

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE BIOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA
INFORME DE PRÁCTICA DE ESPECIALIDAD**



**EVALUACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA
DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES EN LA PLANTA SANTA MARÍA DEL
BENEFICIO F.J. ORLICH UBICADO EN OROSI.**

KARLA VALERÍN BERROCAL
Cartago
2002.

RESUMEN

El proyecto tiene como objetivo principal evaluar el sistema de tratamiento de aguas residuales en la planta Santa María, del Beneficio F.J. Orlich ubicado en Orosi (provincia de Cartago) para plantear opciones que contribuyan a mejorar su operación, funcionamiento y eficiencia. El sistema evaluado utiliza un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), una laguna de lodos y una laguna de oxidación anaerobia.

Se realizaron análisis de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), para el FAFA y la laguna anaerobia, todos los análisis se realizaron de acuerdo con los métodos estándar de análisis de aguas y aguas residuales de la APHA-AWWA-WEF. También se realizaron pruebas de ácidos grasos volátiles (AGV's) y alcalinidad, pH, temperatura, sólidos sedimentables, curvas de neutralización con cal, y análisis microscópicos, además de una prueba de actividad metanogénica y de velocidad de sedimentación para el lodo del filtro. Entre los resultados obtenidos se obtuvo que a pesar de la disminución en la eficiencia del sistema conforme aumenta la carga que ingresa al mismo, sí se cumple con las normas establecidas por la legislación nacional para el vertido y reuso de aguas residuales. El análisis microscópico comprobó la transición de la laguna de oxidación de facultativa a anaerobia. El lodo del FAFA es de muy baja calidad por lo que se recomienda un mayor tiempo de retención del lodo aumentando los periodos de purga del filtro.

Palabras clave: Actividad metanogénica, laguna anaerobia, FAFA, Curvas de neutralización.

ABSTRACT

The aim of this to evaluation was controlled the system of residual waters of F.J. Orlich company in Orosi (Cartago) for plan options that contribute to improve their operation and efficiency. This company used an Anaerobic Filter of Upward Flow (FAFA) and a anaerobic pond.

The evaluation was carried out considering the chemistry oxygen demand (COD), biochemistry oxygen demand (BOD) and totals suspended solids (TSS) for the FAFA and the anaerobic pond. The analysis were carried out following the Standard Methods of Analysis of water and wastewaters of the APHA-AWWA-WEF. Also, volatile fatty acid tests, alkalinity, pH, temperature, sedimentables solids, curve of neutralization, microscopic analyses, in addition to a test of metanogenic activity and velocity of sedimentation for mud of the filter. Besides, the low efficiency of system conform the load increase, the system is according with the national normative for disposal and reuse of wastewater. The microscopic analysis showed the transition of the oxidative pond from facultative to anaerobic. The mud of the FAFA is of very low quality reason why it recommends a greater time of retention of mud, increasing the periods of purge of the filter.

Key words: metanogenic activity, anaerobic lagoon, FAFA, curve of neutralization.

DEDICATORIA

Al SEÑOR TODO PODEROSO, por su infinito amor, por todo lo que me ha dado y por ayudarme a llegar hasta aquí. Por no dejarme en los momentos en que más lo necesité a pesar de todo.

A mi madre, Cecilia Berrocal Bravo, por su amor, su apoyo, por desvelarse desde su habitación esperando a que yo terminara de estudiar y por estar siempre atenta a mis necesidades.

A mi padre, Fernando Valerín Linares, por el sacrificio que sé que significó darme la posibilidad de estudiar, aunque para él fue más un acto de amor. Por su apoyo y paciencia.

A mis hermanos Alejandra y Fernando por el amor que siempre me han brindado y ser una parte muy importante de mi vida.

A Adrián Chaves Portuguez, por su paciente amor y por ser ante todo un amigo, un compañero y alguien en quien puedo confiar. Gracias por saber como hacerme sonreír siempre.

AGRADECIMIENTOS

De manera muy especial, quisiera agradecer a mi profesora asesora, la MSc. Alma Deloya Martinez, por toda su colaboración, por su paciencia y ser más que una simple profesora, una verdadera guía.

Al master Ing. Randall Camacho, por permitirme realizar mi Práctica de especialidad en su empresa, por todo el apoyo y la ayuda que me brindó en todo momento.

A la Ph.D. Silvia Soto, profesora de la Escuela de Química, por el tiempo que dedicó para la revisión de este documento.

A Yirlany, Cristian, Javier, Minor, Roberto, Eliécer, Andrey, Agustín, Jorge y a todo el personal del Beneficio F.J. Orlich, Planta Santa María, por ser unos excelentes compañeros.

Agradecer también de forma especial a Juan Carlos Solano Guzmán, por estar ahí para apoyarme y animarme cuando lo necesité y por toda la ayuda que me brindó. Gracias, JuanCa.

Al Ing. Eduardo Brenes por toda su colaboración.

A Jenny Muñoz y Marco Chichilla, gracias amigos por su confianza en mí y por su apoyo.

A la Escuela de Biología y todos sus profesores, por todos los conocimientos que me transmitieron y por ser un excelente apoyo en mi proceso de aprendizaje.

INDICE GENERAL

RESUMEN	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
INDICE GENERAL.....	5
INDICE DE CUADROS	8
INDICE DE FIGURAS	10
1. INTRODUCCIÓN	12
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	16
3.1. Objetivo General.....	16
3.2. Objetivos Específicos.	16
4. IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA	17
4.1. Antecedentes de la compañía.	17
4.2. Proceso de Beneficiado de Café en la Planta Santa María, Beneficio F.J. Orlich.	18
5. REVISIÓN DE LITERATURA.....	22
5.1. Proceso de Estabilización Anaerobio.	22
5.2. Parámetros que Rigen el Proceso Anaerobio.....	25
5.2.1. Temperatura.....	25
5.2.2. Anaerobiosis.....	26
5.2.3. Potencial de Hidrógeno (pH).	27
5.2.4. Nutrientes.....	27
5.2.5. Compuestos tóxicos.	28
5.3. Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)	29
5.4. Sistema de tratamiento de aguas residuales mediante el empleo de lagunas de estabilización.....	32
5.4.2. Lagunas de estabilización anaerobia.....	34
5.5. Características de las Aguas Residuales del Beneficiado de Café.....	35

6.	PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS CONSIDERADOS PARA EVALUAR EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA PLANTA SANTA MARÍA, BENEFICIO F.J. ORLICH.	37
6.1.	Turbiedad.....	37
6.2.	Olor.....	38
6.3.	Caudal.	38
6.4.	Sólidos.....	39
6.4.1.	Sólidos sedimentables. (SSed).....	39
6.4.2.	Sólidos Suspendidos Totales (SST).	40
6.4.3.	Sólidos Volátiles (SV).....	40
6.5.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	40
6.6.	Demanda Química de Oxígeno. (DQO).....	42
6.7.	Ácidos Grasos Volátiles (AGV).....	43
6.8.	Alcalinidad.	43
6.9.	Oxígeno disuelto (OD).....	44
7.	MICROBIOLOGÍA DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL PROCESO ANAEROBIO.	45
7.1.	Bacterias.....	45
7.2.	Algas.....	46
8.	SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA PLANTA DE PROCESO SANTA MARÍA.	47
8.1.	Tamiz.....	49
8.2.	Dosificadores de cal.	49
8.3.	Trampa para sedimentos de cal.	50
8.4.	Filtro anaerobio de flujo ascendente. (FAFA)	50
8.5.	Laguna de Lodos.....	51
8.6.	Vertedero.....	52
8.7.	Laguna de oxidación Anaerobia.	53
9.	METODOLOGÍA.....	54
9.1.	Determinación de caudal.....	54
9.2.	Análisis físico-químicos realizados al sistema de tratamiento de aguas residuales de la planta Santa María, Beneficio F.J. Orlich.	54
9.3.	Prueba de actividad metanogénica.....	56

9.4.	Pruebas de neutralización.	56
9.5.	Análisis al Microscopio.	57
10.	RESULTADOS.	59
10.1.	Determinación de Caudal.	59
10.2.	Parámetros físico-químicos.	62
10.3.	Prueba de actividad metanogénica.....	73
10.4.	Velocidad de sedimentación del lodo del Filtro Anaerobio.	74
10.5.	Pruebas de neutralización.	75
10.6.	Análisis microscópicos.....	76
10.7.	Determinación de olor en la laguna de oxidación y en la salida del sistema.	77
11.	DISCUSIÓN.....	78
11.1.	Análisis del efecto del caudal en el sistema de tratamiento.....	78
11.2.	Análisis fisicoquímicos.	80
11.2.1.	Potencial de Hidrógeno (pH) y Temperatura.....	80
11.2.2.	Turbiedad y oxígeno disuelto (OD)	83
11.2.3.	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	85
11.2.4.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	86
11.2.5.	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	87
11.2.6.	Carga orgánica volumétrica (COV) y Carga Orgánica Superficial (COS)	87
11.2.7.	Sólidos Sedimentables (SSed)	88
11.2.8.	Ácidos Grasos Volátiles (AGV` s) y Alcalinidad.	89
11.3.	Prueba de actividad metanogénica (AME).	91
11.4.	Pruebas de neutralización.	93
11.5.	Análisis Microscópicos.....	94
12.	CONCLUSIONES.	95
13.	RECOMENDACIONES.....	97
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	99
15.	ANEXOS.....	101

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición elemental de las bacterias metanogénicas.	28
Cuadro 2. Fanegas procesadas, caudal diario y tiempo de retención (Tr) en los diferentes componentes del sistema de tratamiento.....	61
Cuadro 3. Caudal promedio y volumen de agua residual producida por fanega en diferentes períodos de cosecha.....	62
Cuadro 4. Tiempo de retención promedio del filtro y de la laguna de oxidación en tres períodos de cosecha.....	62
Cuadro 5. Temperaturas y pH mínimos, máximos y promedios en la entrada al sistema, entrada y la salida del filtro anaerobio y de la laguna de oxidación	63
Cuadro 6. Turbiedad, oxígeno disuelto y temperatura de cada uno de los componentes del sistema de tratamiento de aguas residuales.....	65
Cuadro 7. Sólidos sedimentables (SSed 60`) máximo, mínimo y promedio obtenidos a la salida del sistema de tratamiento de aguas residuales.	66
Cuadro 8. Demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y sólidos suspendidos totales (SST), de entrada y salida del filtro y la laguna de oxidación.....	68
Cuadro 9. Carga orgánica (CO) y carga orgánica volumétrica (COV) de entrada al filtro anaerobio.	70
Cuadro 10. Carga orgánica (CO) y Carga Orgánica Superficial (COS) de entrada a la laguna de oxidación.	70

Cuadro 11. Eficiencia de operación de cada uno de los componentes del sistema de tratamiento de aguas residuales y del sistema en su totalidad.	71
Cuadro 12. Ácidos grasos volátiles (AGV's) y alcalinidad en el filtro anaerobio y en la laguna.	71
Cuadro 13. Producción diaria de metano y actividad metanogénica presentada en el filtro anaerobio.	73
Cuadro 14. Velocidad de sedimentación del lodo extraído del Filtro Anaerobio después de diferentes periodos de tiempo sin purgar.	74
Cuadro 15. Cal necesaria para neutralizar el agua residual a la entrada del sistema de tratamiento.	75
Cuadro 16. Cal necesaria para neutralizar el agua residual a la entrada de la laguna de oxidación (salida del filtro) del sistema de tratamiento.	75
Cuadro 17. Microalgas presentes en la superficie de la laguna de lodos y la laguna de oxidación en dos fechas de muestreo.	76
Cuadro 18. Microalgas presentes en el efluente de la laguna de oxidación en diferentes fechas de muestreo.	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general de operación del proceso de beneficiado de café en la planta Santa María, Beneficio F.J. Orlich.	21
Figura 2. Etapas de descomposición del sustrato en un proceso anaerobio (Wasser, 1995).	24
Figura 3. Comportamiento de la actividad metanogénica en relación con la temperatura.....	26
Figura 4. Esquema representativo del funcionamiento general de un filtro anaerobio de flujo ascendente.....	32
Figura 5. Diagrama del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Planta Santa María, Beneficio F.J. Orlich.	48
Figura 6. Diagrama representativo de un vertedero triangular.	53
Figura 7. Puntos de muestreo para análisis microscópicos en la laguna de oxidación.....	57
Figura 8. Puntos de muestreo para análisis microscópicas en la laguna de lodos	58
Figura 9. Caudal diario y fanegas procesadas en la planta Santa María durante los meses de octubre, noviembre y diciembre	60
Figura 10. Comportamiento del pH a la salida del sistema en diferentes fechas de muestreo	64

Figura 11. Variación de los sólidos sedimentables en diferentes fechas de muestreo.....	67
Figura 12. Comportamiento de la DQO a la entrada del filtro, la entrada a la laguna de oxidación y a la salida del sistema en diferentes campañas de muestreo.....	68
Figura 13. Comportamiento de la DBO a la entrada del filtro, la entrada a la laguna de oxidación y a la salida del sistema en diferentes campañas de muestreo.....	69
Figura 14. Comportamiento de la SST a la entrada del filtro, la entrada a la laguna de oxidación y a la salida del sistema en diferentes campañas de muestreo.....	69
Figura 15. Relación entre los ácidos grasos volátiles en miliequivalentes (meq) y el pH en el filtro anaerobio de flujo ascendente	72
Figura 16. Relación entre los ácidos grasos volátiles en miliequivalentes (meq) y el pH en la laguna anaerobia de flujo ascendente	72
Figura 17. Actividad metanogénica del lodo presente en el filtro anaerobio de flujo ascendente.....	74

1. INTRODUCCIÓN

El medio ambiente se puede definir como el equilibrio de las fuerzas que rigen la vida de un grupo biológico, por lo que tiene una estrecha relación con las ciencias de la naturaleza. Se considera como ataque a este equilibrio medio ambiental cualquier acción desde la chimenea de una fábrica al ruido de un coche, la acumulación de residuos en una playa, el vertido de aguas usadas a un río o la construcción de una urbanización en una zona montañosa.

La contaminación del agua se define como el vertido de residuos sólidos o líquidos, el depósito de material o cualquier otra acción susceptible de causar deterioro o incrementar el grado del mismo, en la calidad de las aguas, modificando sus características físicas, químicas biológicas y bacteriológicas (Ulloa, 1993).

El ser humano, con todas sus actividades, es el ser que más altera el equilibrio del ambiente, incluyendo desde luego, el agua. Sin embargo, a causa de los desastres ya experimentados, a aumentado el interés por disminuir al máximo el impacto negativo ocasionado por las actividades antrópicas a la naturaleza.

Dichas actividades dan lugar a la producción de una amplia gama de productos residuales, muchos de los cuales pasan al agua, que actúa como vehículo de transporte y en consecuencia a de ser cuidadosamente tratada antes de ser eliminada. La protección de los recursos de agua contra la contaminación es un requisito básico para el desarrollo de una sana economía, el mantenimiento de la salud pública y la conservación de los recursos (Gloyna, 1973).

El cultivo e industrialización del café en Costa Rica, ha sido una importante fuente de ingreso de divisas hasta hace unos pocos años (Cléves, 1995). Sin embargo, en el proceso productivo se generan gran cantidad de desechos contaminantes, lo cual obliga a intensificar las investigaciones dirigidas a disminuir y controlar el impacto negativo en el ambiente siendo el estudio de los sistemas de tratamiento de desechos ya implementados vital para este control.

Los desechos de las industrias de tipo estacional como la del café se presentan en grandes volúmenes por lo que es económicamente difícil proveer el equipo y las instalaciones para tratarlos adecuadamente. El aumento continuado del volumen de la cosecha y el desarrollo urbano alrededor de la plantas de beneficio son factores que agravan la situación y justifican la urgente búsqueda de soluciones (Cléves, 1995).

El ciclo de utilización del agua tiene como consecuencia la degradación de la calidad de la misma. Esta degradación no es siempre compatible con la propia capacidad natural de regeneración (autodepuración). Por esta razón, surge la necesidad de devolver de forma artificial al agua, las condiciones o características de calidad que tenía previamente. Así nacen los diferentes sistemas de depuración o de tratamiento de las aguas residuales (Ulloa, 1993).

2. JUSTIFICACIÓN

La contaminación que se produce al procesar una tonelada de café es equivalente a la causada por 2000 personas durante un día (Cléves, 1995.) Es así que se han hecho acuerdos entre el sector cafetalero y el Gobierno con el propósito de controlar la contaminación.

El estudio de sistemas de tratamiento de aguas residuales del café en Costa Rica es de mucha importancia, ya que en las naciones donde los sistemas depuradores de aguas residuales y toda la tecnología dirigida a esta área es muy desarrollada no se cultiva café por lo que no se puede importar tecnología específica para tratar los desechos generados por este producto, como sí se ha hecho con otros sistemas, por esta razón las tecnologías y las opciones en sistemas de tratamiento de aguas residuales deben surgir de nuestro propio entorno, lo cual, hace necesario el estudio de sistemas ya implementados en el país que funcionan con buenos resultados y que se han desarrollado de acuerdo a las necesidades de nuestra industria cafetalera.

La buena operación y funcionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales garantiza y protege la gran inversión inicial que este representa, y logra el control de la contaminación de los cuerpos de agua. Esto es de suma importancia en la actualidad ya que refleja, en parte, la calidad con que opera una empresa y su preocupación por el ambiente en el que se desarrolla, lo cual, es bien visto por los consumidores. De igual forma suple la necesidad de cumplir con las normativas establecidas por ley de forma eficiente y sin mayores costos económicos que los que se presentarían con un sistema en mal funcionamiento.

El estudio que se plantea en el presente proyecto contribuirá significativamente a la adecuación de tecnologías y a mejorar el funcionamiento y operación de los sistemas ya existentes, ya que, con base a los resultados de los análisis y a las pruebas realizadas se pretende identificar puntos claves que contribuyan a mejorar y optimizar el funcionamiento y operación del sistema.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General.

- Evaluar el funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales en el Beneficio F.J. Orlich ubicado en Orosi de Cartago con el fin de determinar su desempeño y así plantear opciones que contribuyan con su optimización, operación y eficiencia.

3.2. Objetivos Específicos.

- Determinar el funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales utilizando como referencia los resultados obtenidos con los parámetros de DQO, DBO, Sólidos suspendidos, Sólidos sedimentables, pH, turbiedad y temperatura.
- Establecer la cantidad de cal requerida para aumentar el pH y la alcalinidad del sistema, favoreciéndose la sedimentación mediante la elaboración de curvas de pH.
- Establecer la influencia del pH y el oxígeno disuelto (OD) en el funcionamiento y operación del sistema mediante la elaboración de perfiles de pH y de OD.

4. IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

4.1. Antecedentes de la compañía.

F.J. Orlich y Hnos Ltda., nace en 1928 en la región de San Ramón y Palmares. En 1992 la comercializadora ECOM (Esteve Commodity Group) adquirió la compañía, inyectándole el suficiente capital para reactivar sus operaciones.

