17*10 ²

4 Análisis y discusión de resultados

4.1 Criterios y parámetros de diseño

4.1.1 Plantas de Aguas Residuales domésticas

La aplicación de la tecnología anaerobia para el tratamiento de las aguas residuales municipales ha sido exitosa en diferentes lugares del país y de la región, tal como se mencionó en capítulo 3. Sin embargo, existen reservas en torno a los criterios de diseño aplicados en el corregimiento de Santa Rosa de Lima. Si bien la solución propuesta para los habitantes que no pueden conectarse al sistema de alcantarillado (STII) es adecuada para tratamientos puntuales, individuales, hay que tener en cuenta las dificultades que supone la labor de limpieza y mantenimiento de esos tanques, especialmente cuando las viviendas se encuentran adyacentes unas de otras y no debidamente aisladas.

En cuanto al sistema de tratamiento del corregimiento de Santa Rosa de Lima, se puede deducir que este reactor de acuerdo a la información suministrada se encuentra operando con un caudal de 1,15 L/s, lo que representa un caudal de 4,14 m³/h, obteniendo así, de acuerdo a la formula:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{\frac{4,14m^3}{h}}{11,64m^2} = \frac{0,36m}{h}$$

$$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{35,38m^3}{4,14 m^3/h} = 8,54 \text{ horas}$$

Si bien es cierto la velocidad ascensional está por debajo de $V_{asc}=1$, que es la recomendada para evitar el arrastre del lodos con el efluente, este valor es muy bajo, y no permite la expansión del lodo, lo cual interfiere con la adecuada mezcla entre el sustrato y los microorganismos presentes en los granulos del lodo, así mismo se puede generar, lo que ocurre con las aguas residuales domésticas o municipales, particularmente en aquellos sistemas anaerobios de primera generación (tanques sépticos, tanques imhoff, lagunas anaerobias) donde el efluente usualmente arrastra compuestos intermedios que no han pasado adecuadamente por la fase de metanización.

Dado que el sistema cuenta con un Filtro Anaerobio seguido del reactor UASB, en este sistema se puede estar llevando a cabo el proceso de metanización que no se completó en el reactor UASB, dado que parte del lodo que puede ser arrastrado queda atrapado en el filtro, comportándose el sistema de reactor UASB y Filtro Anaerobio como un híbrido y no como dos sistemas separados.

Por otra parte, el TRH promedio del reactor es muy bajo, para el caudal diseñado de 3,02 L/s y por lo tanto se puede presentar un excesivo arrastre de sólidos operando con caudal pico, esto también conduciría a una rápida obstrucción del filtro.

La utilización de tuberías perforadas (tipo flauta) para la alimentación del reactor no es una buena alternativa porque las aguas residuales domésticas, aún con rejillas de cribado fino, acarrearán materiales que terminan obstruyendo esos orificios y con el tiempo la distribución del flujo deja de ser homogénea. Este tipo de dispositivos es apropiado cuando el desecho líquido es predominantemente soluble, típico de algunos procesos industriales más no de aguas de origen doméstico. Para este caso, el dispositivo resulta totalmente inapropiado.

Sobre la planta de tratamiento de aguas residuales de Granabastos, en Soledad Atlántico, no se tiene información sobre las características y parámetros de diseño. Por esa razón no se dispone de elementos de juicio que permitan evaluar los criterios empleados para el dimensionamiento de los componentes de la PTAR.

4.1.2 Planta de Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario La Palangana

Esta planta cuenta con un desarenador, supuestamente para remover material suspendido presente en el lixiviado. En realidad, la composición de los lixiviados, en general, muestra que los sólidos predominantes son corresponden a material soluble lo cual no justifica la incorporación de este tipo de estructuras. Se supone que las lagunas de almacenamiento y regulación del flujo de lixiviados cumplen con la función de retener sólidos que puedan sedimentar bajo condiciones especiales. En esencia, el lixiviado es un líquido filtrado que no debe arrastrar arenas y por lo tanto dicha estructura resulta inoficiosa.

De acuerdo con información suministrada por el ingeniero Julio Vega, consultor que fue contratado para el arranque y puesta en marcha de la planta de tratamiento del sistema de tratamiento, manifiesta, con respecto al filtro anaerobio que esta unidad tuvo rendimientos similares al reactor, lo cual permitió que la eficiencia global del tratamiento biológico alcanzara niveles del 60 %, se evidenció una ventaja al tener el sistema acoplado de filtro acoplado y UASB, que esta unidad permitió retener el lodo que se estaba escapando del reactor por arrastre; dado que el lodo quedaba retenido en el filtro se podría presentar que se arrastraban compuestos intermedios como ácidos grasos, que finalmente se degradaban en el filtro. El arranque se llevó a cabo en discontinuo con tiempos de retención de 48 horas.

El reactor no cuenta con un sistema para monitorear la producción de biomasa; es decir que no se puede hacer perfil de lodos.

Los tubos de recolección de efluente no quedaron alineados en el momento de la construcción, lo que no permite una recolección uniforme del efluente en la sección transversal de flujo en el reactor. **De igual forma hace que se presente zonas muertas al interior del reactor.**

El reactor no cuenta con un sistema apropiado para recolección de gases, esto hace que no se pueda estimar de manera adecuada la cantidad del biogás generado y no se pueda identificar si el sistema esta funcionando de manera adecuada.

De igual manera se informó por parte del consultor, que hace 2 meses, se encontró, la PTAR descuidada pareciera que han perdido lodo en el UASB, y también se observó que compraron y montaron una nueva planta de tratamiento que la acoplaron a los reactores biológicos. Actualmente la planta está operando en discontinuo.

La nueva planta comprada está compuesta por filtración por membrana (osmosis inversa), adsorción (carbon activado), desinfección UV, entre otros procesos; con lo cual están obteniendo un efluente de muy buena calidad.

De acuerdo con **NOEGGERATH FRANCO INGRID MELISSA y SALINAS CASTILLO MAYRA ALEJANDRA⁴**, algunos de los investigadores que han trabajado con sistemas de tratamiento anaerobio para tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios coinciden en haber observado una acumulación de material inorgánico (precipitado) dentro del reactor y en los lodos del sistema. La acumulación de precipitados inertes dentro del reactor provoca incrustaciones que reducen el volumen efectivo del reactor, limitan la actividad microbiana de los lodos, y taponan los sistemas de tuberías de los reactores derivando en un colapso del sistema de tratamiento. Esto, desde luego tiene implicaciones no solo en materia de costos sino también en la operación y mantenimiento de las instalaciones.

Con base en estas experiencias han surgido recomendaciones en el sentido de incorporar pretratamientos que minimicen este tipo de problemas y/o también trabajar con diseños de reactores anaerobios que puedan soportar éstos fenómenos. Igualmente, se considera que las variaciones en caudales y cargas orgánicas pueden desestabilizar el proceso y por ello conviene contemplar la posibilidad de implementar procesos de homogenización.

En cuanto al tratamiento fisicoquímico es probable que se logre una remoción en metales pesados y algunos otros contaminantes asociados a la DQO refractaria que por diversas razones no se pudo eliminar en el proceso anaerobio.

⁴NOEGGERATH FRANCO INGRID MELISSA y SALINAS CASTILLO MAYRA ALEJANDRA(2011). Análisis comparativo de tecnologías para el tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios. Universidad Veracruzana. Tesis Ingeniería Ambiental.

4.1.3 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

Las instalaciones construidas tanto para la industria de alimentos como Maltería y la Cervecería son muy similares en cuanto a estructuras y procesos. La separación de fases (acidificación-metanización) es un común denominador en estas plantas tipo Paquete, construidas generalmente en la modalidad "llave en Mano". En general son sistemas patentados y comercializados por firmas internacionales con experiencia en diversos países del mundo. Eso no quiere decir que no puedan presentar deficiencias en el diseño, construcción u operación. Por lo regular estas empresas se cuidan de garantizar las eficiencias de remoción para las instalaciones que proveen y los procesos de arranque se efectúan con lodo de tipo granular (importado). Plantas con las mismas características han sido construidas por esas mismas industrias en otras regiones del país (Bogotá, Boyacá, Quindío, Valle del Cauca, etc.).

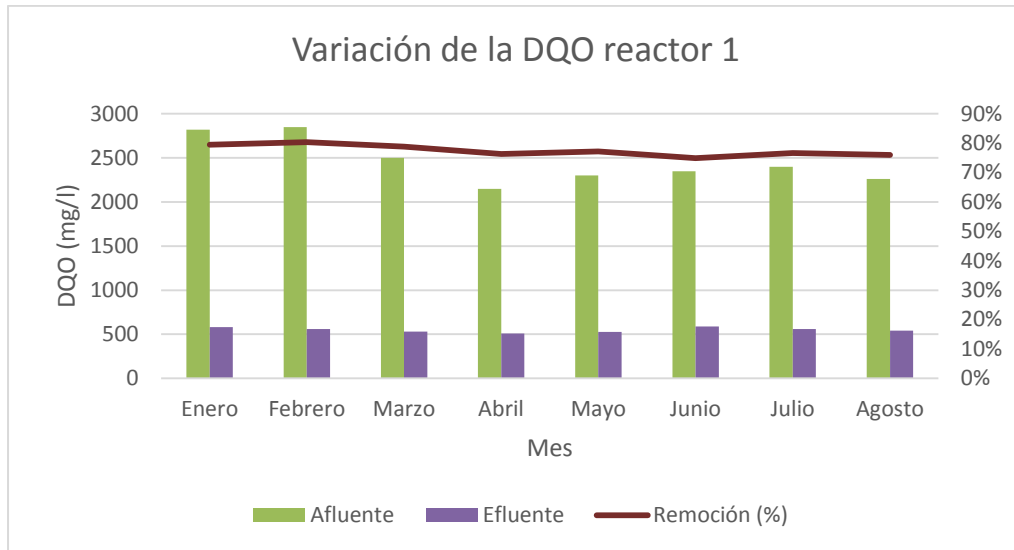
4.2 Condiciones de operación de las plantas

Como se ha podido comprobar con la información obtenida, para que los reactores UASB puedan tener un adecuado funcionamiento se hace necesario la instalación de tratamientos previos al agua residual ya sea doméstica o industrial. En el caso del tratamiento del agua residual doméstica, se observó que las plantas de tratamiento cuentan con sistemas de desarenadores y cribados (indispensables) que garantizan la remoción de arenas y sólidos gruesos para evitar inconvenientes en el sistema de tratamiento biológico en este caso los reactores UASB. Las aguas residuales domésticas o municipales por su naturaleza no requieren la adición de nutrientes porque dichos elementos están presentes en cantidades suficientes para garantizar el proceso biológico.