La empresa cuenta con la Planta La Giorgia ubicada en Palmares, desde 1996 con la Planta Tres Volcanes, ubicada en San Rafael de Alajuela, y más recientemente con la Planta Santa María, ubicada en Orosi de Cartago.

De acuerdo a las necesidades y recursos con que se cuentan, la Planta La Giorgia procesa todo el café que se produce en las zonas de San Ramón, Grecia, Sarchí, Miramar, Poás y Palmares; la Planta Tres Volcanes recibe el café procedente de Tarrazú, Alajuela, Heredia y Puriscal; mientras que la Planta Santa María recibe café de Tarrazú, Tres Ríos, Orosi, Cartago y Tucurrique.

Actualmente la compañía compra café en fruta a productores de dichas zonas, beneficia el café y lo vende como café oro que consiste en el grano al cual se le han removido las cubiertas exteriores (pulpa, mucílago y pergamino). Gran parte de las ventas son para la Cafetalera Internacional Cafinter S.A., compañía hermana de Orlich, también propiedad de ECOM y quien se encarga de exportar el producto final. Establecida en 1989, Cafinter ha estado exportando para Costa Rica durante diez años, ofreciendo una gran variedad de calidades de café.

La planta Santa María, posee una capacidad para procesar 550 fanegas diarias. Opera durante 8 meses al año, en un período que se extiende desde agosto a marzo del año siguiente, en este momento cuenta con 30 empleados fijos y durante la época pico de cosecha se contratan aproximadamente 50 personas. Esta empresa significa una importante fuente de empleo, además del apoyo que le brinda al productor cafetalero de la zona.

4.2. Proceso de Beneficiado de Café en la Planta Santa María, Beneficio F.J. Orlich.

El café en fruta que llega a la planta de proceso se inspecciona y se somete a un control de cantidad de grano que ingresa, el cual se deposita en sifones de 150 y 250 fanegas (1 fanega equivale a 46 kg de café oro), los sifones se llenan con agua limpia proveniente del Río Jucó, para separar el café de mala calidad por flotación, ya que el mejor café pesa más y por lo tanto tiende a sedimentar, el grano de calidad inferior continuará un proceso separado del café de mayor calidad.

El café sale de los sifones a través de canales, pasa a través de los despedradores (canales) con ayuda de agua, con el fin de eliminar cualquier piedra u otro objeto pesado que pueda dañar las máquinas. Luego es bombeado hasta los despulpadores conocidos en nuestro país como “chancadores”. El despulpado se realiza en seco, la pulpa se separa y es depositada en fosas para su descomposición y posterior uso como abono orgánico, regularmente se añade carbonato de calcio a los depósitos de brosa para controlar el olor.

El café pasa a unas cribas que consisten en cilindros rotatorios con rejillas donde el fruto verde, que no ha sido despulpado, es separado por un proceso centrífugo en el cual el café maduro ya despulpado sale a través de las rejillas y pasa a la etapa de desmucilaginado y el verde se queda para luego pasar a chancadores que someten el grano a un proceso de despulpado más fuerte para garantizar la remoción de la pulpa. El café verde también lleva un proceso aparte cotizándose en el mercado con un menor valor.

El café despulpado pasa a unas pilas donde se da un proceso de fermentación con el fin de desprender el mucílago en forma natural mediante los microorganismos presentes en el agua, el aire y las pilas de fermentación, además de una pectinasa presente naturalmente en el grano. El tiempo que dura aquí puede variar entre 6 y 24 horas.

Una vez que en las pilas se puede observar una nata flotante, se toman los granos de café y se verifica el contenido de mucílago frotando unos contra otros, si este cruje quiere decir que ya se desprendió el mucílago.

El café pasa a través de canoas con agua para ser lavado quedando el mucílago en las pilas. Para terminar con la eliminación del mucílago, el café pasa por desmucilagadoras mecánicas tipo ELMU que limpian el café por medio de un movimiento centrífugo, en este caso el grano se descarga junto con las mieles por lo que de ahí pasa a un proceso de lavado posterior en el “caño colombiano”, donde además se realiza otra clasificación, por peso del grano.*

* El “caño colombiano”, es una especie de canoa por donde el café pasa movilizado por agua, en él se encuentran unas trampas que separan el café por medio de gravedad, el café de mejor

Posteriormente, se coloca en tolvas de presecado donde permanece durante unas 4 a 6 horas sometido a temperaturas que oscilan entre 50°C y 60 °C. La máquina presecadora tiene una capacidad de 150 fanegas de café. El horno es alimentado utilizando leña y el pergamino o “cascarilla” de café. Entre mayor tiempo permanezca en la presecadora disminuye el tiempo de secado pero también disminuye la calidad del café.

El café es transportado en forma mecánica hasta 8 máquinas secadoras cilíndricas con capacidad aproximada de 60 quintales (46 kg de café oro), es secado a 60°C durante 25 a 30 horas hasta una una humedad de 11%. Luego se enfría colocándolo en el suelo por 2 ó 3 horas y de ahí es llevado a los silos donde se almacena con cascarilla para evitar daños del grano.

De los silos se recoge el café y se pasa a máquinas que le quitan la cascarilla, posteriormente el grano es clasificado por tamaño. El café de mejor calidad pasa a una máquina gravitacional que clasifica el café por peso. El café para exportación se almacena en sacos.

El proceso total dura entre 35 a 40 horas si se procesa un lote de 60 quintales.

calidad que tiene mayor peso cae en la primera trampa, el de menor calidad continua y cae en una segunda o tercer trampa.

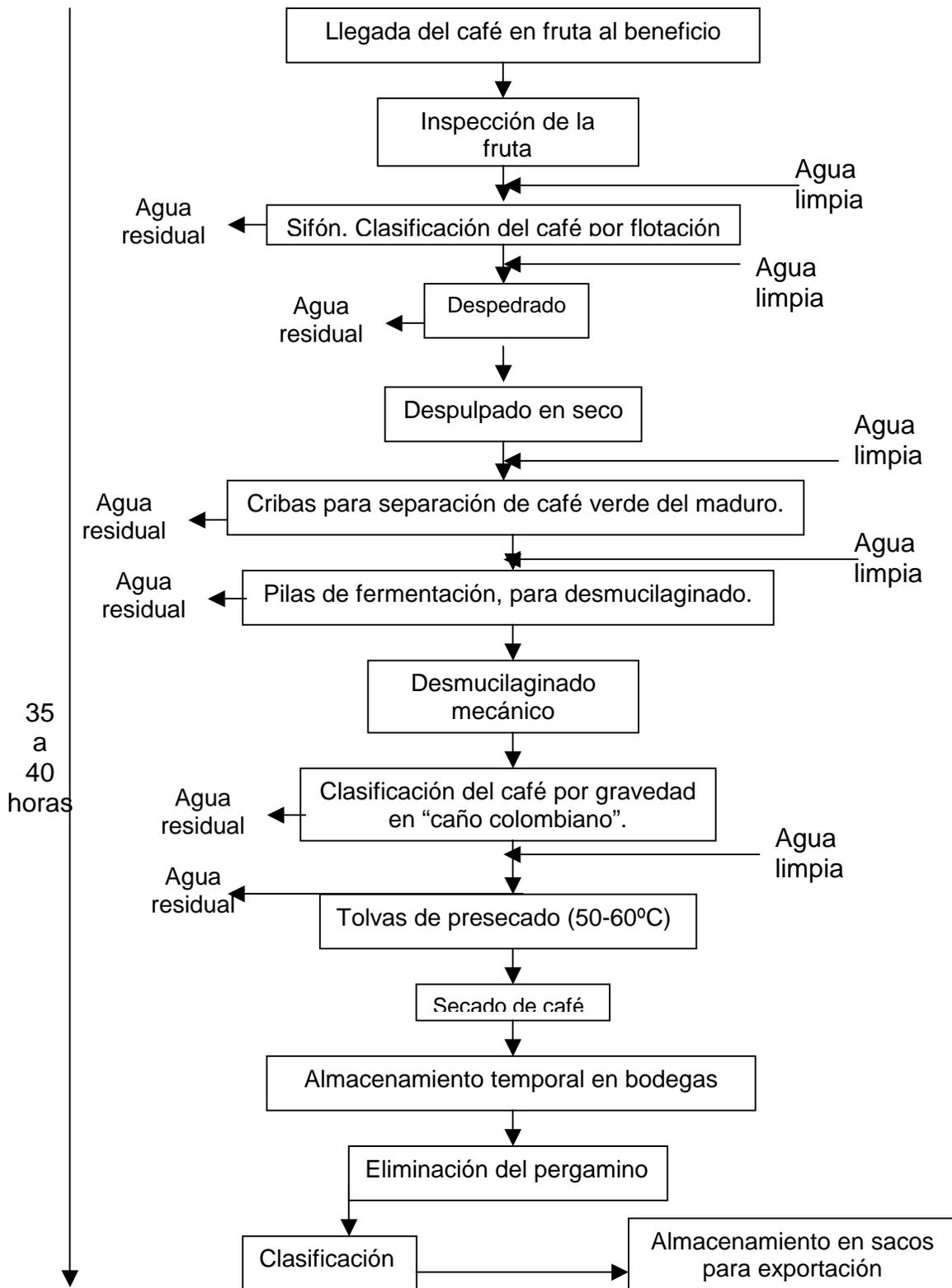


Figura 1. Diagrama general de operación del proceso de beneficiado de café en la planta Santa María, Beneficio F.J. Orlich.

5. REVISIÓN DE LITERATURA.

5.1. Proceso de Estabilización Anaerobio.

El tratamiento anaerobio comprende una serie de reacciones de digestión y fermentación que llevan a cabo diferentes especies bacterianas. Dicha descomposición suele emplearse en el tratamiento de materiales que tienen mucha materia orgánica insoluble, tal como fibra y celulosa o residuos industriales concentrados (Madigan *et al*, 1999).

En el proceso anaerobio se degradan los compuestos orgánicos a productos con un alto contenido de energía (metano, alcohol etílico, etc.) Este fenómeno involucra procesos metabólicos que son menos eficientes que el metabolismo aerobio. Los organismos anaeróbicos casi siempre liberan materia orgánica rica en energía del sustrato, lo que indica que estos no utilizan toda la energía potencial que reciben (Wasser, 1995).

Bajo condiciones anaeróbicas la conversión proporciona relativamente poca energía a los microorganismos y su tasa de crecimiento no es muy alta. Solo una pequeña parte de la materia orgánica se convierte en nuevas células, siendo la mayor parte degradada a metano y dióxido de carbono, principalmente (Wasser, 1995).

Algunas ventajas para el tratamiento anaerobio se enumeran a continuación:

- En el caso de reactores anaerobios, la baja producción de materia celular minimiza la cantidad de lodo que debe ser eliminado.

- La liberación de productos metabólicos ricos en energía que pueden ser utilizados como sustitutos de fuentes convencionales de energía.
- Provee un alto grado de estabilización de la materia orgánica.

Las cuatro etapas principales del proceso anaerobio se ilustran en la figura 2 (pág. 14) y se describen a continuación (Wasser, 1995).

ETAPA I. Hidrólisis: en esta fase la materia orgánica compleja (carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa, etc), es transformada por un grupo específico de microorganismos hasta compuestos orgánicos más simples, las grandes moléculas son hidrolizadas por enzimas extracelulares, debido a que son demasiado grandes para penetrar por la membrana celular, estos compuestos poliméricos son hidrolizados hasta monómeros tales como: azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos y ésteres, los que atraviesan fácilmente la membrana celular de las bacterias fermentativas.

ETAPA II. Acidogénesis: las bacterias fermentativas metabolizan dentro de la célula los anteriores monómeros. Generalmente, solo una pequeña cantidad de la energía potencial en la materia orgánica es utilizada para la fermentación. Una gran porción de la misma (cerca del 80%) es excretada fuera de la célula en forma de alcoholes, ácidos grasos volátiles y gas hidrógeno. En el caso de las lagunas de oxidación de las aguas residuales agroindustriales (por ejemplo, aguas de café), los productos principales de la fermentación son los ácidos grasos (ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico). El resultado total de la fermentación es la conversión de sustratos neutros, tales como azúcares y aminoácidos en ácidos orgánicos relativamente fuertes.

ETAPA III. Acetogénesis: los productos de la fermentación no son sustratos directos de las bacterias metanogénicas. En esta etapa aparecen las bacterias acetogénicas que toman estos compuestos y los introducen a sus células, oxidándolos anaeróbicamente hasta ácido acético y gas hidrógeno los cuales son excretados fuera de la célula. Por lo tanto una parte del ácido acético e hidrógeno producidos proviene de la acidogénesis y otra de la acetogénesis.

ETAPA IV. Metanogénesis: ambos compuestos son tomados por las bacterias metanogénicas y metabolizados a metano (CH_4), que a su vez es excretado fuera de la célula.

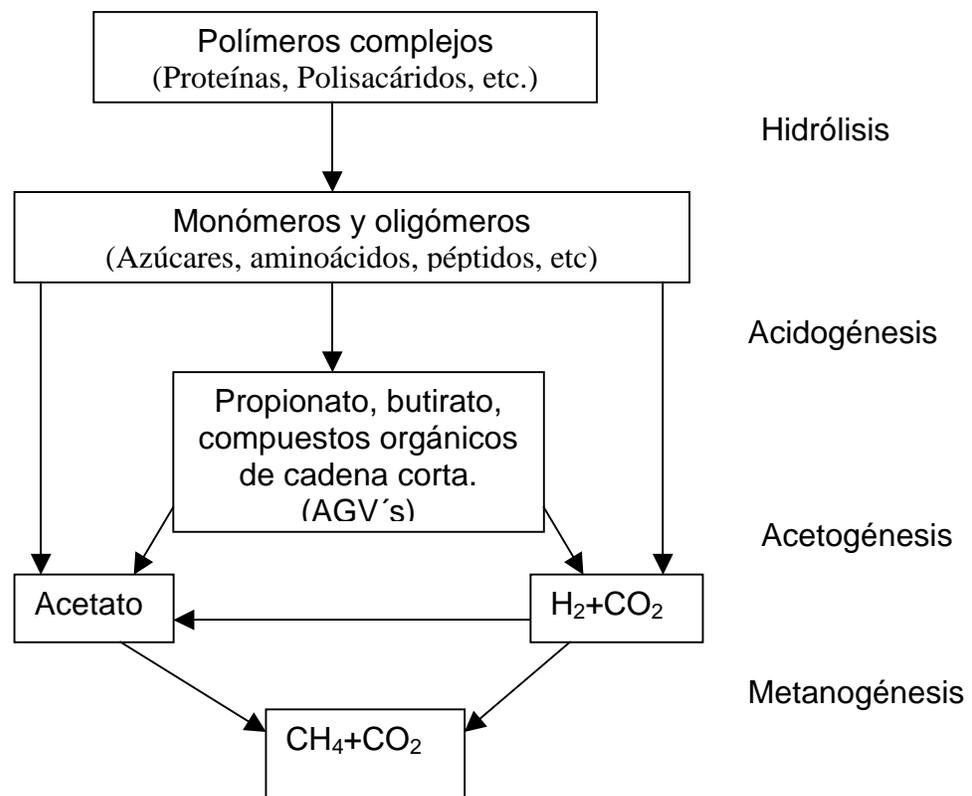


Figura 2. Etapas de descomposición del sustrato en un proceso anaerobio (Wasser, 1995).

5.2. Parámetros que Rigen el Proceso Anaerobio.

5.2.1. Temperatura.

Es el parámetro esencial en la digestión anaerobia. Conforme aumenta la temperatura, las reacciones biológicas son más rápidas, hasta una temperatura máxima, lo que reduce los tiempos de retención y aumenta la eficiencia del proceso. Existen tres niveles de temperatura: psicrófila (0-20°C), mesófila (20-45°C), termófila (45-65°C) (Ulloa, 1993). Los cambios de temperatura en el ambiente mesofílico pueden ser normalmente tolerados, pero es necesario que si la temperatura desciende la carga que ingrese al sistema también debe ser disminuida ya que hay un descenso de la actividad bacteriana (Wasser, 1995).

Como el calor específico del agua es mayor que el del aire, las temperaturas de las aguas residuales son más altas que las temperaturas locales del aire (temperatura ambiental) durante la mayor parte del año y solo son más bajas durante los meses más cálidos del verano. (Deloya, 1989.) Este es un parámetro importante de considerar ya que afecta directamente la eficiencia con la que se llevan a cabo los procesos biológicos en el agua residual, además de permitir la proliferación de ciertos microorganismos dependiendo del rango de temperatura en el cual se encuentre el sistema. En la figura 3 (pág.16), se representa el incremento en la actividad de las bacterias metanogénicas de acuerdo al incremento en la temperatura. La actividad de las bacterias metanogénicas se multiplica con un factor aproximadamente de 2.5 cada 10°C (Wasser, 1996).

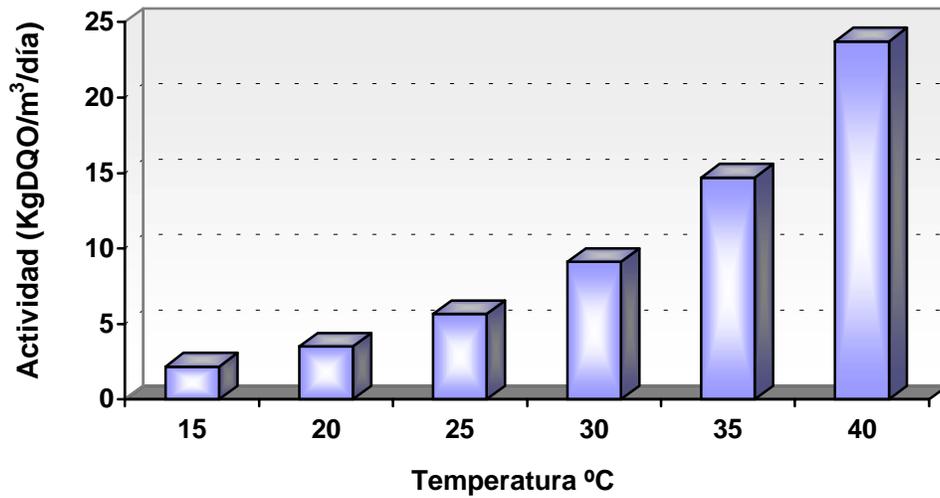


Figura 3. Comportamiento de la Actividad metanogénica en relación con la temperatura.

5.2.2. Anaerobiosis.

Las bacterias metanogénicas son estrictamente anaerobias, razón por la cual es fundamental mantener la ausencia de oxígeno, para el caso de las lagunas esto se puede obtener con la profundidad adecuada (4 m aproximadamente) y una elevada carga orgánica.

5.2.3. Potencial de Hidrógeno (pH).

El pH óptimo para la digestión anaerobia se encuentra entre 6.8 a 7.5. En condiciones más ácidas el proceso se detiene. (Ulloa, 1993) Un valor de pH inferior a 6.0 inhibe el crecimiento y actividad de las bacterias metanogénicas. Por otra parte las bacterias fermentativas son aún activas hasta un pH de 4.5. Si no se añade un factor alcalino para neutralizar los ácidos, el sistema se convertirá en un sistema de acidificación, obteniéndose un pH en el efluente próximo a 4.5-5.0. La actividad de las bacterias metanogénicas también disminuye si el pH está por encima de 7.5 (Wasser, 1995).

5.2.4. Nutrientes.

La digestión anaerobia, por ser un proceso biológico requiere ciertos nutrientes inorgánicos esenciales para el crecimiento. En ausencia de estos nutrientes el crecimiento será limitado.

Las bacterias metanogénicas contienen los nutrientes esenciales normales, tales como nitrógeno, fósforo y azufre, pero algunos micronutrientes, tales como níquel, hierro y cobalto, están presentes en concentraciones más altas que en otros organismos, lo cual indica un requerimiento particular de estos micronutrientes por las bacterias metanogénicas (Wasser, 1995). La composición inorgánica de dichas bacterias se detalla en el cuadro 1.

Cuadro 1. Composición elemental de las bacterias metanogénicas.

MACRONUTRIENTE	CONCENTRACIÓN (mg/kg células)	MICRONUTRIENTE	CONCENTRACIÓN (mg/kg células)
Nitrógeno	65 000	Hierro	1 800
Fósforo	15 000	Niquel	100
Potasio	10 000	Cobalto	75
Sulfuro	10 000	Molibdeno	60
Calcio	4 000	Zinc	60
Magnesio	3 000	Manganeso	20
		Cobre	10

Fuente: Wasser, 1995.

5.2.5. Compuestos tóxicos.

Estos actúan como inhibidores del proceso. Los iones metálicos y los compuestos organoclorados son tóxicos en pequeñas concentraciones. (Ulloa, 1993)

Los compuestos clorados son muy tóxicos para las bacterias metanogénicas. Los mas tóxicos, aún a muy bajas concentraciones (menores que 1 mg/L) son aquellos que tienen una estructura similar a la del CH₄, como el CCl₄, el CH₂Cl₂ y el CH₃Cl (Wasser, 1995).

El cianuro es menos tóxico para el resto de los microorganismos anaerobios, no así para las bacterias metanogénicas. Si la concentración es muy alta puede ocurrir adaptación del lodo, pero esta se pierde si se suspende el contacto del cianuro con el lodo.

El formaldehído puede desnaturalizar proteínas y en altas concentraciones puede hacer fallar un reactor anaerobio, este se puede remover mediante un sistema aerobio, o aplicar altas temperaturas y subir el pH para transformarlo en azúcar y/o una mezcla de formato y metanos (Wasser, 1995).

El sulfito no puede exceder los 100 mg/L, pero puede ser transformado por bacterias sulfato-reductoras a H₂S, que es menos tóxico.

El oxígeno se considera muy toxico para las bacterias productoras del metano, que son anaerobios obligados, su presencia puede ocasionar disminución de la actividad metanogénica del lodo y poco crecimiento de la biomasa (Wasser, 1995).

Los ácidos grasos volátiles (AGV's) son tóxicos solo en su forma no ionizada. A un pH entre 7 y 8 se encuentran mayoritariamente en su forma ionizada, si el pH disminuye estos se disocian e inhiben la metanogénesis.

5.3. Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

En el filtro biológico, se coloca una materia de relleno sobre la cual crece una película de microorganismos anaerobios con aspecto de limo. El material de relleno más utilizado son piedras, que se ubican en orden, de modo que las de mayor tamaño se ubican en la parte más baja, luego sigue una de menor tamaño, hasta concluir con piedra cuartilla (Rigola, 1999).

El proceso de degradación anaerobia transforma la materia orgánica en gas carbónico, metano, agua y biomasa. La producción de biomasa es significativamente menor cuando se compara a los procesos aerobios pues la tasa de crecimiento de los microorganismos anaerobios es baja. La energía potencial del residuo va en parte para la biomasa y en parte para el metano. Por lo tanto el contenido energético existente en el biogás puede ser utilizado en sustitución de combustibles fósiles reduciendo el consumo de estos y el consecuente aumento de la concentración de CO₂, ya que el CO₂ producido en la combustión del metano recuperado se considera, para fines del inventario, como de ciclo cerrado.

En general pueden se pueden nombrar las siguientes ventajas de los filtros anaerobios (Meza, 2001.):

- La puesta en marcha puede ser muy rápida
- Los filtros son muy estables frente a sobrecargas, tanto hidráulicas como orgánicas
- Debido a la inmovilización de biomasa se pueden alcanzar cargas orgánicas muy elevadas
- La pérdida de biomasa anaerobia activa del filtro es menor que en otros sistemas.

El agua ingresa al filtro en forma continua o intermitente y permanece en su interior durante períodos de tiempo variables, este sistema presenta la ventaja de que el fango estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido de materia orgánica y patógenos, y no es putrescible. (Metcalf y Eddy, 1996.) El agua ingresa por la parte inferior de filtro, el flujo del sustrato es ascendente lo que favorece una retención importante de la biomasa. Luego pasa a través de un medio filtrante (piedra, plástico), donde entra en contacto con una película de bacterias anaerobias que se encuentran adheridas en el lecho filtrante, al estar las bacterias fijas se logra la disminución del arrastre de biomasa, estas se encargan de estabilizar la materia orgánica presente en el agua residual. El lodo estabilizado se deposita en el fondo del filtro, y el agua residual filtrada se extrae por arriba del mismo. El gas producido durante la digestión anaerobia se deposita en la parte superior del filtro. En la figura 4 se presenta un esquema de un FAFA.

Los parámetros típicos de operación para un filtro anaerobio, de acuerdo con Metcalf y Eddy, (1996) son:

- DQO de entrada: 10.000 a 20.000 mg/L.
- Tiempo de retención hidráulica: 24-48 horas.
- Carga orgánica: 0.96-4.80 g DQO/L·día
- Porcentaje de eliminación de DQO: 75-85%

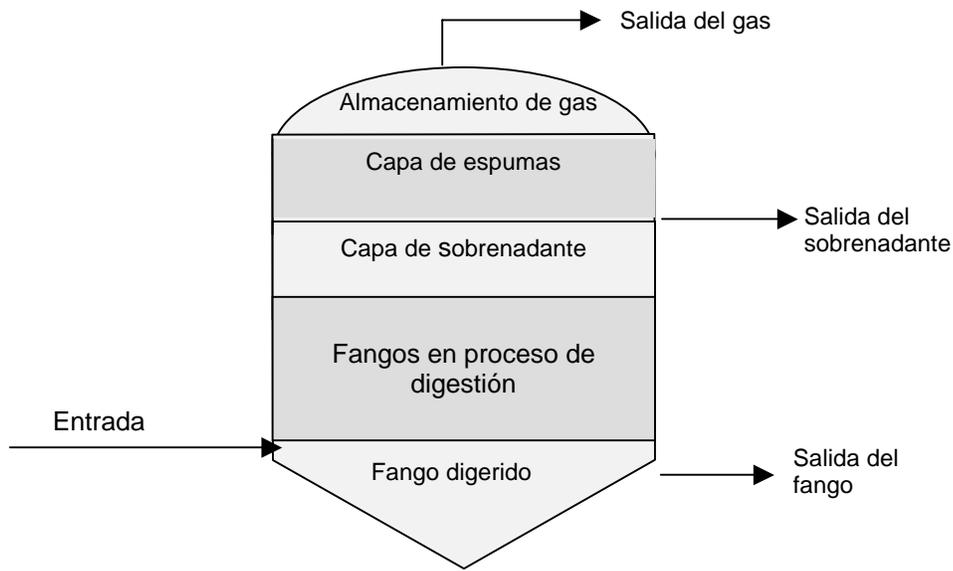


Figura 4. Esquema representativo del funcionamiento general de un filtro anaerobio de flujo ascendente.

5.4. Sistema de tratamiento de aguas residuales mediante el empleo de lagunas de estabilización.

Se reconoce generalmente que el tratamiento biológico en alguna de sus formas es la solución más económica en la mayoría de las aguas industriales. Las lagunas de estabilización son la solución más adecuada para lugares donde el suelo no es caro, las cargas orgánicas fluctúan y existen restricciones económicas. Una inspección de costos demuestra que es considerablemente más barato tratar aguas residuales en estanques de estabilización que por cualquier otro procedimiento, siempre y cuando el costo del terreno no sea la limitante (Gloyna, 1973).

El costo de la reducción del contenido putrescible del agua residual en lagunas de estabilización es usualmente menos de la mitad que el de otros medios de tratamiento (Gloyna, 1973).

Fair *et al*, (1993), definen las lagunas de estabilización como estructuras sencillas de tierra abiertas al sol y al aire. Según Gloyna, (1973), la laguna de estabilización, corresponde a cualquier laguna o grupo de ellas previsto y proyectado para llevar a cabo un tratamiento biológico. Las lagunas de estabilización se pueden clasificar de varias formas, pero de acuerdo a su contenido de oxígeno se tienen la siguiente clasificación:

- Lagunas aeróbicas: son aquellas en las que sustancias degradables suspendidas y disueltas se estabilizan por las poblaciones aeróbicas microbianas abastecidas de oxígeno necesario mediante la fotosíntesis de las algas, así como por la transferencia de gas en la superficie de la laguna, algunas veces con el soporte de aireación mecánica o difundida.
- Lagunas anaerobias: son aquellas en las que las sustancias degradables se estabilizan por poblaciones microbianas anaeróbicas en ausencia continua de Oxígeno disuelto (OD). (Fair, et al, 1993)
- Lagunas facultativas: en este caso pueden encontrarse organismos aerobios, facultativos y anaerobios, ya que, posee una zona aerobia superior (mantenida por las algas), la zona central posee bacterias facultativas y una zona de fangos en el fondo que es anaerobia (Gloyna, 1973).

5.4.2. Lagunas de estabilización anaerobia.

Las lagunas anaerobias son bastante profundas (de 2.5 a 6 metros de profundidad), además, manejan altas cargas orgánicas de tal manera que se mantienen las condiciones anaeróbicas a través de toda su profundidad. La capa superficial, aunque limite con el exterior casi no tiene OD, ya que, la carga es tan elevada que este se consume inmediatamente.

De acuerdo con Cléves, (1995), este tipo de lagunas se consideran verdaderos digestores anaerobios de bajo costo. Las altas temperaturas y el efecto de la gran área expuesta, propician la evaporación y aceleran los procesos biológicos.

La principal desventaja de las lagunas anaerobias es la posibilidad de que se produzcan malos olores, pero estos se pueden controlar manteniendo las lagunas bajo condiciones alcalinas. En estos casos, el ácido sulfhídrico permanece en solución como ion sulfhidrato (Fair *et al*, 1993). El uso de agentes alcalinos además, asegura una suficiente capacidad de amortiguación al proceso, lo cual es muy necesario en las aguas de café, que son bastante ácidas; siempre y cuando se agregue la cantidad adecuada.

Wasser, (1995), afirma que se han encontrado problemas de bajo rendimiento de descontaminación y de acidificación, probablemente por el limitado contacto entre el lodo metanogénicamente activo y la masa líquida, por lo que no se recomienda el uso de lagunas en el tratamiento de aguas residuales del café, sin embargo, esto puede ser corregido modificando el tiempo de retención de modo que sea mayor y permita un buen contacto entre la biomasa y el agua residual. El pH se puede regular con la adición de agentes alcalinos, como se mencionó anteriormente. Se pueden obtener muy buenos resultados con este tipo de sistema, mientras se mantengan y controlen las condiciones que este demanda.

5.5. Características de las Aguas Residuales del Beneficiado de Café.

La contaminación que genera el proceso de beneficiado húmedo se debe principalmente a la pulpa que representa aproximadamente un 46% del peso del fruto, y al mucílago que equivale a un 11%. La extracción de la pulpa utilizando agua favorece la extracción de materia orgánica (Blanco y Perera, 1999). Dicha materia orgánica pasa a formar parte del agua residual lo cual hace que aumente su DBO.

Las aguas de despulpado contienen alta concentración de sólidos sedimentables, azúcares y otros materiales solubles, en tanto que las aguas fermentadas contienen geles coloidales de pectinas y de otros productos removidos por la fermentación del café (Morales, 1979).

La principal dificultad para el tratamiento de las aguas de despulpado es su alto poder contaminante y se necesita un sistema de tratamiento que logre un alto porcentaje de reducción de la carga orgánica para obtener un efluente satisfactorio. Entre más prolongado e intenso sea el contacto entre la pulpa, el agua y los equipos, mayor será la transferencia de sólidos provenientes de la pulpa, hacia el medio líquido que la transporta. Lo anterior implica una mayor carga orgánica en las aguas de desecho al mismo tiempo que una pérdida de las cualidades de la pulpa como subproducto. (Cléves, 1995.)

La pulpa consiste principalmente de: celulosa, azúcares y compuestos polifenólicos como la cafeína, los taninos y los ácidos húmicos. El agua de despulpado contiene todos estos elementos pero en general contiene poca celulosa ya que ésta se elimina en el separador de pulpa y agua. El agua de lavado, que se origina del lavado del mucílago del grano del café contiene: pectina, celulosa y azúcares, que son los principales componentes del mucílago (Wasser, 1996).

El despulpado en seco ofrece una alternativa para reducir radicalmente la contaminación del agua, de igual modo permite mayor recirculación del agua.

6. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS CONSIDERADOS PARA EVALUAR EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA PLANTA SANTA MARÍA, BENEFICIO F.J. ORLICH.

6.1. Turbiedad.

Es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos, que se presentan principalmente en aguas superficiales. Estos son difíciles de decantar y filtrar. Sin embargo esta se puede eliminar por procesos de coagulación, decantación y filtración. (Rigola, 1999.)

No es un parámetro normado a nivel nacional pero se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La medición de la turbiedad se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones, la materia coloidal va a dispersar la luz, impidiendo su transmisión. (Metcalf y Eddy, 1996.)

El problema con la alta turbiedad en las aguas reside en que al obstaculizar el paso de la luz limita el proceso fotosintético, que se da naturalmente en los cuerpos de agua.

6.2. Olor.

Si no se utiliza algún equipo especial su determinación es muy subjetiva, sin embargo, es de mucho interés, especialmente si el sistema de tratamiento de aguas residuales se encuentra cerca de zonas pobladas.

Normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene olor peculiar, algo desagradable pero resulta más tolerable que el agua residual séptica. Los olores pueden medirse con métodos sensoriales, mientras que las concentraciones de olores específicos pueden determinarse con métodos instrumentales. Uno de los productos de la descomposición anaerobia es el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual es el principal generador de olores y se genera durante la descomposición de la materia orgánica que contiene azufre, por ejemplo, las proteínas (Metcalf y Eddy, 1996).

En general, la producción de olores es inevitable. Incluso, podría decirse que este solo representa un problema cuando sale de los límites de la planta.

6.3. Caudal.

La medida del caudal sirve para verificar la cantidad de agua residual que entra al sistema, a fin de determinar si es la adecuada de acuerdo al diseño del mismo. En el caso de una laguna anaerobia, si la cantidad de agua que entra al sistema no es la suficiente esta podría manifestar condiciones de aerobiosis. Si por el contrario el caudal es excesivo el sistema no tendría la capacidad y el tiempo suficiente para tratar el agua, por lo que la calidad, del efluente sería muy baja.

6.4. Sólidos.

Los particulados orgánicos e inorgánicos en las aguas residuales son sólidos sedimentables, flotantes y en suspensión capaces de formar depósitos de aspecto desagradable y bancos de lodo olorosos y de reducir la penetración de luz en el agua. Los sólidos son utilizados para evaluar el nivel de contaminación existente en las aguas residuales, de igual forma, sirven para determinar la eficiencia de un sistema de tratamiento. Existen varios tipos de sólidos, para el presente proyecto interesan los siguientes:

6.4.1. Sólidos sedimentables. (SSed)

Son los sólidos en suspensión que sedimentan bajo ciertas condiciones sin agitación ni movimiento, por acción de la gravedad (Deloya, 1989).

Para medir los sólidos sedimentables se utiliza el cono "Imhoff", que consiste de un recipiente en forma cónica y posee una capacidad de un litro, en el cual se coloca 1 litro de agua residual, previamente agitada, se esperan 45 minutos al cabo de los cuales se raspan las paredes del cono con una varilla de vidrio, se esperan 15 minutos más, finalmente se observa la cantidad de sólidos que han sedimentado y se reporta el valor respectivo en unidades de mililitros por litro (mL/L).

6.4.2. Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Se denominan también como sólidos no filtrables. Este tipo de sólidos son los que quedan retenidos en el papel filtro después de filtrar la muestra y secar el papel a 103°C por un período aproximado de 12 a 15 horas. Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.

6.4.3. Sólidos Volátiles (SV)

Son los sólidos obtenidos después de calentar una muestra a $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$, a esta temperatura la fracción orgánica se oxidará y desaparecerá en forma de gas quedando la fracción inorgánica en forma de cenizas. La fracción orgánica que se oxida se denomina como “sólidos volátiles”, y la fracción inorgánica que queda se le denomina “sólidos fijos”, de los sólidos en suspensión. El análisis de los sólidos volátiles se emplea habitualmente para determinar la estabilidad biológica de fangos de aguas residuales.

6.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

Es la cantidad de oxígeno disuelto requerida por los microorganismos para oxidar la materia orgánica, en un período de tiempo determinado. Este parámetro es muy utilizado, ya que, cuantifica la cantidad de materia orgánica contenida en el agua.

Para análisis de laboratorio se utiliza la DBO_5 , que consiste en la determinación del oxígeno consumido por los microorganismos en un intervalo de tiempo de cinco días a $20^{\circ}C$. Generalmente se reporta en miligramos por litro (mg/L) (Deloya, 1989.)

La oxidación biológica es un proceso lento, cuya duración es, en teoría, infinita. En un período de 20 días se completa la oxidación del 95 al 99% de la materia carbonosa y en los 5 días que dura el ensayo, se llega a oxidar entre el 60 y 70%. Se asume la temperatura de $20^{\circ}C$ como un valor medio representativo de la temperatura que se da en los cursos de agua que circulan a baja velocidad en climas suaves (Metcalf y Eddy, 1996).

6.6. Demanda Química de Oxígeno. (DQO)

Mide la cantidad de oxígeno consumido por un agente oxidante químico, (dicromato o permanganato de potasio) para degradar la materia orgánica e inorgánica contenida en el agua, en un medio ácido. También se reporta en mg/L.

El ensayo debe hacerse a elevadas temperaturas. Para facilitar la oxidación de determinados tipos de compuestos orgánicos es preciso emplear un catalizador (por ejemplo el sulfato de plata) puesto que algunos compuesto orgánicos interfieren con el normal desarrollo del ensayo. La DQO de un agua residual suele ser mayor que su correspondiente DBO, siendo esto debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por vía biológica (Metcalf y Eddy, 1996).

6.7. Ácidos Grasos Volátiles (AGV).

Son los productos intermedios de la digestión anaerobia, son el resultado de la acidogénesis y la acetogénesis en el proceso anaerobio (Ver figura 2, pág 14).