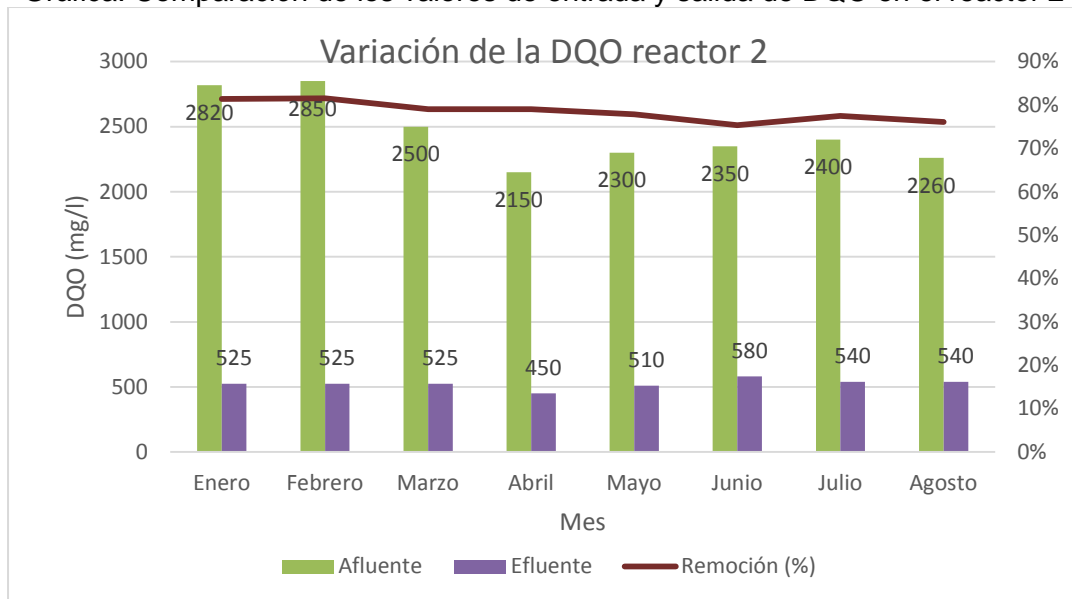
Para el caso de las aguas residuales industriales uno de los factores predominantes son las variaciones de caudal, variaciones en las cargas de entrada y variaciones en el pH de entrada al reactor anaeróbico, debido a esto, las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales, que fueron objeto de estudio poseen tanques de igualación y/o tanque de neutralización de las aguas residuales.

Para el caso de las aguas residuales industriales generadas en la empresa Maltería, se puede anotar lo siguiente:

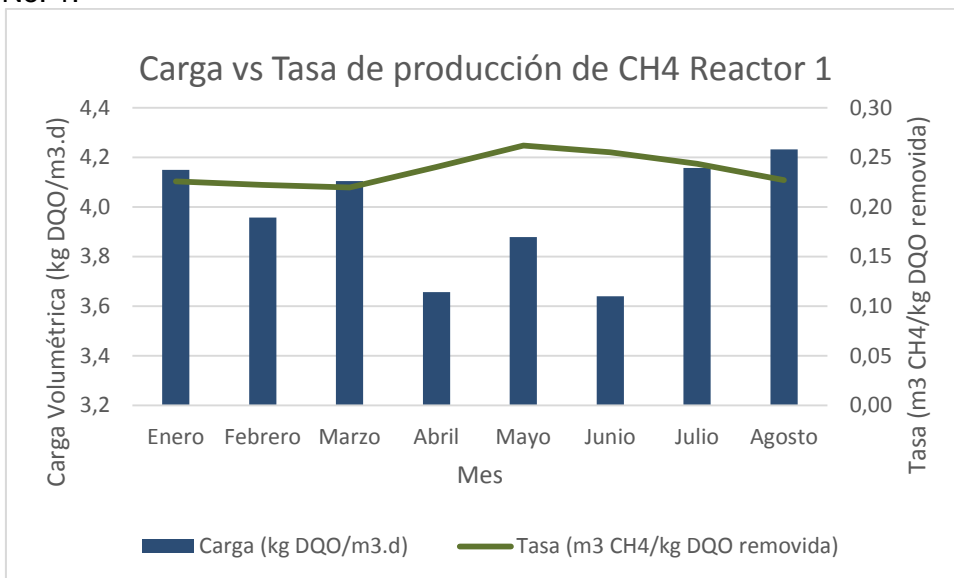
Gráfica. Comparación de los valores de entrada y salida de DQO en el reactor 1



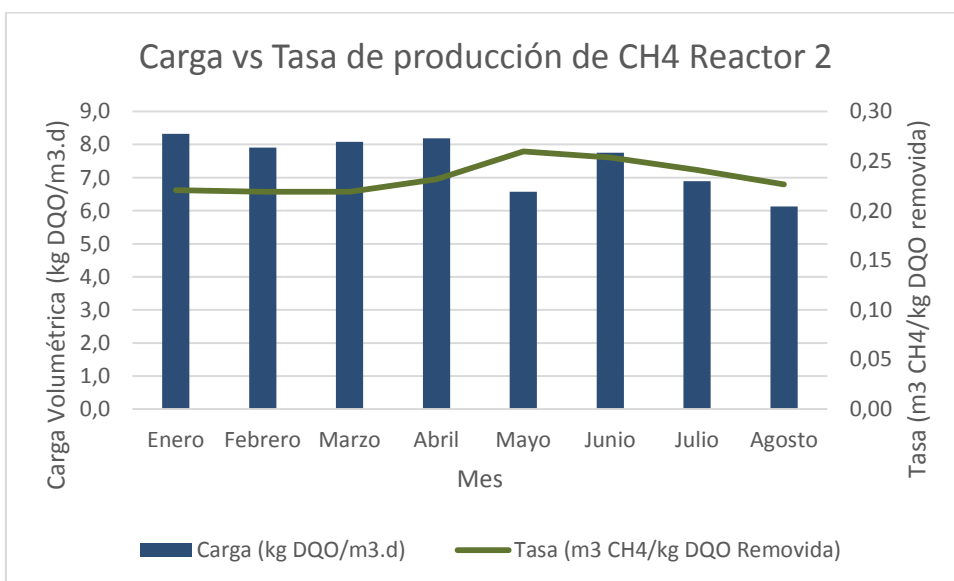
Gráfica. Comparación de los valores de entrada y salida de DQO en el reactor 2