Los ácidos grasos volátiles se consideran tóxicos en su forma no ionizada. A un pH dado existe un equilibrio entre las formas ionizadas ($A^- + H^+$) y las no ionizadas (HA). A los valores de pH generalmente deseados en un sistema anaerobio, los ácidos orgánicos están mayormente (>99%) en la forma ionizada (no tóxica). Cuando el pH disminuye, los AGV están en la forma menos disociada. A un pH de 5, los AGV están disociados en un 50% aproximadamente. (Wasser, 1995.) Los AGV's se expresan en miliequivalentes por litro (meq/L), y se recomienda que estos no sobrepasen los 8 meq/L.

6.8. Alcalinidad.

La alcalinidad es una medida de la capacidad del agua amortiguar cambios de pH. Contribuyen a la alcalinidad principalmente los iones bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}), e hidroxilo (OH^-). (Rigola, 1999.) En sistemas anaerobios debe existir una alcalinidad suficiente para que el pH no descienda de 6, que es el pH límite para la inhibición de las bacterias metanogénicas. Mientras que la digestión anaerobia prosiga con normalidad, la alcalinidad oscilará entre 1000 y 5000 mg/L (Metcalf y Eddy, 1996). Generalmente, esta se expresa en mg/L como carbonato de calcio.

6.9. Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto representa la cantidad de oxígeno contenido en un líquido. La solubilidad del oxígeno en aguas frescas, sin contaminación, es de 14.6 mg/L a 0 °C y de 7 mg/L a 35 °C ambas a una atmósfera de presión. La presencia de oxígeno disuelto en las aguas de desecho es importante porque previene o reduce el inicio de la putrefacción y la producción de malos olores. Esto se debe principalmente a que los microorganismos aerobios, utilizan el oxígeno disuelto para oxidar la materia orgánica presente en el agua residual, produciendo sustancias finales como CO₂ y agua, en cambio al no haber oxígeno disuelto en el agua, los microorganismos anaerobios realizan la oxidación utilizando el oxígeno que forma parte de la materia contenida en el agua para producir sustancias que generan mal olor como metano y ácido sulfhídrico. (Deloya, 1989.)

7. MICROBIOLOGÍA DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EL PROCESO ANAEROBIO.

La eliminación de la DBO carbonosa, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica se consiguen biológicamente gracias a la acción de una variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Los microorganismos se utilizan para convertir esta materia en diferentes gases y tejido celular. Dado que el tejido celular tiene un peso específico ligeramente mayor al del agua, se puede eliminar por decantación. En este estudio nos interesan solo dos grupos: las bacterias, como responsables de la depuración del agua residual, y las microalgas, como indicadores en el proceso de tratamiento.

7.1. Bacterias.

Sus tasas de metabolismo son elevadas y bajo las condiciones ambientales adecuadas, predominan sobre hongos y protozoos.

Las bacterias anaerobias degradan los compuestos orgánicos hasta productos con alto contenido de energía (metano), esto se debe a que estos procesos metabólicos son menos “eficientes” que los aerobios. Esta ineficiencia es una ventaja en los sistemas de tratamiento de aguas residuales que emplean procesos anaerobios, ya que al tener menos energía disponible para el crecimiento celular, se produce menos materia celular por unidad de sustrato consumido, lo que hace que la acumulación del lodo sea menor, además de liberar productos de alto contenido energético que pueden ser utilizados como

combustible. Pero debido a esto se deben incrementar los tiempos de retención para que el tratamiento sea eficiente y que el agua residual tenga el contacto suficiente con el lodo bacteriano presente.

El proceso anaerobio se lleva a cabo mediante la acción conjunta de diferentes grupos de bacterias. El proceso ya se explicó en el apartado 5.1. y se esquematiza en la figura 2.

Con objeto de mantener un sistema de tratamiento anaerobio que establezca correctamente el residuo orgánico, los microorganismos formadores de ácidos y de metano se deben encontrar en un estado de equilibrio dinámico. Para mantener dicho estado, el contenido del reactor deberá carecer de oxígeno disuelto y estar libre de concentraciones inhibitorias de constituyentes tales como los metales pesados y los sulfuros, además los valores los valores de pH deben ajustarse entre 6.6 y 7.6 (Metcalf y Eddy, 1996).

7.2. Algas.

Para el sistema de tratamiento anaerobio no son de interés, sin embargo, en el período en que la laguna presenta características de facultativa, hay un aumento de estos microorganismos. Estudiando su presencia o la reducción en su población se puede verificar el avance de la laguna de facultativa a anaerobio, además, las algas pueden presentar problemas en aguas superficiales puesto que pueden reproducirse rápidamente si las condiciones son favorables.

8. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA PLANTA DE PROCESO SANTA MARÍA.

La primer medida tomada para disminuir la carga del agua residual fue cambiar el sistema de despulpado con agua, por el despulpado en seco y transporte de la pulpa por sistemas no hidráulicos.

Antes de entrar al sistema de tratamiento, el agua pasa por un tamiz con el fin de eliminar sólidos de mayor tamaño y que puedan intervenir con el adecuado tratamiento. Una vez tamizada se realiza una dosificación de cal para neutralizar el pH y favorecer la floculación, luego pasa al filtro anaerobio de flujo ascendente. Los lodos son purgados a una laguna de lodos y el agua pasa a una laguna de oxidación anaerobia, antes de entrar a dicha laguna se hace una segunda dosificación de cal. En la figura 5 se esquematiza el sistema de tratamiento para aguas residuales de la planta Santa María.

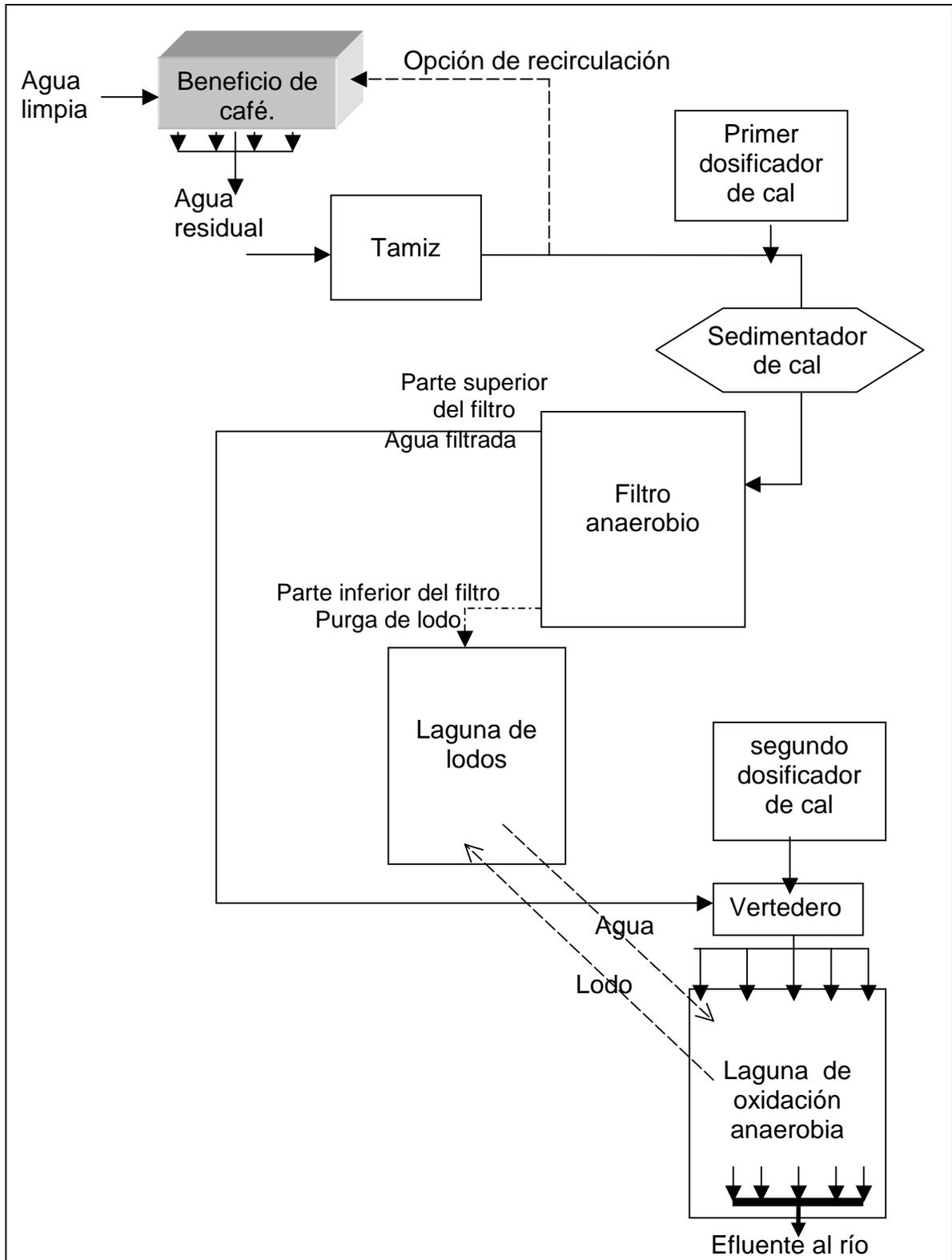


Figura 5. Diagrama del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Planta Santa María, Beneficio F.J. Orlich.

A continuación se detallan cada una de las unidades que componen este sistema:

8.1. Tamiz.

El agua de proceso es bombeada a un tamiz que corresponde a un tratamiento físico y es la primera operación unitaria en el sistema de tratamiento de aguas residuales de la planta Santa María. Cumple la función de separar los sólidos de mayor tamaño. Consiste de una placa perforada sobre la que se hace pasar el agua residual bruta, posee aberturas inferiores a los 15 milímetros. Con este tamiz se eliminan también parte de los sólidos finos y se mejora la calidad del afluente que ingresa al sistema ya que se eliminan cantidades sustanciales de espumas que pueden afectar el proceso.

8.2. Dosificadores de cal.

Los dosificadores de cal consisten de dos tanques con capacidad de 2 m³ cada uno, el primero se encuentra a la entrada del sistema, antes de que el agua ingrese al FAFA, el segundo se encuentra a la entrada de la laguna de oxidación. En el caso del primer dosificador de cal, este se encuentra dividido en dos tanques de 1 m³ cada uno. En la parte inferior del tanque se encuentra un tubo con una válvula que permite la salida de la solución de cal. Ambos dosificadores cuentan con un motor que provee agitación al agua, impidiendo que la cal sedimente.

Las dosificaciones de cal cumplen la función de neutralizar el agua residual que ingresa al sistema, además de prevenir descensos de pH dentro del filtro y de la laguna y contribuir a mantener la alcalinidad del sistema.

8.3. Trampa para sedimentos de cal.

La cal o hidróxido de calcio, presenta el problema de que es muy difícil de disolver en el agua y produce muchos sedimentos, especialmente con las aguas de lavado del café. Después del primer dosificador de cal hay una trampa de sedimentos que limita el paso de éstos al filtro anaerobio.

8.4. Filtro anaerobio de flujo ascendente. (FAFA)

Inicialmente este se construyó para funcionar como sedimentador primario, pero posteriormente se modificó y se convirtió en un filtro anaerobio de flujo ascendente. Tiene una capacidad de 420 m³. De acuerdo con la memoria de cálculo, para un caudal promedio de 17 m³/hora que ingrese al beneficio, el filtro tiene un tiempo de retención de 24 horas y para un caudal pico de 90 m³/hora se tiene un tiempo de retención de 4.7 horas.

El agua residual ingresa al filtro por la parte inferior y asciende pasando a través de un lecho de piedras de 1 metro de espesor, el lodo se sedimenta en la parte baja, cuya forma cónica, contribuye a dicho proceso, el agua filtrada se encuentra en la parte superior donde se extrae y pasa a la segunda etapa del tratamiento biológico. En la memoria de cálculo se indica que el lodo decantado en el fondo del filtro se debe extraer una vez por semana por medio de una válvula ubicada en la parte inferior del filtro que da a la laguna de lodos. La parte superior del filtro se encuentra sellada para limitar el escape de gases que produzcan mal olor. Cuando el gas acumulado es excesivo, se saca por una válvula y se quema.

En la memoria de cálculo se indican que las eficiencias mínimas esperadas para el sistema de tratamiento primario serán de:

- 30% de remoción de DQO.
- 30% de remoción de DBO.
- 50% de remoción de SST.

8.5. Laguna de Lodos.

Debido a la acumulación de lodo dentro del filtro anaerobio, es necesaria su evacuación periódica para evitar excesos que provoquen el lavado del lodo hacia la laguna de oxidación.

La laguna de lodos posee una capacidad de 300 m³ y su objetivo es digerir y estabilizar los lodos que son purgados del filtro. Al final de la cosecha se extraen parte de los lodos de la laguna de oxidación y se depositan en la laguna de lodos.

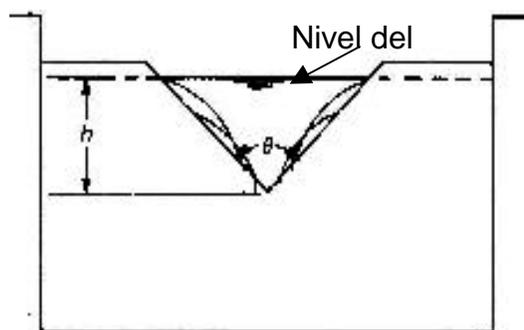
Debido a las lluvias y a que al purgar el lodo también hay pérdida de cierta cantidad de agua, en ocasiones la laguna se llena, cuando esto ocurre el agua superficial es bombeada hacia la laguna de oxidación. Esto produce un efecto positivo porque se diluye la carga orgánica que ingresa a la laguna de oxidación, lo que es favorable, ya que implica introducir un caudal de baja carga orgánica que puede ayudar a la laguna en los días en que la carga que ingresa es muy elevada.

Una vez que termina la cosecha, se extraen los lodos de la laguna y se disponen como abono orgánico en los cafetales que se encuentran dentro de las instalaciones del beneficio. Las características del lodo como olor, color y aspecto de humus indican que el lodo se encuentra estabilizado.

8.6. Vertedero.

A la entrada de la laguna de oxidación hay un vertedero, que es un dispositivo para la medición del caudal. Esto sirve para determinar la cantidad de agua que ingresa al sistema y la que se consume en la planta de proceso.

Este vertedero es de tipo Triangular, cuyo ángulo es de 90°, es un dispositivo sencillo y confiable para la medición del caudal. Con la altura (h) a la que llega el agua que pasa sobre el ángulo del vertedero se determina el caudal de entrada a la laguna de oxidación. En la figura 6, se presenta un esquema de un vertedero triangular.



Donde: θ : ángulo de 90°
 h : altura a la que

Figura 6. Diagrama representativo de un vertedero triangular.

8.7. Laguna de oxidación Anaerobia.

Como etapa final del sistema de tratamiento de aguas residuales, se encuentra la laguna de oxidación, diseñada para funcionar como laguna anaerobia para el refinamiento final del agua residual. Antes de ingresar a la laguna se aplica una solución de cal para estabilizar el pH, luego el caudal afluyente es dispersado por un tubo con varios orificios que cumple la función de multientradas de modo que el agua se distribuya más uniformemente en la laguna.

La laguna tiene las siguientes dimensiones: 35 metros de longitud, 26 metros de ancho y 4 metros de profundidad, y se espera que cumpla con un tiempo de retención de 9 días. La salida de la laguna de oxidación es la salida final y consiste de un tubo con varios orificios que cumple la función de multisalidas. El efluente del sistema se canaliza en un solo tubo que descarga el agua a una acequia que desemboca en el río Grande de Orosi.

9. METODOLOGÍA.

Las actividades se llevaron a cabo entre los meses de octubre del año 2001 al 14 de enero del 2002. Algunas pruebas se efectuaron directamente en campo y otras se realizaron en el laboratorio. Para esto se realizaron diferentes campañas de muestreo. El procedimiento para los muestreos y los análisis se detallan a continuación.

9.1. Determinación de caudal.

El caudal se determinó a la entrada de la laguna anaerobia mediante el uso de un vertedero triangular cuyo ángulo es de 90°. (Figura 6, pág. 43.)

9.2. Análisis físico-químicos realizados al sistema de tratamiento de aguas residuales de la planta Santa María, Beneficio F.J. Orlich.

Para los análisis correspondientes a la DQO, DBO y SST, se realizaron muestreos compuestos integrados de 4 horas en las primeras dos campañas y 5 horas en las últimas. Como puntos de muestreo se consideraron la entrada del sistema (después del tamiz), la entrada a la laguna, (que corresponde a la salida del filtro) y la salida del sistema (salida de la laguna de oxidación). Los análisis se realizaron tanto para aguas de lavado como para aguas de chancado. Las muestras se preservaron en hielo durante el transporte hasta el laboratorio (4 °C aproximadamente). Los análisis correspondientes a DBO y SST se realizaron en el Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) y el laboratorio certificado Lambda.

La DQO se realizó en el Laboratorio de Biología del ITCR, y en caso de no analizarse el mismo día, se preservó a pH 2 con ácido sulfúrico concentrado por no más de 18 días.

El pH y la temperatura se determinaron mediante muestreos simples cada hora cuatro días por semana, a la entrada del sistema (entrada del filtro), a la entrada de la laguna (salida del filtro) y a la salida del sistema (salida de la laguna de oxidación).

En el caso de los AGV's, se realizaron muestreos simples a la salida del filtro anaerobio y a la salida del sistema, estos análisis se realizaron el mismo día en que se tomaron las muestras, en los casos en que era necesario tomar las muestras en horas de la tarde, se colectaron lo más tarde posible (entre 6 y 8 de la noche), y se preservaron en refrigeración hasta la mañana siguiente en que se llevaron al laboratorio, para ser determinados por medio de valoración de pH. Las mismas muestras utilizadas para los análisis de AGV's se utilizaron para la determinación de la alcalinidad en el sistema.

Todos los análisis se realizaron según los métodos estándares para aguas y aguas residuales de la APHA-AWWA-WEF.

Para la determinación del OD, se tomaron muestras simples a la entrada del sistema, a la entrada de la laguna y a la salida del sistema. Se utilizó un medidor de oxígeno disuelto YSI modelo 59 con electrodo de membrana. La turbiedad se midió mediante el uso del espectrofotómetro DRL 2000, a una longitud de onda de 450 nanómetros.

9.3. Prueba de actividad metanogénica.

Se tomó una muestra de lodo del filtro y se le realizó un análisis de sólidos volátiles, para la determinación de la concentración del lodo y con base a esta, calcular la cantidad de lodo requerida para la prueba. El lodo se inoculó en una botella ambar junto con el sustrato a pH 7, y se aforó a dos litros. Se monitoreó el volumen de metano por día y el acumulado.

9.4. Pruebas de neutralización.

En el primer mes no fue necesario realizar las pruebas a la entrada del sistema de tratamiento, debido a que el pH del agua residual ingresaba entre 6 y 8, aproximadamente. Para el mes de diciembre el pH con que el agua ingresaba al sistema bajó, por lo que se hizo necesaria la determinación de cal requerida en esta parte. Las pruebas correspondientes a la entrada de la laguna 2 (que corresponde a la salida del filtro) se realizaron durante todo el tiempo que duró el proyecto, debido a que el pH era bajo.

Se tomaron tres litros de agua residual y se llevaron al laboratorio. En el laboratorio se preparó la cal tal como se prepara en el beneficio, a una concentración de 11.4 g/L para la entrada al sistema y 22.73 g/L para la entrada a la laguna, se tomó un litro de agua residual y se mantuvo en agitación mientras se agregaba poco a poco la solución de cal. Con el pHmetro se monitorearon los cambios de pH hasta que este llegó a 7.

9.5. Análisis al Microscópio.

Las observaciones microscópicas se hicieron utilizando muestras de la salida del sistema, además de realizar dos muestreos integrados en orilla de la laguna de oxidación, a una distancia de 1 m del borde a 7 m de distancia entre cada punto y una profundidad aproximada de 5 cm, no se realizó un muestreo en el centro de la laguna por limitaciones físicas.

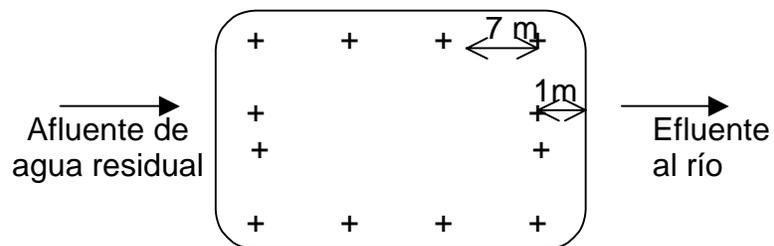


Figura 7. Puntos de muestreo para análisis microscópicos en la laguna de oxidación.

Las observaciones se dividieron en dos períodos, el primero en el mes de octubre y la primer semana de noviembre, cuando la carga orgánica que entra a la laguna es baja, y el segundo en la segunda y tercer semana de diciembre, durante el pico de cosecha, donde la carga orgánica aumenta.

También se hicieron dos muestreos integrados en la superficie de la laguna de lodos para observaciones microscópicas, cada punto ubicado a un metro del borde, a una distancia de tres metros entre cada punto en los siguientes puntos:

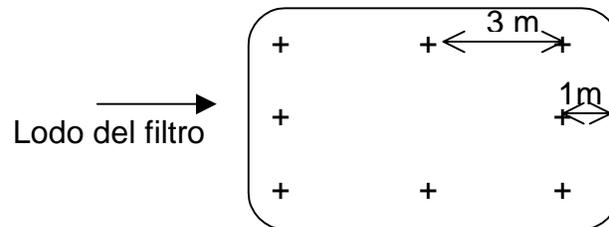


Figura 8. Puntos de muestreo para análisis microscópicas en la laguna de lodos

Por cada muestra analizada se realizaron tres ensayos microscópicos.

10. RESULTADOS.

A continuación se presentan los resultados de la evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales compuesto por un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y una laguna de oxidación anaerobia. Dichos resultados se obtuvieron a partir de las muestras tomadas a la entrada del sistema (influyente), a la entrada a la laguna de oxidación, que corresponde a la salida del filtro, y a la salida final del sistema (efluente), que corresponde a la salida de la laguna de oxidación.

10.1. Determinación de Caudal.

En la figura 9 se observa la variación de caudal conforme avanza el período de cosecha, en el cuadro 2 se observan las variaciones en el tiempo de retención de los componentes del sistema, el cual va a depender del caudal que ingresa al sistema, de este modo se puede determinar si este cumple con el tiempo de retención que se esperaba y para el cual fue diseñado.

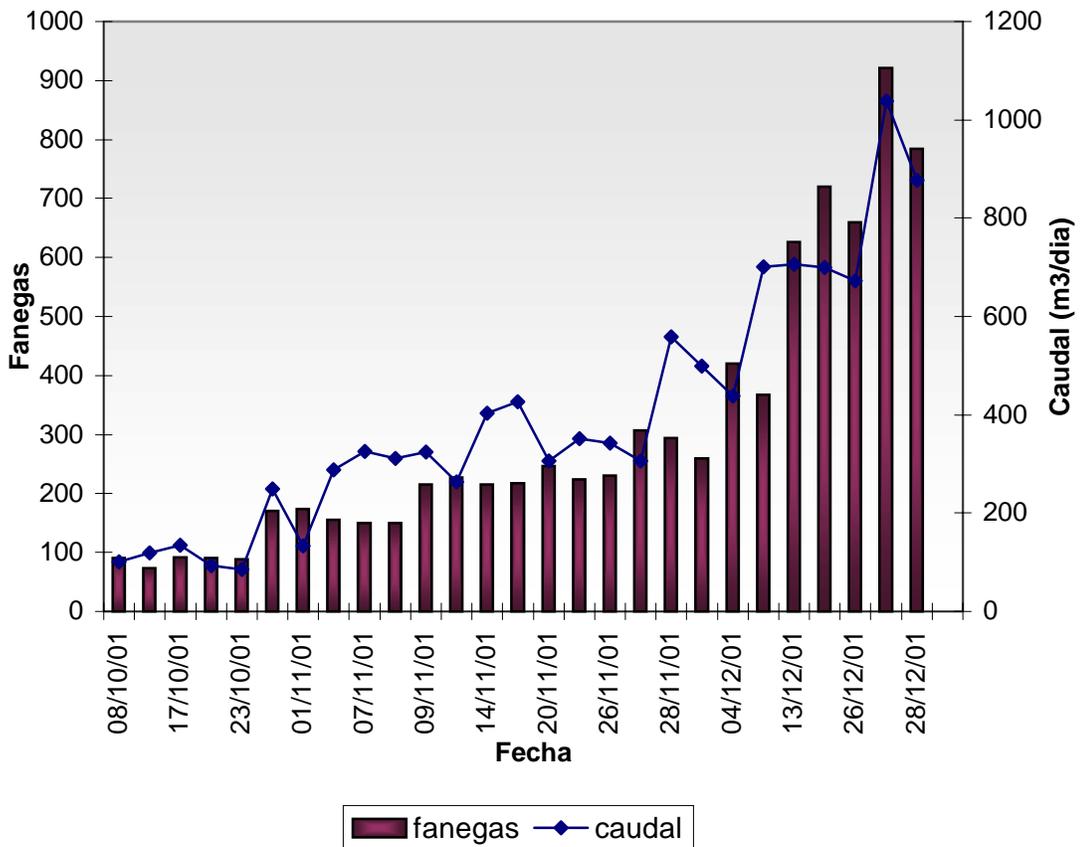


Figura 9. Caudal diario y fanegas procesadas en la Planta Santa María, durante los meses de octubre, noviembre y diciembre.

En el cuadro 2 se expresa el caudal y las fanegas diarias, mientras que en el cuadro 3 se muestra el promedio en tres períodos de cosecha, y el volumen de agua residual que se produce por fanega de chancado y el que se produce por fanega de lavado. No se calculó el agua que se consume en cuando se chanca y se lava al mismo tiempo, ya que durante el período en que se hizo el estudio, se separaban los procesos, iniciando el proceso de lavado en la mañana y el de chancado en la tarde. El cuadro 4 muestra el tiempo de retención (Tr) promedio para el filtro y para la laguna en tres períodos diferentes de cosecha.

Cuadro 2. Fanegas procesadas, caudal diario y tiempo de retención (Tr) en los diferentes componentes del sistema de tratamiento.

Fecha	Fanegas ingresadas	Horas de proceso	Caudal (m ³ /día)	Tr del filtro (días)	Tr laguna de oxidación (días)
8/10/01	90.0	3.2	101.4	4.1	35.9
16/10/01	73.0	3.0	118.4	3.5	30.7
17/10/01	92.0	3.0	134.2	3.1	27.1
19/10/01	90.0	3.0	93.6	4.5	39.0
23/10/01	88.0	2.5	85.4	4.9	42.6
30/10/01	170.0	6.0	249.0	1.7	14.6
1/11/01	174.0	3.0	133.0	3.2	27.4
6/11/01	155.0	7.0	287.8	1.5	12.6
7/11/01	149.5	8.0	326.0	1.3	11.2
8/11/01	149.5	8.0	312.0	1.3	11.7
9/11/01	215.5	9.0	324.0	1.3	11.2
13/11/01	227.0	8.5	263.4	1.6	13.8
14/11/01	215.0	8.5	404.0	1.0	9.0
15/11/01	218.0	8.0	427.0	1.0	8.5
20/11/01	247.0	9.5	307.0	1.4	11.9
22/11/01	224.0	9.5	352.0	1.2	10.3
26/11/01	231.0	8.5	343.0	1.2	10.6
27/11/01	307.0	9.0	307.0	1.4	11.8
28/11/01	294.0	14.0	558.0	0.7	6.5
29/11/01	260.0	13.5	499.5	0.8	7.3
4/12/01	420.5	15.0	438.0	1.0	8.3
5/12/01	367.0	18.5	701.0	0.6	5.2
13/12/01	626.0	20.0	706.0	0.6	5.2
21/12/01	720.0	22.0	699.0	0.6	5.2
26/12/01	660.0	24.0	672.0	0.6	5.4
27/12/01	921.0	23.0	1038.0	0.4	3.5
28/12/01	785.0	20.0	877.0	0.5	4.2
2/01/02	887.0	21.0	816.0	0.5	4.5
3/01/02	1010.0	24.0	917.4	0.5	4.0
8/01/02	932.0	24.0	865.0	0.5	4.2

Cuadro 3. Caudal promedio y volumen de agua residual producida por fanega en diferentes períodos de cosecha.

Período	Caudal prom. m ³ /día	Caudal prom. m ³ /fan lavado	Caudal prom. m ³ /fan. chancado
8 oct-13 nov. 01	202.4	1.03	0.92
14 nov-4 dic. 01	404	0.93	0.98
5 dic 01-8 ene 02.	810.15	0.57	0.66
Caudal promedio (m³/fan lavado total)		0.86	
Caudal promedio (m³/fan chancado total)			0.84

Cuadro 4. Tiempo de retención promedio del filtro y de la laguna de oxidación en tres períodos de cosecha.

Período	Tr promedio del filtro (días)	Tr promedio de la laguna (días)
8 oct.-13 nov.	2.1	18
14 nov.-4 dic.	1.1	9
5 dic.-28 dic.	0.54	4.7

10.2. Parámetros físico-químicos.

En el presente apartado se muestran los datos de pH, temperatura, turbiedad, sólidos sedimentables y oxígeno disuelto (OD), así como DQO, DBO y SST, obtenidos en los diferentes puntos de muestreo del sistema de tratamiento.

Cuadro 5. Temperaturas y pH mínimos, máximos y promedios en la entrada al sistema, entrada y la salida del filtro anaerobio y de la laguna de oxidación.

Día	Punto	pH			Temperatura. (°C)		
		Mín.	Máx.	promedio	Mín.	Máx.	promedio
J 04/10/2001	Entrada	6.1	7.7	7.0	20	21	20
	E. a laguna	5.2	5.9	5.5	20	21	20
	Salida	7.1	8.4	7.8	21	27	25
L 08/10/2001	Entrada	6.3	7.7	7.0	-	-	20
	E. a laguna	5.0	5.2	5.1	20	21	20
	Salida	6.8	7.3	6.9	22	25	24
M 10/10/2001	Entrada	6.7	7.3	7.0	-	-	19
	E. a laguna	-	-	5.2	20	21	20
	Salida	6.7	7.0	6.8	22	27	24
K 16/10/2001	Entrada	6.3	7.7	7.0	-	-	21
	E. a laguna	-	-	5.8	-	-	20
	Salida	6.8	7.2	7.0	21	24	23
K 30/10/2001	Entrada	6.8	7.3	7.1	19	21	20
	E. a laguna	5.4	5.5	5.4	-	-	20
	Salida	6.3	6.6	6.5	20	22	20
K 06/11/2001	Entrada	5.4	7.9	6.8	19	20	19
	E. a laguna	5.6	5.8	5.7	20	21	20
	Salida	6.4	6.8	6.5	20	23	21
M 07/11/2001	Entrada	7.0	7.5	7.3	18	19	18
	E. a laguna	5.4	6.2	5.9	18	19	19
	Salida	6.3	6.5	6.4	19	20	20
J 08/11/2001	Entrada	6.5	7.2	7.0	18	19	18
	E. a laguna	4.9	5.4	5.1	19	21	20
	Salida	6.6	6.7	6.7	18	21	20
V 09/11/2001	Entrada	6.6	6.9	6.7	18	20	19
	E. a laguna	4.8	5.3	5.0	19	21	19
	Salida	6.5	6.8	6.6	19	21	20
K 13/11/2001	Entrada	6.9	7.6	7.2	-	-	19
	E. a laguna	5.9	6.1	6.0	19	20	19
	Salida	7.0	7.3	7.1	19	21	20
M 14/11/2001	Entrada	6.8	7.0	7.1	20	21	20
	E. a laguna	5.8	6.4	6.1	18	21	20
	Salida	6.7	7.0	6.8	21	22	21
J 22/11/2001	Entrada	6.1	8.5	6.2	18	20	19
	E. a laguna	5.2	5.4	5.3	19	20	19
	Salida	6.3	7.3	6.6	19	20	19
K 04/12/2001	Entrada	6.8	7.1	7.0	18	19	18
	E. a laguna	4.9	5.1	5.0	-	-	-
	Salida	5.8	6.1	5.9	19	20	19
M 05/12/2001	Entrada	6.0	7.2	6.7	18	20	19
	E. a laguna	4.7	6.1	5.1	18	21	19
	Salida	5.5	5.7	5.6	19	21	19
J 13/12/2001	Entrada	4.9	6.5	5.5	19	20	20
	E. a laguna	4.2	5.1	4.5	18	20	20
	Salida	5.8	6.2	6.0	-	-	20

Fuente: Datos de campo.

Nota: L: lunes; K: martes; M: miércoles; J: jueves; V: viernes.

Entrada del sistema=Entrada del filtro

Entrada de la laguna=Salida del Filtro

Salida del sistema= Salida de la laguna.

En la figura 9 se muestra el descenso en el pH, en las fechas antes y durante el período pico de cosecha. Si se compara con la figura 7, que muestra las fanegas procesadas, se puede observar claramente que al aumentar las fanegas procesadas el pH desciende.

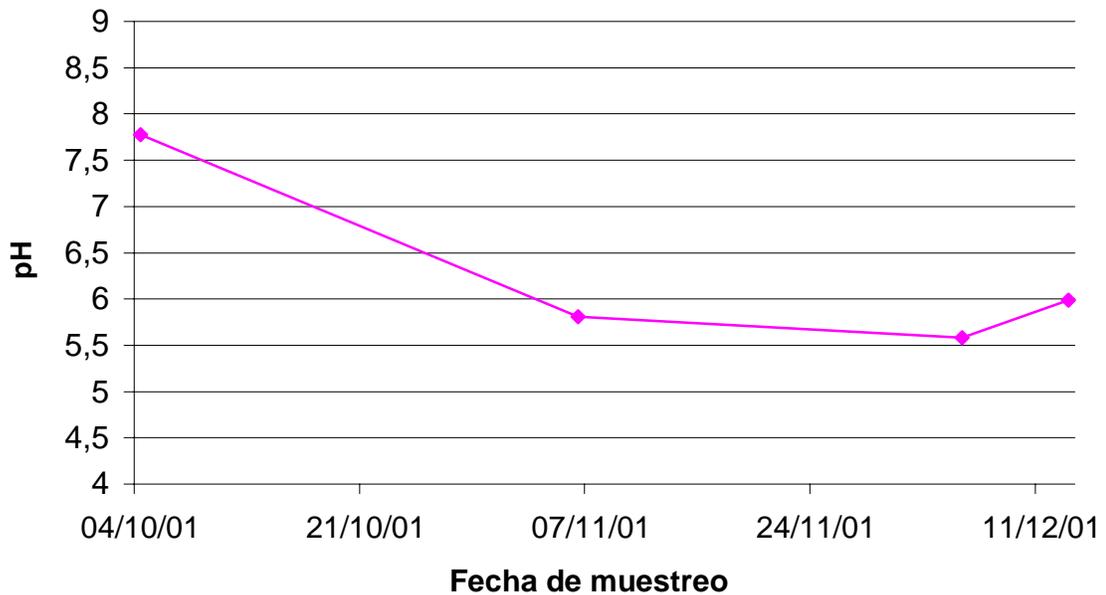


Figura 10. Comportamiento del pH a la salida del sistema en diferentes fechas de muestreo.

De acuerdo con los promedios de turbiedad (cuadro 6), la eficiencia promedio del sistema total para disminuir la turbiedad es de 62%; el filtro tiene una eficiencia de 27% y la laguna tiene una eficiencia de 48%.

Cuadro 6. Turbiedad, oxígeno disuelto y temperatura de cada uno de los componentes del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Fecha	Entrada del filtro		E. laguna		Salida lag. oxidación	
	Turbiedad (FTU)	OD (mg/L)	Turbiedad (FTU)	OD (mg/L)	Turbiedad (FTU)	OD (mg/L)
03/10/01	480	0.68	136	0.96	145	0.68
04/10/01	770	1.02	175	2.15	158	3.25
08/10/01	-	0.93	-	0.76	-	0.89
10/10/01	184	0.49	295	0.60	180	1.15
12/10/01	347	0.63	393	0.56	199	0.53
16/10/01	201	0.49	303	0.96	154	0.91
17/10/01	524	0.66	171	1.00	127	1.01
19/10/01	490	0.51	240	0.55	163	0.99
23/10/01	179	0.60	430	0.59	183	0.98
25/10/01	484	0.83	560	0.40	222	0.94
26/10/01	554	0.61	274	0.49	173	0.87
30/10/01	-	0.67	-	0.63	-	0.53
31/10/01	279	0.49	350	0.46	164	0.43
01/11/01	240	0.47	377	0.42	156	0.63
06/11/01	670	-	196	-	179	-
07/11/01	378	-	199	-	184	-
08/11/01	301	0.67	376	0.97	129	1.35
13/11/01	235	0.99	292	0.67	87	0.75
14/11/01	452	0.80	288	0.55	116	0.74
15/11/01	474	2.74	314	0.48	103	0.70
23/11/01	446	-	194	-	110	-
27/11/01	162	0.84	353	0.91	110	0.71
28/11/01	398		417	0.79	129	0.73
07/12/01	498	0.36	215	0.46	171	0.51
11/12/01	602	0.60	260	0.75	180	0.51
\bar{X}	406	0.76	296	0.73	153	0.90
σ	162	0.47	100	0.36	33	0.56

Fuente: Datos de campo.

Entrada del filtro = Entrada del sistema

Entrada de la laguna = Salida del filtro.

Salida de laguna = Salida del sistema.

El cuadro 7 y la figura 11 indican el promedio de Sólidos Sedimentables en mL/L obtenidos de acuerdo al día y la fecha de muestreo. Para el 5 de diciembre se observa un valor bastante alto de SSed, la razón de dicho aumento se explica en el apartado 11.2.7.