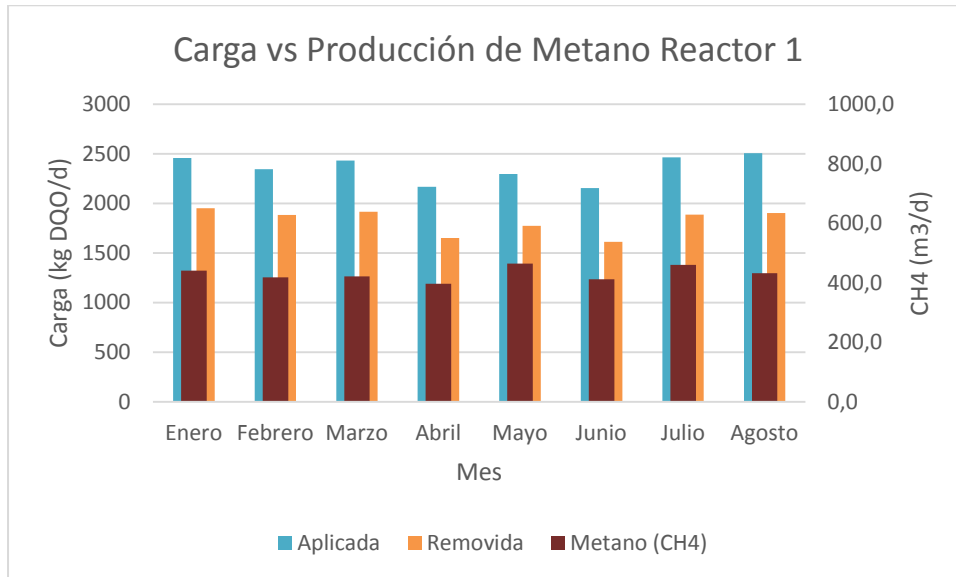
Gráfica. Comparación entre la carga volumétrica y la tasa de producción de Metano reactor No. 1.



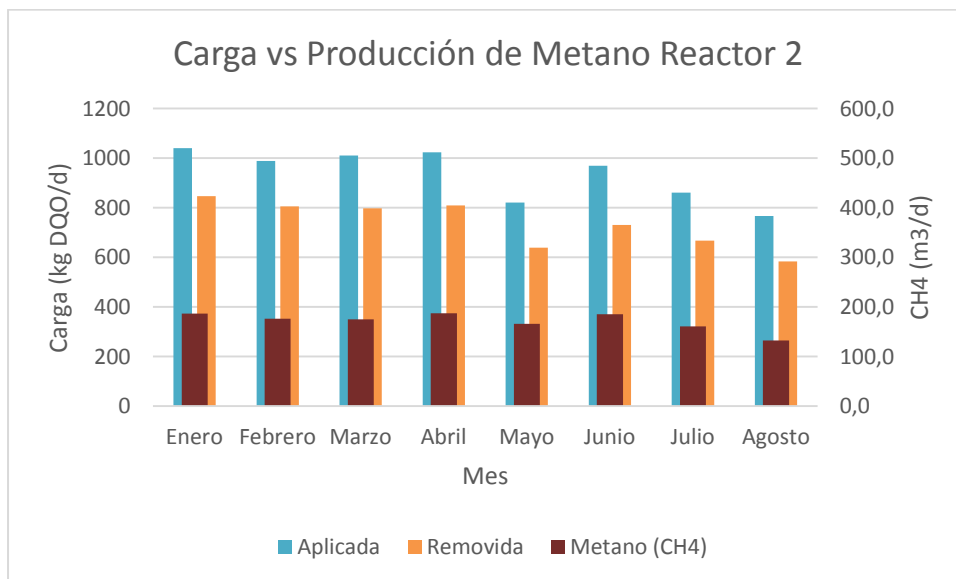
Gráfica. Comparación entre la carga volumétrica y la tasa de producción de Metano reactor No. 2.



Gráfica. Carga orgánica de entrada comparada con la producción de metano por día reactor No.1



Gráfica. Carga orgánica de entrada comparada con la producción de metano por día reactor No.2



Según IDAE⁵ Para un sistema anaerobio, la DQO (Demanda Química de Oxígeno) puede considerarse un parámetro conservativo, es decir, la suma de las DQO de entrada debe ser igual a la suma de las DQO de salida:

$DQO_{influyente} = DQO_{efluente} + DQO_{biogás}$ (1) Si se considera un biogás formado exclusivamente por CH_4 y CO_2 , y teniendo en cuenta que la DQO del CO_2 es nula, la DQO eliminada en el residuo se correspondería con la DQO obtenida en forma de metano, lo cual significa 2,857 kg DQO por m^3 CH_4 , ó 0,35 m^3 de CH_4 por kg de DQO eliminada, a $P=1$ at y $T=0^\circ C$, ó 0,38 m^3 de CH_4 a $P=1$ at y $25^\circ C$. Este último valor se aproxima al registrado en los datos de operación de la Maltería de Cartagena que en promedio es de 0,24 m^3 de CH_4 por Kg de DQO removida para el reactor 1 y de 0,23 m^3 de CH_4 por Kg de DQO removida para el reactor 2. Las variaciones sobre los valores de referencia podrían atribuirse a posibles fugas o acumulaciones en el reactor, a la producción de otros gases (H_2 , H_2S ,...), o a que la DQO medida no corresponda solo al carbono oxidable.