Cuadro 7. Sólidos sedimentables (SSed 60`) máximo, mínimo y promedio obtenidos a la salida del sistema de tratamiento de aguas residuales.

Día	SSed 60` (mL/L)		
	Mín	Máx	Promedio
J 4/10/01	<0.1	1.1	0.3
L 8/10/01	< 0.1	1	0.6
M 10/10/01	0.4	1.9	0.9
K 16/10/01	0.5	2.0	1.1
K 23/10/01	0.2	1.5	0.8
K 30/10/01	<0.1	0.1	<0.1
M 31/10/01			<0.1
K 6/11/01	<0.1	0.2	<0.1
M 7/11/01			<0.1
K 13/11/01			<0.1
K 20/11/01			<0.1
J 22/11/01			<0.1
L 3/12/01			<0.1
M 5/12/01	<0.1	9.0	2.2
J 13/12/01			<0.1

Fuente: Datos de campo.

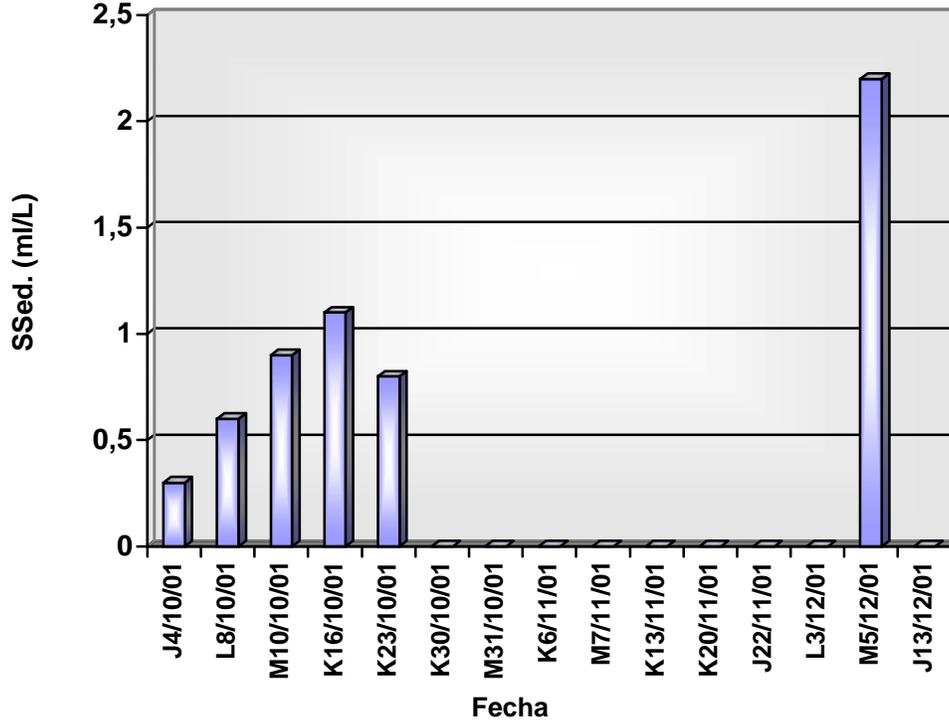


Figura 11. Variación de los sólidos sedimentables (SSed) en diferentes fechas de muestreo.

En el cuadro 8, se expresan los resultados de los análisis de DQO, DBO y sólidos suspendidos totales y su comportamiento se grafica en las figuras 12, 13 y 14, estos parámetros son necesarios para la determinación de la carga orgánica (cuadro 9) que ingresa al sistema y la que sale, de modo que se pueda verificar si se cumple con las normativas existentes, así como para la determinación de la eficiencia con la que opera el sistema, la cual se expresa en el cuadro 10.

Cuadro 8. Demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y sólidos suspendidos totales (SST), de entrada y salida del filtro y la laguna de oxidación.

Fecha	Entrada al sistema			Entrada a la laguna***			Salida del sistema		
	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)
8/11/01	-	1900	-	-	1400	-	-	280	-
22/11/01	-	3000	-	-	1400	-	-	240	-
3/12/01	-	1400	-	-	1600	-	-	1400	-
4/12/01	753*	1824*	600*	1134*	1600	230*	742*	971*	100*
5/12/01	-	3600	-	-	1350	-	-	920	-
13/12/01	-	3350	-	-	2350	-	-	740	-
21/12/01	1920**	2640**	350**	840**	2150	370**	570**	810**	50**
27/12/01	1680**	2720**	390**	1200**	1800	540**	400**	610**	50**

*Análisis realizados por el laboratorio certificado CEQUIATEC

**Análisis realizados por el laboratorio certificado LAMDA.

***Entrada a la laguna de oxidación = salida del filtro.

- no se cuenta con ese dato

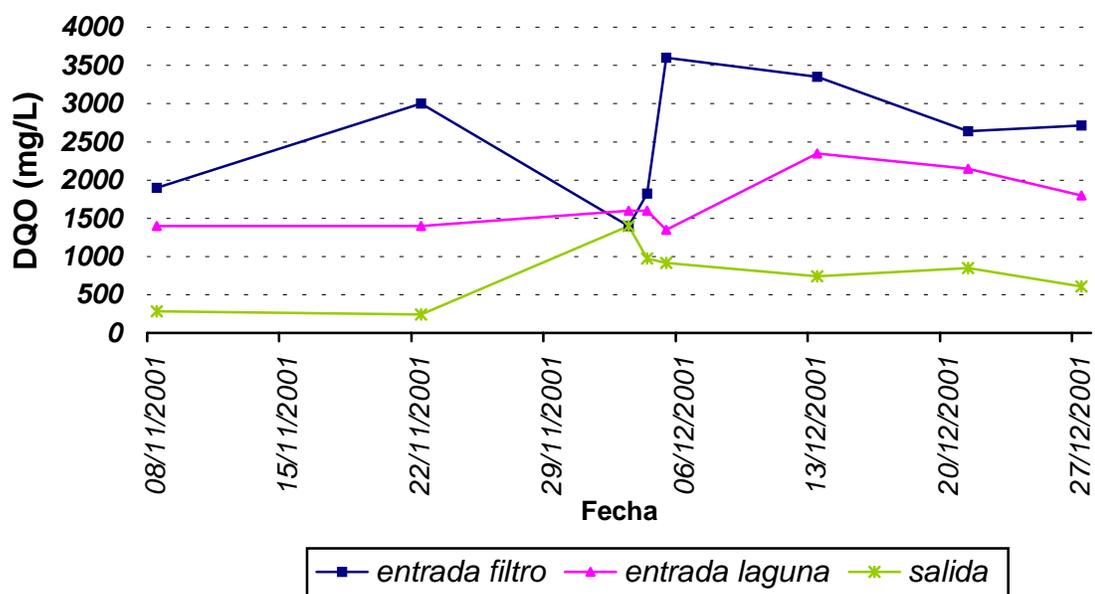


Figura 12. Comportamiento de la DQO a la entrada del filtro, la entrada de la laguna de oxidación y a la salida del sistema en diferentes campañas de muestreo.

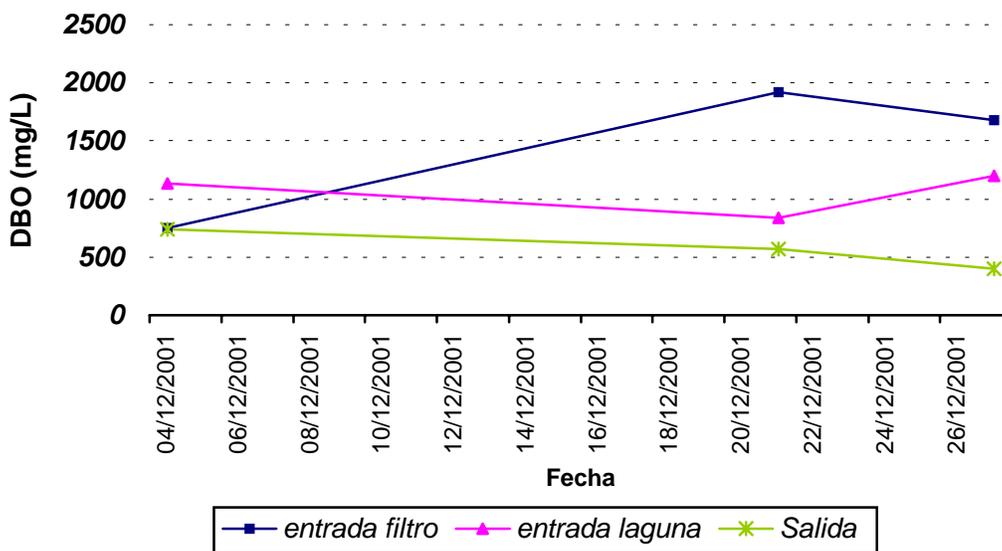


Figura 13. Comportamiento de la DBO en la entrada del filtro, entrada a la laguna de oxidación y salida del sistema en diferentes campañas de muestreo.

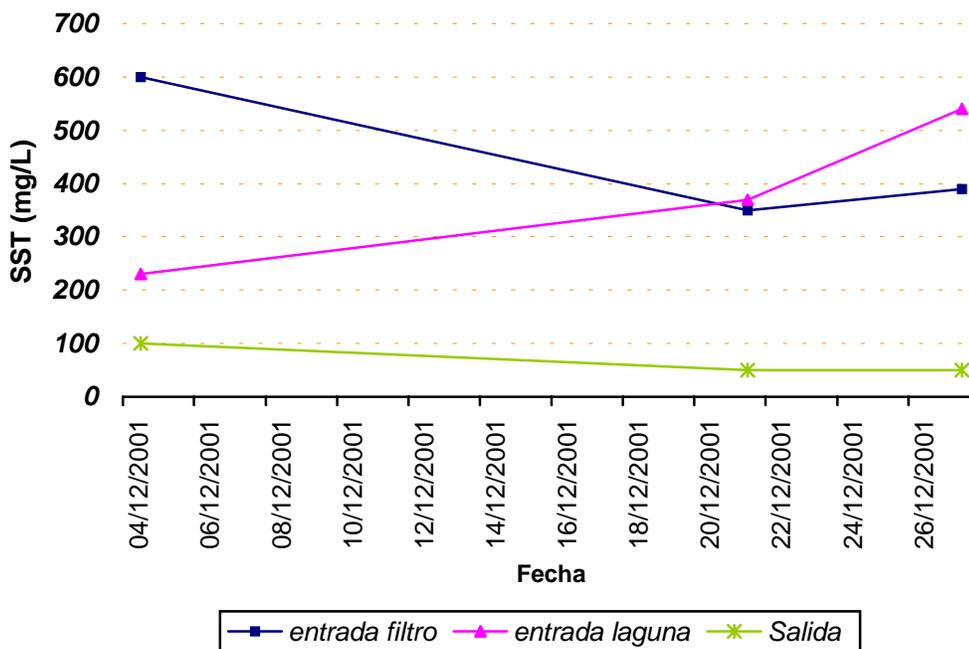


Figura 14. Comportamiento de los Sólidos Suspendedos Totales a la entrada del filtro, entrada de la laguna de oxidación y salida del sistema, en diferentes campañas de muestreo.

Cuadro 9. Carga orgánica (CO) y carga orgánica volumétrica (COV) de entrada al filtro anaerobio.

Fecha	CO (KgDQO/día)	COV (Kg DQO/m ³ /día)	CO (KgDBO/día)	COV (Kg DBO/m ³ /día)
8/11/01	592.8	1.41	-	-
22/11/01	1056	2.51	-	-
4/12/01	798.91	1.90	329.81	0.79
5/12/01	2523.6	6.01	-	-
13/12/01	2365.10	5.63	-	-
21/12/01	1901.28	4.53	1174.32	2.80
27/12/01	2740.32	6.52	1992.96	4.75

Cuadro 10. Carga orgánica (CO) y Carga Orgánica Superficial (COS) de entrada a la laguna de oxidación.

Fecha	CO (KgDQO/día)	COS (Kg DQO/Ha/día)	CO (KgDBO/día)	COS (Kg DBO/Ha/día)
8/11/01	436.8	4800	-	-
22/11/01	492.8	5415.38	-	-
4/12/01	700.8	7701.10	496.69	5458.15
5/12/01	946.35	10399.45	-	-
13/12/01	1659.1	18231.87	-	-
21/12/01	1496.40	16443.96	584.64	6424.61
27/12/01	1868.4	20531.87	1245.6	13687.91

El cuadro 11 presenta la eficiencia total del sistema, del filtro anaerobio y de la laguna de oxidación en remoción de materia orgánica en términos de DQO, DBO y Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Cuadro 11. Eficiencia de operación de cada uno de los componentes del sistema de tratamiento de aguas residuales y del sistema en su totalidad.

Fecha	% de Eficiencia								
	Sistema total			Filtro anaerobio			Laguna de oxidación		
Remoción de:	DQO	DBO	SST	DQO	DBO	SST	DQO	DBO	SST
8/11/01	85	-	-	26	-	-	80	-	-
22/11/01	92	-	-	53	-	-	83	-	-
4/12/01	47	2	83	12	-	62	39	35	56
5/12/01	74			63			32		
13/12/01	78	-	-	30	-	-	69	-	-
21/12/01	69	70	86	19	56	-	62	32	86
27/12/01	78	76	87	34	28	-	66	67	91
Promedio	75	49	85	34	42	62	62	45	78

En el cuadro 12 se presentan los ácidos grasos volátiles en meq/L presentes en el filtro y en la laguna de oxidación. En las figuras 15 y 16 se relaciona el pH con estos compuestos.

Cuadro 12. Ácidos grasos volátiles (AGV's) y alcalinidad en el filtro anaerobio y en la laguna.

Fecha	Hora	Salida del filtro		Salida de laguna	
		AGV`s (meq/L)	Alcalinidad* (mg/L)	AGV`s (meq/L)	Alcalinidad* (mg/L)
7-12-01	8:30 a.m.	11.2	200	8.4	340
11-12-01	8:30 a.m.	12	320	10	510
18-12-01	9:00 a.m.	12	360	9	420
3-01-02	6:00 p.m.	8	200	7.2	360

*Nota: como carbonato de calcio.

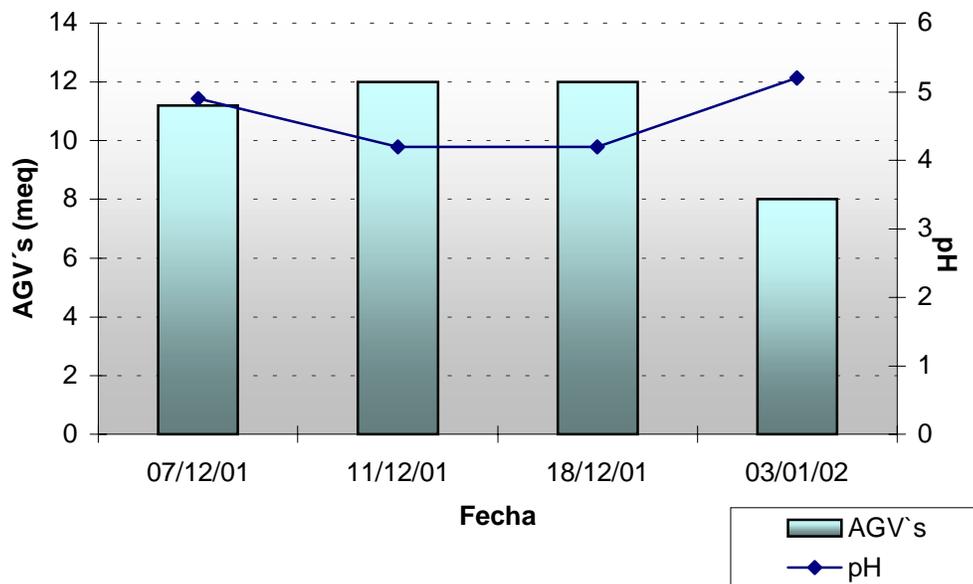


Figura 15. Relación entre los ácidos grasos volátiles en miliequivalentes (meq) y el pH en el filtro anaerobio de flujo ascendente

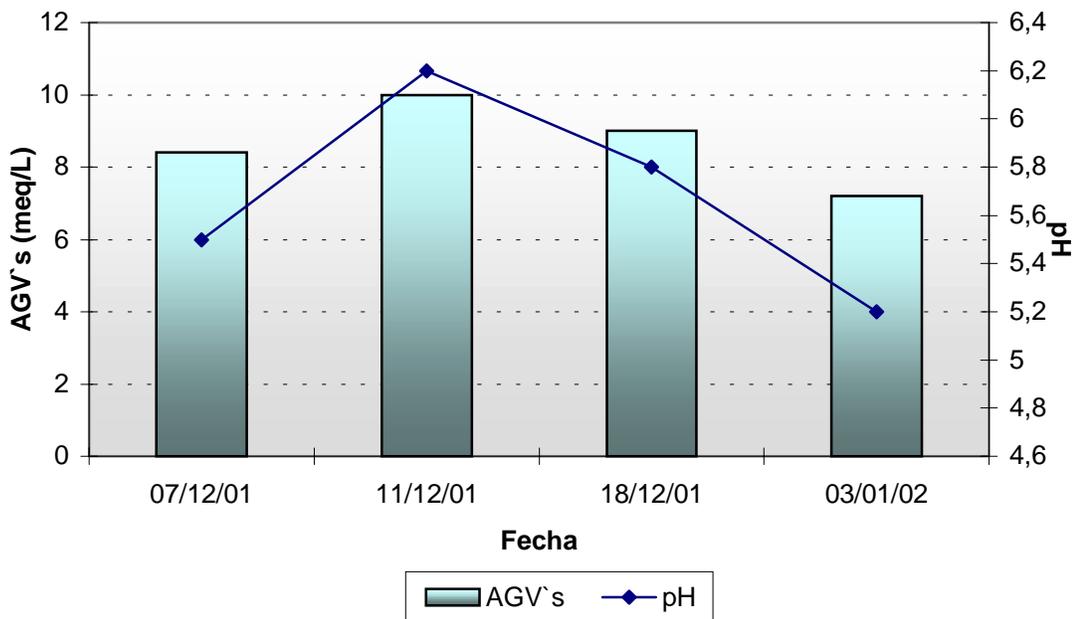


Figura 16. Relación entre los AGV's, en meq/L y el pH, en la laguna de oxidación (salida final del sistema)

10.3. Prueba de actividad metanogénica.

El cuadro 13 muestra la cantidad de metano producida por día por el lodo en el ensayo realizado. Se obtuvo que la actividad metanogénica específica (AME) es igual 0.01 kg DQOCH₄/kg SV/día.

Cuadro 13. Producción diaria de metano y actividad metanogénica presentada en el filtro anaerobio.