Por otra parte, la separación de fases con dos reactores en serie en los cuales se realizan, respectivamente, las fases de acidogénesis y metanogénesis, tiene como objetivo fundamental la obtención de un tiempo de retención total inferior al que se requeriría con un único reactor de mezcla completa. En lo fundamental, la separación es de tipo cinético y el control del tiempo de retención de cada reactor permite bajar significativamente el tiempo para el primero, en virtud a las mayores tasas de crecimiento de las bacterias acidogénicas. Este tipo de sistemas ha sido aplicado con éxito a la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos, pero no para residuos con fibras y, en general, sustratos complejos cuyo limitante es la hidrólisis.

Además, en aguas residuales industriales la capacidad de tratamiento se puede ver afectada por una variación en la carga orgánica. Una baja carga promueve el crecimiento de microorganismos filamentosos que poseen una elevada superficie en relación con el volumen (menos denso), lo cual induce un efecto adverso en la composición de la biomasa. Por el contrario, una elevada carga orgánica favorece la formación de AGV y con ello se puede producir la inhibición de la actividad metanogénica porque esas bacterias no pueden asimilar tales ácidos.

Para el caso de las aguas residuales industriales generadas del proceso de elaboración de gaseosas en la empresa Postobón, presentan un rango más amplio de variación de pH, el cual oscilan entre 3 a 12 unidades, aproximadamente, de acuerdo a lo que se estimó para el diseño del sistema. Esto, por supuesto, es una razón para justificar la utilización de los tanques de igualación, los cuales, además, permiten una regulación del caudal y la carga que se aplica a los reactores biológicos.

Como quiera que los vertimientos industriales presenten deficiencias en nutrientes es indispensable la adición de estos elementos para garantizar una adecuada actividad de

⁵Instituto para la diversificación de Energía-IDEA (2007). Biomasa – Digestores anaerobios. Gobierno de España, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.

los microorganismos y, por supuesto, una efectividad en el proceso de estabilización de la materia orgánica contaminante. También en el caso de este tipo de desechos, por la separación de fases, es necesario mantener un estricto control de los ácidos grasos volátiles a la entrada del tanque de metanización, dada la alta sensibilidad de las bacterias metanogénicas a los descensos del pH.

En la Tabla 4-1 se presentan los datos de caudal en las diferentes instalaciones evaluadas, así como los caudales de diseño o capacidad instalada de las mismas.

Tabla 4-1 Capacidad instalada vs condiciones de operación en las plantas de tratamiento

PTAR	Caudal de diseño (L/s)	Caudal de operación (L/s)	observaciones
Granabastos	11,57	2,29 – 3,94	La planta está trabajando con un caudal por debajo del diseñado.
Santa Rosa de Lima	3,02	1,15	La planta está trabajando con un caudal por debajo del diseñado.
Bavaria	69,44	30,55	La planta está trabajando con un caudal por debajo del diseñado.
Maltería	19,44	16,66	La planta está trabajando con un caudal por debajo del diseñado.
Postobón	63,88	43,40	La planta está trabajando con un caudal por debajo del diseñado.

Como se puede apreciar, todas las instalaciones se encuentran operando con caudales inferiores al caudal de diseño, mayores tiempos de retención no garantizan necesariamente mayores niveles de eficiencia. De hecho, los tanques sépticos son sistemas poco eficientes y esto se debe al deficiente contacto entre la biomasa y el residuo, predominando en estos casos el proceso físico de sedimentación. La Carga orgánica soluble solo puede removerse eficientemente si se garantiza un buen contacto del sustrato con la biomasa (lodo activado, manto de lodos, biopelícula, etc.). El crecimiento y la retención de la biomasa son fundamentales para una buena remoción de los contaminantes orgánicos.

4.3 Eficiencia de las plantas de tratamiento

La información recopilada en torno al funcionamiento de las diferentes instalaciones muestra que todas cumplen con la normatividad establecida para el vertimiento final. En buena medida este resultado podría estar ligado a factores tales como: instalaciones de pretratamiento y postratamiento que corrigen las deficiencias de los procesos previos y/o una adecuada operación y mantenimiento de los procesos. Esto es particularmente

previsible en las instalaciones de tipo industrial, aunque no se descarta un comportamiento similar en las plantas de aguas residuales domésticas.

La empresa Granabastos, por su parte, manifestó que se presentaron problemas con la eficiencia debido a que se tenían dos reactores anaeróbicos, con un tiempo de retención de 6 horas y un caudal de diseño de 11,57 Lt/s cada uno, funcionando en paralelo, lo que da un caudal total de 23,14 Lt/s. Particularmente se encontró que la planta está funcionando con un caudal muy inferior, menor de 5 Lt/s, lo cual hace que el tiempo de retención sea del orden de 27 horas; situación que se sale del parámetro deseado para este tipo de plantas. Ante esto, se decidió modificar el esquema para que la planta de tratamiento trabaje con los dos reactores en serie, cada uno con un tiempo de retención de 13,5 horas; de esta manera se espera incrementar los parámetros de remoción de sólidos y DBO_5 .