Día	Cantidad de CH ₄ (ml/día)	CH ₄ acumulado (ml)	Actividad metanogénica (kg DQOCH ₄ /kg SV/día)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0.9	0.9	0,0006
6	0.1	1.0	7,1x10 ⁻⁵
7	0.3	1.3	0,0002
8	0.4	1.7	0,0003
9	0.4	2.1	0,0003
10	0.5	2.6	0,0004
11	0.4	3.0	0,0003
12	0.1	3.1	7,1x10 ⁻⁵
13	24.9	28.0	0,0176
14	25	53.0	0,0177
15	24.9	77.9	0,0176
16	25	102.9	0,0177
17	42	144.9	0,0297
18	42.1	187.0	0,0298
19	41.9	228.9	0,0296
20	75.1	304.0	0,0531
21	75	379.0	0,0531
22	25	404.0	0,0177
23	25	429.0	0,0177

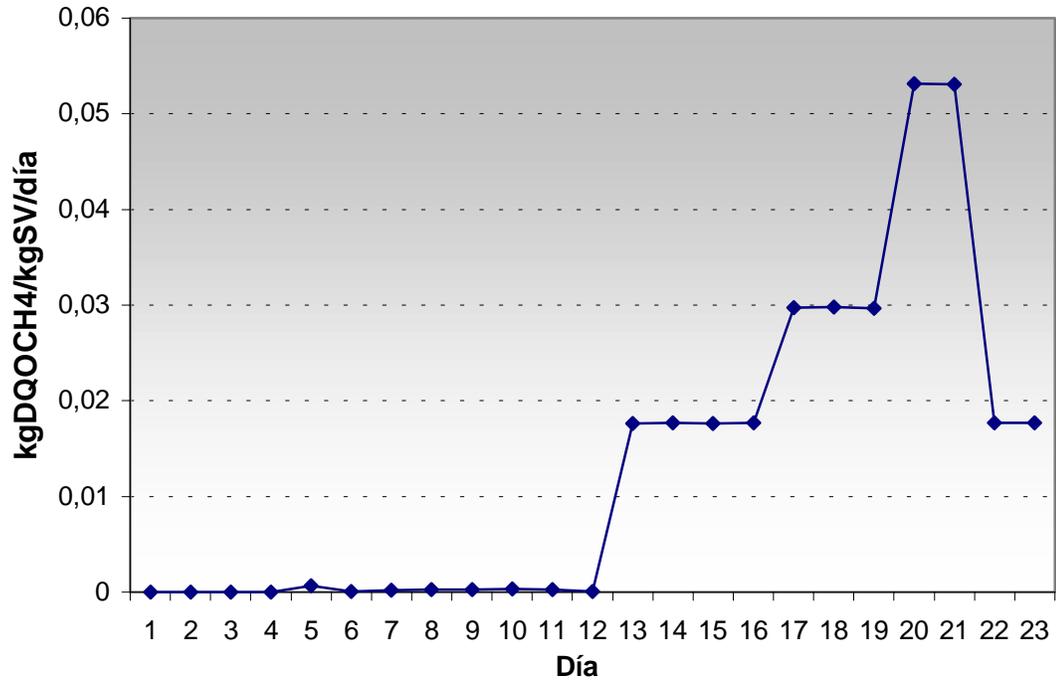


Figura 17. Actividad metanogénica del lodo presente en el filtro anaerobio.

10.4. Velocidad de sedimentación del lodo del Filtro Anaerobio.

En el cuadro 13 se presentan los resultados de velocidad de sedimentación del lodo después de diferentes tiempos de sin purgar el filtro.

Cuadro 14. Velocidad de sedimentación del lodo extraído del Filtro Anaerobio después de diferentes periodos de tiempo sin purgar.

Días sin purgar el filtro	Velocidad de sedimentación (m/hr)
7	<0.2
15	0.7
20	2.1

10.5. Pruebas de neutralización.

Los cuadros 15 y 16 indican la cantidad de cal requerida por el sistema para neutralizar el agua residual que ingresa al mismo, así como la cantidad de cal que se está aplicando actualmente.

Cuadro 15. Cal necesaria para neutralizar el agua residual a la entrada del sistema de tratamiento.

Fecha	Proceso	Cal requerida (kg/m ³ de AR)	Cal requerida (kg/fan)	Cal aplicada actualmente (kg/fan)
18/12/01	Lavado	0.070	0.071	0.110
2/01/02	Lavado	0.014	0.010	0.120
3/01/02	Chancado	0.140	0.130	0.140
8/01/02	Chancado y lavado	0.160	0.150	0.150

Donde, AR: Agua Residual.
Fan: Fanega

Cuadro 16. Cal necesaria para neutralizar el agua residual a la entrada de la laguna de oxidación (salida del filtro) del sistema de tratamiento.

Fecha	Cal requerida (kg/m ³ AR)	Cal requerida (kg/fan)	Cal aplicada actualmente (kg/fan)
26/10/01	0.19	0.16	0.30
1/11/01	0.32	0.31	0.40
9/11/01	0.40	0.39	0.49
20/12/01.	0.32	0.20	0.40
8/01/02	0.28	0.17	0.31

10.6. Análisis microscópicos.

El análisis de microalgas presentes en la laguna de tratamiento, puede ayudar a determinar como está funcionando y muy importante es su estudio en el efluente, ya que puede servir para determinar la calidad del mismo. En los cuadros 16 y 17 se detallan las microalgas encontradas en los diferentes muestreos realizados en la laguna de lodos y la laguna de oxidación. El orden en que aparecen corresponde a la abundancia encontrada de modo que la primera (de arriba hacia abajo) fue la más abundante.

Cuadro 17. Microalgas presentes en la superficie de la laguna de lodos y la laguna de oxidación en dos fechas de muestreo.

Laguna de lodos		Laguna oxidación	
8/10/01	31/10/01	8/10/01	31/10/01
MO* no identificado	MO* no identificado	<i>Merismopedia sp.</i>	<i>Pyrobotris sp.</i>
	<i>Merismopedia sp</i>	<i>Chlorococcum sp</i>	<i>Chlorococcum sp.</i>
	<i>Gyolotella sp.</i>	<i>Pyrobotrys sp</i>	<i>Hannochloris sp</i>
	<i>Mougeotia sp</i>	<i>Clamylomonas sp</i>	<i>Merismopedia sp.</i>

*Nota: MO: Microorganismo

Cuadro 18. Microalgas presentes en el efluente de la laguna de oxidación en diferentes fechas de muestreo.

3/10/01	10/10/01	30/10/01	22/11/01	8/01/02
<i>Merismopedia sp</i>	<i>Pyrobotris sp</i>	<i>Pyrobotris sp</i>	Disminución en la población de algas.	MO encontrados en muy poca cantidad.
<i>Hannochloris sp</i>	<i>Chlorococcum sp</i>	<i>Chlorococcum sp</i>	MO no identificados	
<i>Pyrobotris.</i>	<i>Merismopedia sp.</i>	<i>Asterionella sp.</i>		
<i>Mougeotia</i>		<i>Merismopedia sp.</i>		

10.7. Determinación de olor en la laguna de oxidación y en la salida del sistema.

A inicios del periodo de cosecha no se presentaron olores fuertes y la coloración de la laguna tendía a ser verdosa. En el mes de octubre, el olor se incrementó tanto en la laguna como en la salida, la coloración cambió a café claro. Se presentó formación de natas en toda la superficie de la misma. Durante los meses de noviembre y diciembre el olor permanece, disminuyendo su intensidad en este último mes. El olor disminuye cuando se remueven las natas.

11. DISCUSIÓN

11.1. Análisis del efecto del caudal en el sistema de tratamiento.

Al inicio de la cosecha el caudal que ingresa al sistema es muy poco debido a las pocas horas de proceso, lo que provoca que los tiempos de retención (T_r) sean muy altos con respecto al T_r establecido para la laguna de oxidación en la memoria de cálculo del sistema de tratamiento de aguas residuales de la Planta Santa María (9 días). Mientras que en la época pico de cosecha, no se cumple con dichos parámetros de diseño debido al aumento considerable en el caudal.

La memoria de cálculo indica que el T_r para el cual fue diseñada la laguna de oxidación es de 9 días, sin embargo, en el cuadro 2 se puede observar que, este se cumple hasta el día 27 de noviembre, con 11.8 días, mientras que para el período del 5 de diciembre al 28 de diciembre, el tiempo de retención promedio es de 4.7 días. El tiempo de retención mínimo para el buen funcionamiento de una laguna anaerobia es de 7 a 10 días, incluso algunos autores recomiendan un T_r de 20 días. Tiempos de retención cortos provocan disminución en la temperatura (Gloyna, 1973).

Durante los fines de semana, específicamente el día domingo, en que no hay proceso, o este se da solo en la mañana y las primeras horas de la tarde, no entra caudal al sistema, lo que provoca una disminución en el volumen de agua presente en la laguna, esto va a alterar su carga hidráulica, he incide en todos los procesos que se dan en este sistema, como por ejemplo, influye en el pH, lo cual se detallará más adelante.

Con respecto al caudal de agua residual producido por fanegas, en el cuadro 3 se nota que no hay gran diferencia entre el promedio de agua consumida en el proceso de lavado y el agua consumida en el proceso de chancado o despulpado, sin embargo, es levemente mayor la cantidad utilizada para el lavado del grano.

De acuerdo con Cleves, (1995), el criterio que prevalece es un consumo de 0.5 m³ de agua por quintal oro, sin embargo, Wasser, (1995), afirma que un consumo de 2-4 m³/fanega es considerado normal en Costa Rica. La memoria de cálculo, establece como meta un consumo de agua de 1m³/fanega procesada. En cualquiera de los casos, tanto para el consumo promedio por fanega de lavado (0.86m³/fan) como para el consumo promedio por fanega de chancado (0.84m³/fan.), se cumple o se esta muy cerca de cumplir con el consumo de agua considerado aceptable en Costa Rica. Pero sí hay que tomar en cuenta, que al inicio de la cosecha la cantidad de agua consumida por fanega procesada es mucho mayor, en algunos casos de 1.23 m³/fanega.

11.2. Análisis fisicoquímicos.

11.2.1. Potencial de Hidrógeno (pH) y Temperatura.

El cuadro 5 muestra que a la entrada del sistema, durante los meses de octubre y noviembre y la primer semana de diciembre, el **pH** promedio se mantuvo casi neutro, siendo 6.2 la medición más baja, como ya se mencionó antes, un pH inferior a 6 inhibe la metanogénesis, y el rango óptimo para el proceso anaerobio se encuentra entre 6.8 y 7.5. Por lo cual no fue necesaria la aplicación de grandes cantidades de cal, reduciéndose a una cuarta parte de la cantidad que se estaba usando. Es muy importante no adicionar un agente alcalinizante en cantidades excesivas que pudieran elevar demasiado el pH y crear un ambiente tóxico para las bacterias metanogénicas, ya que la actividad de estas va a disminuir si el pH es superior a 7.5.

A partir de la segunda semana de diciembre se dio un descenso fuerte en el pH del afluente, debido al aumento en las fanegas procesadas, por lo que se incrementó la carga orgánica del agua residual. A partir de este período se realizaron las Pruebas de neutralización para poder determinar la cantidad de cal requerida para neutralizar el agua antes de ingresar al filtro, de esto se hablará más adelante.

El descenso del pH se ve agravado por causa de las variaciones de caudal y los cortos circuitos, provocados por los períodos largos en que la laguna no recibe caudal, específicamente durante la tarde y noche del domingo, hasta la mañana del lunes que reinicia el proceso, lo que hace que el sistema esté sin caudal de entrada por aproximadamente 16 a 18 horas, provocando un descenso en e pH del efluente, ya que, los cambios de operación del sistema (en este caso, los cambios de caudal), provocan cambios bruscos en el pH.

El pH obtenido para el día 4 de octubre aumenta conforme avanzan las horas del día, cosa que no ocurre en los muestreos siguientes, esto se debe a la acción de las algas presentes en la laguna para esta fecha, ya que, las algas consumen anhídrido carbónico y por consiguiente elevan el pH durante las horas de luz, de modo que al inicio del estudio la presencia de estos microorganismos ayuda a mantener elevado el pH del efluente, obsérvese que aumentó hasta por encima de 8.

Un descenso en el pH provoca el aumento en los malos olores. Esto se debe a que a pH bajo el sulfuro de hidrógeno no permanece disuelto como ácido sulfúrico y se libera en forma de gas, el cual posee un olor bastante desagradable.

Con respecto a la **temperatura**, conforme esta aumenta también aumenta el metabolismo bacteriano, (ver figura 3, pág 16), por lo que al incrementarse este factor, se favorecen los procesos de descomposición que se deben dar en el sistema de tratamiento. Las bacterias anaerobias, que son las que nos interesan, son a su vez mesófilas, es decir, que se desarrollan a temperaturas entre 20-40°C. Si se compara este ámbito con los datos presentados en el cuadro 5 se puede ver que hay días en que el promedio de la temperatura es inferior a los 20°C, en los tres puntos de muestreo, esto no representa ningún problema para el sistema ya que las bacterias mesófilicas pueden tolerar temperaturas inclusive de 15°C, pero sí puede ocasionar disminución en la eficiencia, ya que se reduce la actividad bacteriana. Gloyna, (1973), observa que en estanques anaerobios a temperaturas de 10°C no se presenta reducción alguna de la DBO, mientras que la reducción llega hasta 40-60% a 20°C y pasan del 80% a temperaturas de 25°C o mayores.

La laguna de oxidación, tiene una gran superficie expuesta al aire, por lo que la pérdida de calor es considerable, principalmente en los días más fríos, que fueron muy abundantes en el período en que se realizaron las pruebas. Estas pérdidas de calor pueden reducirse si se favorece el tiempo de retención. En los sistemas anaerobios, conforme aumenta la temperatura se producen reducciones importantes en el tiempo mínimo de retención. Esto se debe a que la temperatura favorece el metabolismo celular, por lo tanto, si la temperatura es baja, se deberá aumentar el Tr para asegurar que se den las reacciones metabólicas y el contacto adecuado entre el sustrato y la biomasa celular.

La temperatura con la que el agua ingresa al sistema es inferior que la temperatura con la que sale, esto se debe a los procesos metabólicos que se dan en el interior del sistema, los cuales liberan cierta cantidad de energía que provocan dicho aumento.

11.2.2. Turbiedad y oxígeno disuelto (OD)

La cantidad de oxígeno disuelto presente en el sistema determina el tipo de microorganismos que va a predominar y por lo tanto el tipo de proceso que se da en este. Tal y como se puede observar en el cuadro 6, el comportamiento del OD a la entrada de la laguna (salida del filtro) y a la salida del sistema (salida de la laguna de oxidación) fue muy similar. Al inicio las mediciones de oxígeno fueron casi de 1 mg/L, que son relativamente altas para el tipo de sistema, esto debido a la baja carga orgánica que ingresaba por las pocas fanegas que se procesaban. En el caso de la laguna de oxidación la cantidad de OD, se vio favorecida por la presencia de algas al inicio del estudio, las cuales producen oxígeno al fotosintetizar. Estas mediciones indican que al inicio de la cosecha la laguna estaba trabajando como facultativa, pero conforme aumenta el número de fanegas procesadas se eleva la carga orgánica que ingresa al sistema, por lo que el oxígeno se consume rápidamente haciendo que la laguna funcione como anaerobia, lo cual se da, según el cuadro 6, a partir del 30 de octubre, ya que, en su mayoría, las mediciones fueron inferiores a los 0.75 mg/L a partir de esta fecha.

La ausencia de oxígeno en el sistema provoca el aumento de los olores, lo cual es natural e inevitable en un sistema anaerobio, esto se debe a uno de los gases producidos por la digestión anaerobia, el Sulfuro de hidrógeno (H_2S), cuya formación se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por acción de los microorganismos anaerobios, pero se ve inhibido en presencia de grandes cantidades de oxígeno. Razón por la cual se espera que aumente el olor conforme aumenta la carga orgánica que ingresa al sistema, ya que el oxígeno presente se consume más rápidamente. Por esto se dice que el olor es inevitable en un sistema anaerobio, pero se pueden tomar medidas para controlarlo.

La **turbiedad** no es un parámetro normado en el país, sin embargo, es útil para evaluar la eficiencia del sistema e indica la calidad de las aguas vertidas, además de la importancia de mantenerla controlada debido a que en niveles altos puede limitar el paso de la luz en el cuerpo receptor, alterando así sus procesos naturales. Según se puede observar en el cuadro 6, en la mayoría de los casos, la turbiedad de entrada al sistema es muy alta (de 826 a 162 FTU) y la eficiencia del mismo para disminuir este parámetro es baja (62%). Al inicio del estudio, la turbiedad se vio afectada por la presencia de microalgas en el efluente y conforme aumentó la carga orgánica de la laguna, se vio afectada por la presencia de sólidos ocasionados por las natas flotantes y una mala colocación del tubo de salida.

11.2.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

En el cuadro 8, se aprecia un aumento en la DQO a la entrada del sistema que corresponde a un aumento en el número de fanegas procesadas, dicho aumento también se da en el efluente del filtro y de la laguna de oxidación. Si se observa el cuadro 11, se nota una disminución de la eficiencia del sistema, esto se debe a que está aumentando la carga de entrada pero no se están favoreciendo las condiciones para un mejor tratamiento del agua residual, tal como la temperatura del sistema que es muy importante para la eficiencia del mismo. El filtro anaerobio no posee un sistema de calentamiento para favorecer la actividad bacteriana, además de que las condiciones climáticas que se presentaron para los meses de octubre y diciembre no favorecieron el aumento de la temperatura. Las bajas temperaturas de operación se pueden suplir con un aumento en el tiempo de retención, sin embargo, al haber aumento en el caudal se disminuye el Tr. No obstante, en todos los muestreos realizados se está cumpliendo con la norma establecida por la legislación nacional (1500mg/L, Decreto Ejecutivo, N°26042-S-MINAE). A pesar de la disminución en la eficiencia del sistema, la carga de entrada al mismo no es muy elevada, lo que contribuye a mantener el efluente dentro del límite de vertido para aguas residuales de café.

El día 3 de diciembre, se obtuvo que la DQO del efluente fue igual a la DQO del afluente, este resultado se debe a que la muestra de entrada representaba las aguas de lavado, que poseen menos concentración que las de chancado, además, de que el día (Lunes) en que se realizó el muestreo las fanegas procesadas fueron pocas (70 fanegas), ya que parte de ellas se habían procesado el día sábado. El resultado obtenido a la salida del sistema para este día, que correspondió a un lunes, se debe a que durante el fin de semana la laguna pasa mucho tiempo sin recibir caudal afluente, lo que hace que se altere la carga hidráulica de la laguna y por ende se alteren todos los procesos metabólicos que en ella ocurren, de acuerdo a las mediciones realizadas se obtuvo que después de 18 horas sin recibir caudal, la laguna pierde 40 cm de profundidad.

11.2.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La DBO presentó un comportamiento similar a la DQO. De acuerdo a los resultados obtenidos se comprueba que siempre se cumplió con lo establecido en la legislación nacional.