Los trabajos realizados fueron los siguientes:

- División del desarenador en dos secciones.
- División del canal efluente del reactor en dos secciones.
- Colocación de tubería de conducción en el reactor 1.
- Instalación de tanques de almacenamiento para bombear el material efluente del reactor 1 hacia el reactor 2.
- Instalación de bomba sumergible en los tanques de almacenamiento para bombear agua al reactor 2.
- Instalaciones eléctricas para la motobomba.
- Desagüe para la zona del reactor 2.

De acuerdo con los trabajos realizados el esquema de la planta de tratamiento queda así:

- Entrada del agua al pozo de bombeo, separando los sólidos en el sistema de rejillas.
- Bombeo al lado 1 del desarenador.
- Retiro de arenas y material suelto en el desarenador.
- Entrada de agua al reactor 1 y tratamiento.
- Salida del afluente y conducción por tubería hasta el tanque de almacenamiento.
- Bombeo de afluente del tanque de almacenamiento al reactor 2 para segundo tratamiento.
- Salida del efluente.
- Disposición en cauce seco.

En realidad, esto no soluciona el problema de la planta de Granabastos porque, igual, el resultado será el mismo. Una mejor solución consistiría en introducir todo el caudal a un solo reactor y eventualmente alternar la alimentación con el otro. Esto es viable solo en los procesos anaerobios donde los microorganismos pueden permanecer largos períodos sin alimentación, lo cual no afecta la supervivencia de las bacterias; cosa que no ocurre

con los sistemas aerobios donde la ausencia de alimentación y de oxígeno por períodos prolongados conlleva a su destrucción y colapso.

En las plantas industriales, a pesar de contar con equipos y unidades de pretratamiento donde se lleva a cabo la neutralización del pH, las empresas Maltería y Bavaria presentaron problemas en el funcionamiento de los reactores debido a variaciones de pH muy altas, lo que conllevó a la muerte de la población bacteriana. Estos problemas demandaron una nueva inoculación de los reactores UASB para restablecer el proceso.

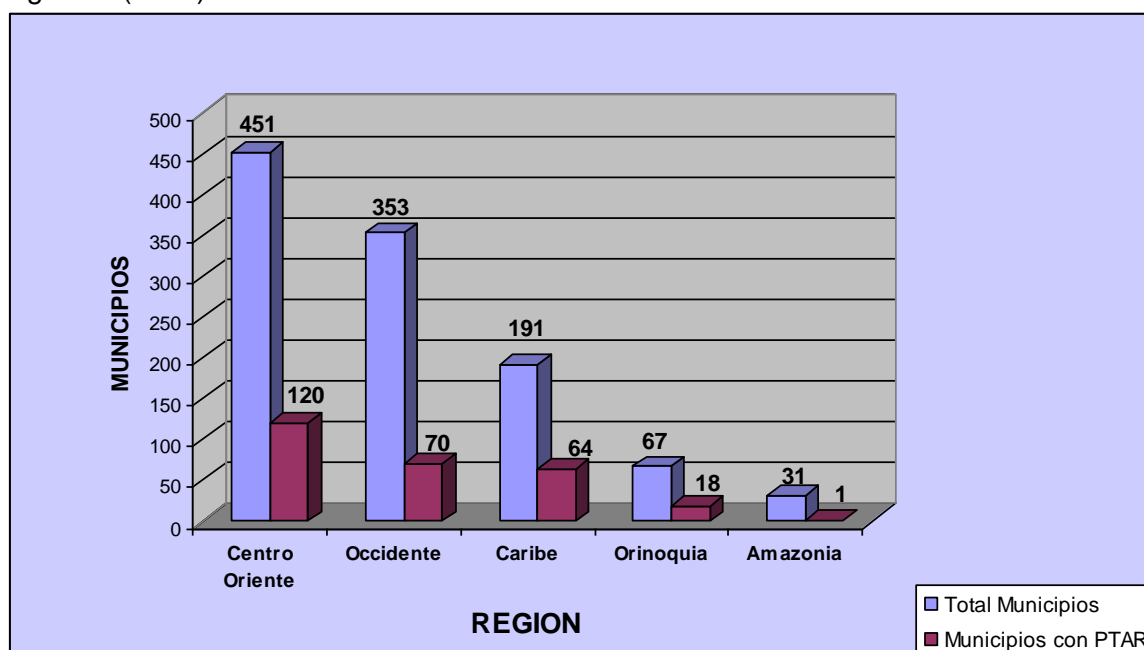
La empresa Maltería presentó otra eventualidad en la operación del sistema, en este caso, debido a que no se llevó un adecuado seguimiento del crecimiento del lodo y este ocasionó una ruptura de la campana de separación gas – líquido, por lo cual se requirió una nueva inoculación del reactor.

La empresa Bavaria manifestó que en ciertas ocasiones se han presentado problemas de operabilidad debido a sobrecargas en la entrada al sistema y aunque los microorganismos estén aclimatados a dicho sustrato un cambio elevado de la carga ocasiona problemas de arrastre de lodo y disminución de la eficiencia. Hay que recordar que la remoción de carga contaminante en los procesos anaerobios solo se consigue cuando se cumple a cabalidad la última fase, es decir, cuando se produce metano. De lo contrario la materia orgánica estará en forma de ácidos u otros compuestos precursores.