La eficiencia que se obtuvo para el día 4 de diciembre, es en extremo baja, sin embargo, se cumple con la norma, esto se debe a que la muestra de entrada correspondió a aguas de lavado, las cuales tienen menor carga que las de chancado. Se puede apreciar que el valor más alto del efluente se obtuvo en este día, esto verifica que el hecho de los cortos circuitos en el caudal alteran todos los procesos que se dan en la laguna de oxidación, ya que un día después la laguna aún no se había estabilizado por completo.

11.2.5. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

El sistema presentó una alta eficiencia en la remoción de SST, en el primer muestreo el mayor porcentaje de remoción correspondió al Filtro anaerobio. Sin embargo, para los muestreos siguientes se obtuvo mayor presencia de SST en la salida del filtro que en la entrada al mismo, esto se debe a un arrastre del lodo ocasionado por una baja calidad de sedimentación del mismo, lo cual se comprueba con los resultados obtenidos en el cuadro 14, que muestran que el filtro posee un lodo con muy bajas velocidades de sedimentación.

11.2.6. Carga orgánica volumétrica (COV) y Carga Orgánica Superficial (COS)

Con respecto a la carga orgánica volumétrica del filtro, en el cuadro 9 se observa que durante las tres primeras fechas de muestreo, el filtro estaba recibiendo una carga que se encontraba dentro del rango establecido para un FAFA, (0.96-4.81 kgDQO/m³·día), sin embargo, a partir del 5 de diciembre, esta aumentó, superando dicho rango, lo que pudo haber incidido en la disminución de la eficiencia total del sistema y en el hecho de que el lodo tuviese bajas velocidades de sedimentación.

Las lagunas anaerobias presentan la ventaja de que pueden recibir cargas muy elevadas, estas cargas permiten la ausencia de oxígeno en el sistema y por lo tanto son uno de los factores necesarios para que se de la anaerobiosis. En el cuadro 10 se puede apreciar que las cargas orgánicas superficiales en cada medición son demasiado elevadas. En general, se ha establecido que el valor teórico de COV para una laguna anaerobia es superior a 500 kg/Ha/día.

11.2.7. Sólidos Sedimentables (SSed)

El cuadro 7 muestra los SSed obtenidos en los diferentes muestreos del sistema. Los valores promedio van desde menos de 0.1 ml/L hasta 2.2 ml/L para el lunes los SSed estuvieron por debajo de 0.1 ml/L. Esto se debe a la posición a la que se encuentra el tubo de salida y al aumento en el nivel de la laguna conforme avanza la semana. El día lunes la laguna posee un nivel menor en comparación con los demás días, esto porque permanece sin caudal afluente por aproximadamente 16 a 18 horas ya que la mayoría de las veces el proceso finaliza al las 12:00 md del día domingo. Mientras que en el muestreo en que se obtuvo el valor más elevado (2.4 mg/L) el nivel de la laguna aumenta por la entrada constante de agua residual, esto hace que las natas alcancen los orificios superiores del tubo de salida y salgan en el efluente.

Es normal que una laguna anaerobia presente formación de natas, pero lo correcto es que este lodo permanezca en la laguna hasta que pueda ser dispersado por diferentes métodos. Por lo tanto, la salida debe estar justo bajo el nivel del agua a fin de descargar el efluente de mejor calidad y retener los sólidos flotantes.

Los SSed para el 16 de octubre, está por encima del límite permitido, principalmente a la presencia de microalgas.

11.2.8. Ácidos Grasos Volátiles (AGV`s) y Alcalinidad.

Como ya se mencionó antes los **AGV`s** son productos intermedios de la descomposición anaerobia y son tóxicos para la metanogénesis si se presentan en forma excesiva. Estos compuestos no deben sobrepasar los 8 meq/L en reactores y filtros anaerobios. En el cuadro 11, se aprecia que los AGV`s a la salida del filtro sobrepasan dicho valor, sin embargo, este no pasa de 12 meq/L, medida que a pesar de no ser la óptima, se considera aceptable para el sistema, porque la toxicidad de los AGV`s depende del pH, para esto se recomienda el uso de un agente alcalinizante que impida el descenso del pH, sin embargo, su uso debe ser el adecuado, de modo que su función sea efectiva y no se vuelva tóxico para las bacterias.

Si el pH disminuye, aumenta la cantidad de AGV`s que se encuentran en la forma no ionizada (HA), es decir en su forma tóxica. De acuerdo con Wasser, (1995), a un pH de 5, los AGV`s están disociados en un 50% aproximadamente, lo cual provoca inhibición de la actividad metanogénica. Lo que ocurre entonces es que un descenso en el pH disminuye la metanogénesis, pero no se detiene la acidogénesis, la cual puede continuar hasta pH de 4.2, esto provoca que se detenga la producción de metano y no se eliminen los AGV`s que se están produciendo, los cuales se van acumulando y disminuye aún más el pH, lo que podría ocasionar que el sistema entre en un proceso en el cual las bacterias metanogénicas no solo se inhiban, sino que mueran ocurriendo un daño irreversible.

Si se compara la figura 15 con la figura 16, se observa que en la laguna de oxidación los AGV`s obtenidos fueron menores que en el filtro, lo cual se debe a que la laguna de oxidación posee mayor **alcalinidad** y por lo tanto mayor capacidad amortiguadora para neutralizar los AGV`s.

Los AGV`s, disminuyen el pH a menos que la alcalinidad de bicarbonatos sea suficiente para neutralizar dichos ácidos. El bicarbonato se forma a partir de CO₂, que es soluble en el agua, cuando reacciona con los iones hidroxilo formando iones bicarbonato, (HCO₃). Es importante que haya suficiente alcalinidad en el sistema para obtener una buena eficiencia del proceso biológico.

Tanto en el filtro como en la laguna de oxidación, la alcalinidad es muy baja (ver cuadro 12). Para lagunas se establece que la alcalinidad mínima (como carbonato de calcio) debería ser de 1000 mg/L. La alcalinidad es la capacidad del sistema para amortiguar los cambios de pH, lo cual no se está dando adecuadamente y se comprueba con el descenso en el pH del caudal efluente, esto a pesar de la aplicación constante de cal a la entrada de la laguna de oxidación. El problema que se está dando es que cuando se aplica cal entre 500 y 1000 mg/L, a pH`s entre 6.7 y 6.8, se da la formación de carbonato de calcio, el cual es insoluble por lo que aunque se aumente la cantidad de cal que se añada al sistema, no se está contribuyendo a aumentar el pH. La cal que se añade al sistema es para aumentar la alcalinidad del agua, aunque erróneamente se a creído que es solamente para elevar el pH, por lo que se tiende a añadir cantidades excesivas de cal, lo que podría ocasionar efectos negativos como bajas eficiencias del sistema de tratamiento, debido a que la cal en exceso actúa como tóxico, sin contribuir a mejorar las fluctuaciones de pH.

De modo que es muy importante la cantidad adecuada de un agente alcalinizante.

El añadir un alcalinizante que limite el descenso en el pH debe ser una medida necesaria pero de cuidado ya que este no se puede agregar en exceso. En este caso, a pesar de aplicarse cal para corregir el pH no se contribuye a aumentar la alcalinidad, por posible sedimentación de la misma, lo que quiere decir que se están usando cantidades de cal innecesarias que no cumplen función alguna, tal y como lo muestran los resultados de alcalinidad en los componentes del sistema.

11.3. Prueba de actividad metanogénica (AME).

La actividad metanogénica específica (AME) del lodo es la cantidad de sustrato convertido a metano por unidad de lodo, por unidad de tiempo. Se expresa como $\text{Kg DQOCH}_4/\text{Kg SV}^1\text{lodo/d}$. (Wasser, 1995.)

La máxima actividad metanogénica específica del lodo se obtuvo en los días 20 y 21. La producción de metano fue muy baja debido a que el lodo era poco granular e inmaduro. De acuerdo con los resultados obtenidos se pudo determinar que el lodo posee una baja actividad metanogénica específica, con un valor de $0,01 \text{ kg DQOCH}_4/\text{kg SV/día}$ mientras que el valor esperado para el lodo de un filtro anaerobio debe estar entre 0.2 y $1.0 \text{ kg DQOCH}_4/\text{kg SV/día}$. La baja actividad metanogénica específica del lodo se debe a que la purga del filtro se realiza cada semana lo que no da oportunidad de que el lodo madure y se obtenga una buena granulometría del mismo tal y como lo muestra la velocidad de sedimentación del lodo. (Cuadro 14, pág. 65)

El resultado de la AME coincide con el hecho de que la concentración del lodo es de 3.76 kg SV/m^3 , encontrándose muy por debajo del valor ($15\text{-}45 \text{ kg SV/m}^3$) establecido para el buen funcionamiento de un FAFA.

En el cuadro 14, se puede apreciar que la primera prueba realizada para determinar la **velocidad de sedimentación del lodo**, dio como resultado una baja velocidad, lo que indica que este lodo se clasifica como lodo disperso, y teóricamente se esperaría que el lodo de un FAFA fuera de tipo floculento. Se considera como lodo disperso aquel lodo que tiene velocidades de sedimentación entre 0.05 a 0.2 m/h . Este tipo de lodo no posee agregados de partículas y tiene muy pobres propiedades de sedimentación. Después de dejar el lodo por más tiempo (15 días) dentro del filtro, se obtuvo mejoría en la velocidad de sedimentación no obstante no llega al valor óptimo esperado para clasificarlo como lodo floculento. Al cabo de 20 días sin purgar el filtro, se obtuvo una velocidad de sedimentación de 2.1 m/h de modo que se clasifica como un lodo floculento, que presenta características de agregado en flóculos sueltos y con propiedades intermedias de sedimentación

11.4. Pruebas de neutralización.

Las pruebas de neutralización se realizan para determinar la cantidad de cal requerida para llevar el pH a 7 evitando así una acidificación del sustrato que pueda inhibir a las bacterias. Durante el mes de setiembre y las primeras semanas de octubre se usó una dilución de 45.45 g/L de cal para elevar el pH, pero este se redujo a una dilución de 11.36 g/L en los meses siguientes, debido a que el pH a la entrada del sistema se encontraba dentro del rango adecuado para el metabolismo bacteriano, además de que la dilución utilizada en un inicio, elevaba el pH a valores de hasta 11, lo cual resulta tóxico para las bacterias metanogénicas. A pesar de la estabilidad del pH a la entrada del sistema, se sigue agregando cal aunque en menor cantidad para prevenir un descenso de pH ocasionado por la producción de AGV's.

Durante el mes de diciembre hubo un descenso en el pH debido al aumento en las fanegas procesadas lo que implicó un aumento en la carga del agua residual. En el cuadro 15, se puede apreciar que la cal necesaria para neutralizar el pH a la entrada del sistema es menor para el proceso de lavado que para el proceso de chancado, mientras que en el cuadro 16 se nota que la cal utilizada para neutralizar el agua residual que sale del filtro es mayor, debido a los procesos de fermentación y acidificación que se dan en el mismo.

Los cuadros 15 y 16 indican las cantidades de cal necesarias por m³ de agua residual producido y por fanega procesada, de modo que de acuerdo a un aproximado de fanegas que se espera procesar, se pueda obtener la cal necesaria para neutralizar el agua residual que se genere en el proceso.

Las pruebas indican que la cantidad de cal utilizada a la entrada del sistema es la adecuada para el proceso de chancado mientras que a la entrada de la laguna se esta añadiendo en exceso, la cantidad correcta se puede estimar con el cuadro 16 dependiendo de las fanegas a procesar.

11.5. Análisis Microscópicos.

En la laguna de lodos, predominaron algas que se clasifican como algas de aguas limpias, esto comprueba la estabilidad del lodo dispuesto en dicha laguna. En la laguna de oxidación, en el primer ensayo microscópico predominó el alga *Merismopedia sp.*, lo que indica una baja carga orgánica en el agua, sin embargo, para el segundo ensayo, esta fue la que se encontró en menor cantidad, siendo más importantes en número *Pyrobotrys sp* y *Chlorococcum sp.* Las cuales se clasifican como algas comunes de aguas contaminadas. En los análisis realizados al efluente del sistema, las algas encontradas nos indican como va disminuyendo su calidad hasta llegar a un punto donde la carga orgánica limitó el crecimiento de las microalgas hasta casi desaparecer por lo que los individuos encontrados fueron muy pocos.

En el tercer ensayo microscópico realizado al efluente (30 de octubre) se encontró un alga conocida como *Asterionella sp.*, la cual se clasifica como alga productora de malos olores, lo cual incide, a parte de los factores ya antes mencionados, en el incremento del olor en la laguna de oxidación.

La desaparición progresiva de dichas formas de vida, indica como la laguna va cambiando sus condiciones hasta comportarse como una laguna anaerobia.

12. CONCLUSIONES.

- Al alcanzar las 450 fanegas procesadas el caudal aumenta de tal forma que no se cumple con el Tr de diseño (9 días) para la laguna, causando bajas eficiencias de remoción de DBO (45% de remoción promedio)
- El hecho de que no entre caudal a la laguna en forma constante durante los fines de semana provoca desestabilización del sistema que se refleja en un descenso del pH y una alteración de los procesos biológicos de la laguna, disminuyendo la eficiencia del tratamiento (Cuadro 11).
- La disminución del pH genera un aumento de los malos olores, y aumenta la inhibición de la metanogénesis debido a los AGV`s.
- La Actividad Metanogénica Específica del lodo del FAFa, indica que purgar el lodo cada semana disminuye la calidad del mismo, provocando una pobre sedimentación y lavado del lodo y por ende disminuye la eficiencia del filtro.
- La formación de natas en la superficie de la laguna y la producción de malos olores es normal en un proceso anaerobio, pero ambos pueden ser controlados.
- Las pruebas de neutralización con cal indican que se está usando exceso de cal que baja la eficiencia del sistema.

- El sistema no cumple con la normativa para SSed, debido a una mala colocación del tubo de salida y a un exceso de algas al inicio de la cosecha.
- Las microalgas encontradas en la laguna de lodos indican la calidad del agua y la estabilidad de los lodos que en ella se encuentran.
- El sistema cumple con la normativa para DQO, DBO, SST, pH y temperatura establecida para el Vertido y Reuso de Aguas Residuales (Decreto Ejecutivo N°26042-S-MINAE) a pesar de las bajas eficiencias en remoción de DBO y DQO.

13. RECOMENDACIONES.

- Las purgas del lodo del filtro deben hacerse cada 20 días para que este madure y mejore su actividad metanogénica y lograr mejorar la eficiencia del filtro. La purga se debe hacer preferiblemente el día lunes antes de que inicie el proceso, ya que, en este periodo es cuando el filtro se encuentra en reposo de modo que se disminuya la pérdida de agua que no ha sido tratada.
- No es recomendable lavar el filtro introduciendo un caudal de agua limpia al final de la cosecha, porque con esto se estaría perdiendo buena parte de la biomasa metanogénica. Lo que se debe hacer es purgar el filtro hasta que no salga más lodo y dejar lo que no se pueda sacar ahí, de modo que la biomasa entre en un período de latencia y haya un inóculo adecuado para la próxima cosecha, para que no se presenten los problemas de mala calidad de lodo que se presentaron en esta.
- El bicarbonato de sodio es más efectivo que la cal (hidróxido de calcio) y no produce sedimentos, por lo que se recomienda realizar un estudio en el que se analice la posibilidad de aplicarlo en la entrada de la laguna, tomando en cuenta los costos del mismo.

- Para disminuir los olores en la laguna de oxidación se puede recircular el 40% del agua del efluente final a la entrada de la laguna mediante el empleo de una bomba portátil, lo cual mejoraría la calidad del efluente.
- Es necesario introducir un caudal mínimo de agua a la entrada de la laguna los fines de semana, básicamente durante el período en que no entra agua al sistema para mantener la hidráulica del sistema y no se afecten los procesos biológicos ni se altere el pH, esto también ayudaría al sistema. O bien que se mantenga la recirculación del agua durante este tiempo.
- Es necesario nivelar el tubo de salida de la laguna de oxidación, de modo que el tiempo de retención sea el mismo en toda la laguna. Además, debe bajarse el tubo a 20 cm del nivel superficial al que se encuentra el agua, para procurar que no haya salida de sólidos flotantes y que el efluente que se descargue sea el de mejor calidad.

14. BIBLIOGRAFÍA.

APHA, 1995. Estándar Methods for the Examination of water and wastewater. 20 ed. APHA-AWWA-WPCF.

Blanco, M; Perera, C. 1999. Dilemas de la reconversión del beneficiado de café en Centroamérica. San José, Costa Rica. Litografía e Imprenta Lil S.A. 56 p.

Cleves, R. 1995. Tecnología en Beneficiado de Café. San José, Costa Rica. Tecnicafé Internacional. 176 p.

Deloya, A. 1989. Evaluación del sistema de Tratamiento de Aguas Residuales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Vicerrectoría de Investigación y Extensión, Departamento de Química, ITCR. Cartago, Costa Rica. 40 p.

Fair, G. Geye, J. Okun, D. 1993. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. México. Limusa, 764 p.

Gloyna, E. 1973. Estanques de Estabilización de Aguas Residuales. Organización Mundial de la Salud. Ginebra. 192 p.

Metcalf, L. Eddy, H. 1996. Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera ed. México, D. F., México. McGraw-Hill. 1460 p.

Meza, N. "Comportamiento de un filtro anaerobio de flujo ascendente". www.edomexico.gob.mx/se/quimica.htm 20-10-2001

- Morales, A. 1979. Caracterización de Aguas Residuales del Beneficiado de café. Centro de Investigaciones en Café (CICAFE) San José, Costa Rica. 23 p.
- Reglamento sobre Vertido y Reuso de Aguas Residuales. 1997. Decreto Ejecutivo N° 26042-S-MINAE.
- Repetto, G., Todezno, P. 1991. Apuntes sobre aguas negras. 2da Edición. Cooperación Italiana. San Salvador, El Salvador. 77 p.
- Rigola, M. 1999. Tratamiento de Aguas Industriales, Aguas de proceso y residuales. México, D.F. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. 157 p.
- Ulloa, J. 1993. *Los distintos sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales y su Ámbito de Aplicación. Parámetros Físicos, Químicos y Biológicos.* En Tratamiento de Aguas Residuales, Basuras y Escombros en el Ámbito Rural. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid, España. 406 p.
- Wasser, R. 1995. Tratamiento Anaerobio de aguas residuales del Café. Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE). Heredia, Costa Rica. 57 p.
- Wasser, R. 1996. Planta de Tratamiento de aguas residuales del café. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente. Manual de Laboratorio. Beneficio Coopronaranjo R.L. B.T.G. de Centroamérica. 106 p.

ANEXOS

Anexo 1. Componentes del sistema de tratamiento de aguas residuales de la planta Santa María.



Figura 1. Tamiz, ubicado a la entrada del sistema de tratamiento.



Figura 2. Entrada al sistema de tratamiento.



Figura 3. Filtro anaerobio de flujo ascendente.



Figura 4. Filtro anaerobio (al fondo) y laguna de lodos.



Figura 5. Segundo dosificador de cal ubicado a la entrada de la laguna de oxidación.



Figura 6. Laguna de oxidación anaerobia.