4.4 Perspectiva a mediano y largo plazo de implementación de tecnología anaerobia en la Costa Norte de Colombia

Reconociendo que la inversión en el sector de agua potable y saneamiento en Colombia se ha incrementado considerablemente en Colombia en la última década existe todavía un considerable rezago en materia de tratamiento de aguas residuales. En este aspecto el sector industrial ha estado siempre muy por encima de las coberturas que presentan los municipios. También hay que reconocer que existe una considerable disparidad por regiones, tal como se muestra en la gráfica 4-11.

Figura 4-1. Cobertura del tratamiento de aguas residuales municipales en Colombia, por regiones (2001).



Fuente: Minambiente

Los estudios sectoriales sobre la infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales en Colombia (SUI-Superservicios) registran la existencia plantas en diferentes localidades de los departamentos del norte del país, entre los cuales se han seleccionado los tres que se relacionan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2 Municipios con PTAR en diferentes departamentos de la Costa Caribe Colombiana

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	TECNOLOGÍA
ATLÁNTICO	Barranquilla	Laguna de estabilización
	Campo de la Cruz	Laguna de Estabilización
	Galapa	Laguna de estabilización
	Malambo	ND
	Puerto Colombia	Laguna de estabilización
	Sabanagrande	Laguna de estabilización
	Sabanalarga	Laguna de estabilización
	Santa Lucía	Laguna de estabilización
	Santo Tomás	Laguna de estabilización
	BOLIVAR	Barranco de Loba
El Carmen de Bolívar		Zanjones de oxidación
Margarita		Laguna de estabilización
Morales		Laguna de estabilización
Pinillos		Laguna de estabilización
Río Viejo		Laguna de estabilización

MAGDALENA	Santa Marta	Emisario submarino
	Ciénaga	Laguna de estabilización
	El piñón	Laguna de estabilización
	Guamal	Laguna de estabilización
	Pivijay	Laguna de estabilización
	Salamina	ND
	San Zenón	Laguna de estabilización
	Santa Ana	ND

Fuente: Superservicios, 2009

Como se puede observar, la mayoría de las instalaciones corresponden a sistemas de lagunas. Esto se debe al auge que tuvo la aplicación de tecnologías no convencionales (tecnologías apropiadas) impulsadas por entidades como la Organización Mundial de la Salud y la OPS en los años 60 y 70.

Por otra parte, existe un vacío en la información porque el Sistema Único de Información-SUI, de la Superintendencia de Servicios Públicos, no se encuentra debidamente actualizado y muchos de los datos que se reportan por parte de las Empresas de Servicios Públicos son inconsistentes o incompletos. De allí que la búsqueda de instalaciones con tecnología anaerobia debió concentrarse en otras entidades como las Corporaciones Autónomas Regionales y otros establecimientos industriales.

De acuerdo con información suministrada por una firma de consultoría, contratada por la gobernación del Magdalena para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales en diferentes localidades del departamento, se contempla la construcción y puesta en marcha de aproximadamente 79 plantas de tratamiento anaerobio UASB en corregimientos y municipios del Magdalena. Los estudios y diseños que se están realizando son similares al que se encuentra actualmente funcionando en el corregimiento de Santa Rosa de Lima.

Con la propuesta de implementación de sistemas anaerobios UASB para el saneamiento básico del departamento del Magdalena, se observa claramente el auge que está teniendo la implementación de dicha tecnología para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Esto debido a que dichos sistemas son eficientes obteniéndose altos porcentajes de remoción, en climas cálidos como los que se presentan en la Costa Norte Colombiana. Así mismo, expresaba la empresa que está a cargo del diseño de las plantas de tratamiento, que otra de las razones para llevar a cabo la implementación de esta tecnología se debe a que son sistemas compactos que no ocupan grandes extensiones de tierra. En cambio, sucede lo contrario cuando se construyen lagunas facultativas para la depuración de las aguas residuales, las cuales demandan amplios espacios para su construcción. Si bien es cierto que la puesta en marcha de un reactor UASB requiere cuidado y atención, una vez que el sistema se estabiliza se obtienen altos porcentajes de remoción que permiten cumplir con la normatividad ambiental vigente y además de depurar las aguas residuales, se genera Biogás; aunque a decir verdad, la producción de biogás en aguas residuales domésticas es muy baja para considerar rentable su aprovechamiento como fuente de energía. Este subproducto sí resulta

atractivo para desechos industriales con elevada carga orgánica. De allí que la mayoría de las instalaciones anaerobias en el mundo se concentran en la depuración de vertimientos industriales.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El número de instalaciones con tecnología anaerobia existentes en la Costa Norte Colombiana es muy reducido en comparación con otras regiones del país y con otras Tecnologías de Tratamiento. Así lo demuestran los registros de las Entidades Ambientales y de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

En materia de tratamiento de aguas residuales domésticas (Municipales) las instalaciones que predominan en la región son las lagunas de estabilización. Las condiciones climáticas y la disponibilidad propiciaron históricamente este tipo de soluciones con el impulso de programas apoyados por la OMS y la OPS. No obstante, en los últimos años se han construido algunas soluciones, relativamente pequeñas, con reactores tipo UASB y Filtros Anaerobios, como es el caso de Granabastos y el Corregimiento de Santa Rosa de Lima. Otros proyectos similares parecen estar siendo contemplados dentro de los Planes de Saneamiento del Departamento del Magdalena.

La información recogida en las Corporaciones Autónomas Regionales, indica que existe una aplicación de la tecnología anaerobia en el tratamiento de las aguas residuales industriales, especialmente en grandes plantas productoras de refrescos y cervecerías.

En estos casos se ha dado la aplicación de soluciones con patentes de firmas internacionales que utilizan principalmente la separación de fases (acidificación y metanogenización). Este tipo de experiencias constituye un referente importante para la expansión a otros sectores productivos.

De acuerdo con las caracterizaciones proporcionadas por las autoridades ambientales y por las mismas empresas, la eficiencia de la mayoría de los sistemas que se encuentran en operación cumple con los porcentajes de remoción establecidos en la normativa colombiana.

Los muestreos y caracterizaciones de las aguas residuales domésticas e industriales que estaban contempladas en el desarrollo de este estudio no pudieron llevarse a cabo debido a que las empresas no facilitaron el procedimiento, argumentando restricciones que son perfectamente comprensibles. Por las mismas restricciones establecidas para el acceso a la caracterización no fue posible obtener planos y especificaciones detalladas de las plantas en estudio.

Las empresas Bavaria y Maltería reportaron algunos problemas de operación en sus sistemas de tratamiento debido a fluctuaciones bruscas, tanto de pH como de carga orgánica, lo cual obligó a repetir los procedimientos de inoculación de sus reactores

Las condiciones climáticas de la Costa Norte Colombiana y la baja cobertura existente en materia de tratamiento de aguas residuales en esta importante región constituyen un escenario propicio para promover la aplicación de tecnologías anaerobias.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda continuar la construcción de la base de datos de las plantas de tratamiento anaerobio de la Costa Norte Colombiana, extendiendo la búsqueda a otros departamentos como Córdoba y la guajira, que constituyen igualmente escenarios propicios para la implementación de estas tecnologías. Se debe insistir en la posibilidad de obtener planos y especificaciones técnicas de las diferentes plantas.

Se sugiere mantener un seguimiento a los sistemas de tratamiento descritos en el presente estudio para obtener mayor información que permita optimizar los procesos y establecer nuevos criterios de diseño con miras al desarrollo de la tecnología anaerobia.

**A. Anexo: Planos de la planta de
lixiviados del relleno sanitario de
Santa Marta “La Palangana”**

6 Bibliografía

1. APHA (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA. Washington, DC, USA.
2. ARDILA, Rojas Isidro (2000). Análisis y Evaluación Físicoquímica de un reactor UASB. Bucaramanga. Escuela de Ingeniería Química UIS.
3. OPS-CEPIS (2002) Resumen Ejecutivo Proyecto Regional Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Lima Perú, 34 pp.
4. Collazos, C. (2000). Biodegradabilidad anaerobia de efluentes cerveceros. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Tesis de Maestría.
5. Collazos, C. y Cala, J. (1992). PTAR "Río Frío", Aplicación de la Tecnología UASB para el Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas en Bucaramanga". Gaceta Ambiental - ACODAL - Seccional Valle del Cauca, No.6, Sep.-Oct. Edición Nacional, Cali, Colombia.
6. Collazos, C y Díaz, M. (2003) Ensayos de biodegradabilidad anaerobia de efluentes cerveceros con lodo granular y lodo floculento. Ingeniería e investigación, No. 52, pp 54 – 62.
7. DIAZ, María consuelo. Digestión anaerobia. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. 2002.
8. McCarty, P. (1985). Historical Trends in the Anaerobic Treatment of Dilute Wastewaters. Proceedings of the Seminar/Workshop Anaerobic Treatment of Sewage. University of Massachusetts at Amherst. 27 y 28 de junio de 1985. Estados Unidos. pp. 3-15.
9. LETTINGA, G y Colaboradores. Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular.
10. Metcalf & Eddy (2003). Wastewater engineering ¿ treatment and reuse. McGraw Hill, New York, 1819 pp.
11. MANUAL DE CURSO, Arranque y Operación de Sistemas de Flujo Ascendente con Manto de Lodo UASB. Universidad del Valle – Universidad Agrícola de Wageningen Holanda. Cali 1987.

12. Noyola, A. (2004). Opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales en América Latina: La vía anaerobia. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
13. Noyola, A. (2005). Tendencias en el tratamiento de aguas residuales domésticas en Latinoamérica. Seminario internacional tendencias y tecnologías aplicadas al tratamiento de aguas residuales urbanas. ACODAL, febrero 23-25, Bogotá DC, Colombia.
14. Organización Panamericana de la Salud OPS (2001). Informe regional sobre Evaluación 2000 en las Américas: Agua potable y saneamiento, estado actual y perspectivas, Washington, DC, USA.
15. Romero J. (1999) Tratamiento de aguas residuales ¿Teoría y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
16. Schellinkhout, A. y Collazos, C. J. (1992). Full-Scale Application of the UASB Technology for Sewage Treatment. Wat. Sci. Tech., Vol. 25, No. 7, pp. 159-166.
17. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2009). Sistemas de Alcantarillado en Colombia - Visión del Servicio Público. Superintendencia delegada para Acueducto, Alcantarillado y Aseo. Bogotá, D.C.
18. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2012). Informe Técnico sobre Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia – Línea Base 2010. Superintendencia delegada para Acueducto, Alcantarillado y Aseo. Bogotá, D.C.
19. TCHOBANOGLOUS, George. Tratamiento de aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. Santa Fe de Bogotá Mc Graw Hill 2000.
20. Van Haandel, A. C. y Lettinga, G. (1994). Anaerobic Sewage Treatment. A practical guide for regions with a hot climate.
21. Expedientes de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico
22. Expedientes de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena
23. Expedientes de Cardique