

**Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, para
un beneficio húmedo de café.**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

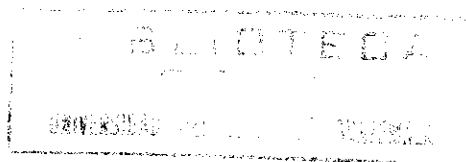
Facultad de Ciencias y Humanidades

Departamento de Ingeniería Química

**Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, para
un beneficio húmedo de café.**

Allan Estuardo Cifuentes Iralda

Trabajo de graduación presentado para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Química



Guatemala

2001

Asesor:

(f)

Ingeniero Gamaliel Zambrano

Tribunal examinador:

(f)

Ingeniero José Eduardo Calderón

(f)

Ingeniero Gamaliel Zambrano

(f)

Ingeniero Héctor Gudiel

Fecha de aprobación: Guatemala, 28 de septiembre de 2001.

AGRADECIMIENTOS

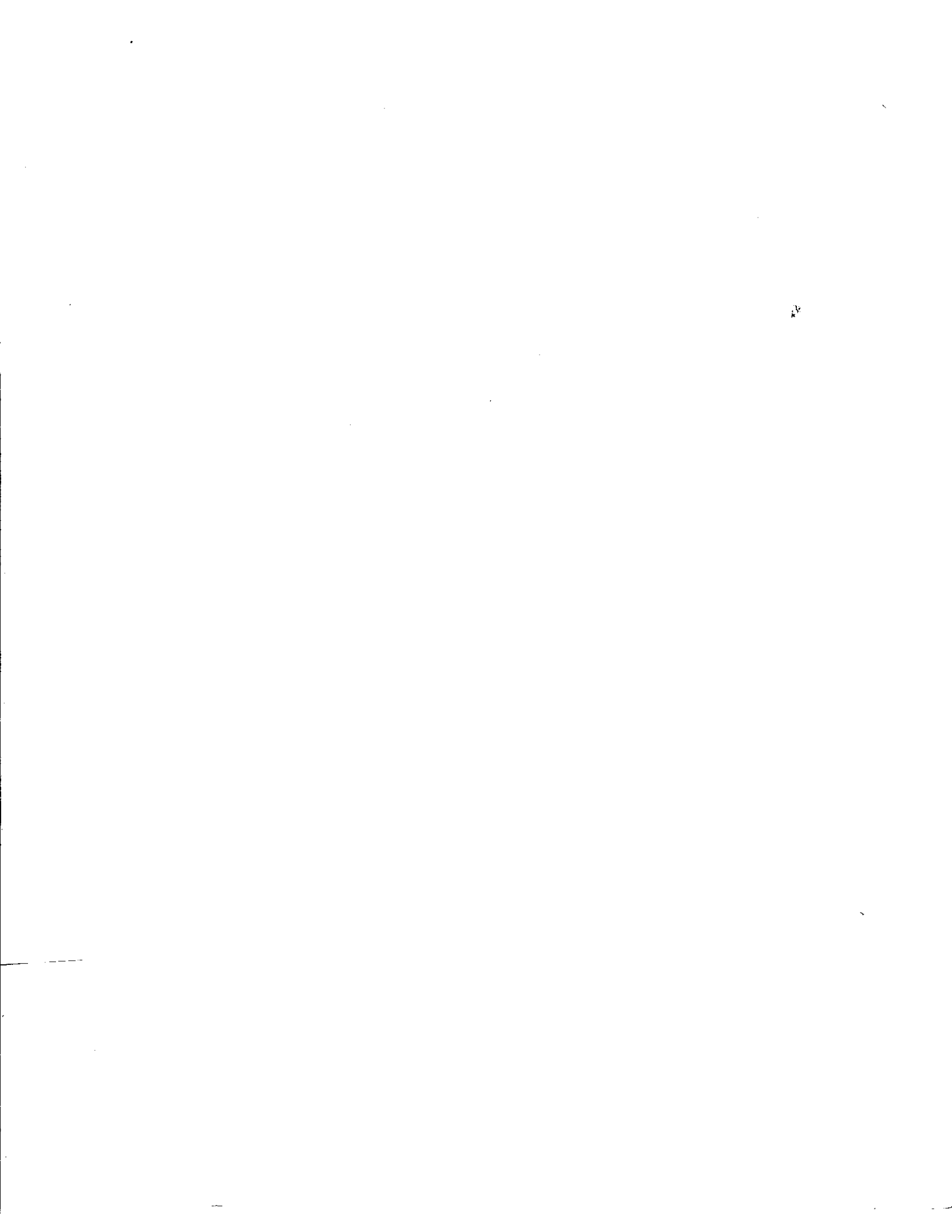
Agradezco de todo corazón a:

Dios

Mis padres

Mi novia

Mis hermanos.



ÍNDICE

	Página
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE GRÁFICOS	x
RESUMEN	xi
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
III. JUSTIFICACIÓN	19
IV. OBJETIVOS	21
V. PROBLEMA A RESOLVER	22
VI. METODOLOGÍA	23
VII. RESULTADOS	24
A. Condiciones de flujos y características de las aguas servidas	24
B. Reglamentaciones existentes sobre descarga de aguas servidas provenientes de beneficiado de café	25
C. Diseño del proceso	25
D. Condiciones de aguas residuales a la salida del proceso	28
E. Estimación de la inversión	28
VIII. DISCUSIÓN	29
IX. CONCLUSIONES	34
X. RECOMENDACIONES	36
XI. BIBLIOGRAFÍA	37
Apéndices	39
Apéndice A: Condiciones climatológicas del área	39
Apéndice B: Localización de la planta de tratamiento	40
Apéndice C: Cálculos de la etapa de estandarización	41
Apéndice D: Flujo de cal necesario para la etapa de neutralización	46
Apéndice E: Cálculos para la etapa de flotación y sedimentación	58

Apéndice F: Dimensionamiento y cálculos del tratamiento aeróbico	64
Apéndice G: Determinación de las condiciones finales de las aguas residuales a la salida del proceso	71
Apéndice H: Gráficos utilizados para el diseño y dimensionamiento del proceso	72

v

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Condiciones generales del agua utilizada para el proceso de beneficiado húmedo	24
2. Condiciones generales del efluente del proceso de despulpado de café	24
3. Condiciones generales del efluente del proceso de lavado y correteo de café	24
4. Límites permisibles en los parámetros de descarga de aguas servidas del beneficiado húmedo del café	25
5. Equipo necesario para cada etapa del proceso	26
6. Condiciones finales de las aguas residuales a la salida del tratamiento biológico	28
7. Resultados obtenidos de la neutralización con caliza dolomítica de muestras de 243.0mL de agua con pH=4.41	47
8. Resultados de análisis estadístico aplicado a los valores estadísticos de la neutralización	51
9. Intervalos de confianza para una precisión del 95%	52
10. Valores de la t de Student	72
11. Valores de saturación de oxígeno y corrección de valores $K_{L,a}$ vrs. Temperatura	73
12. Factores de corrección por altitud	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico	Página
1. Reactor-clarificador, diseñado para coagulación y sedimentación	11
2. Una laguna aireada es aeróbica si es bien mezclada, facultativa si hay presencia de sólidos en descomposición en el fondo	13
3. Un filtro de goteo es un reactor biológico de cama empacada, a menudo provisto de recirculación	15
4. Los contactores biológicos rotatorios (RBC's) son reactores aeróbicos usualmente operados en series	16
5. En un depósito de oxidación, el amoníaco es nitrificado biológicamente en la sección aeróbica, luego es desnitrificado en la sección anaeróbica	17
6. Diagrama general del proceso	25
7. Balance de masa en la etapa de estandarización	26
8. Balance de masa de la etapa de neutralización	27
9. Balance de masa de la etapa de separación por flotación y sedimentación	27
10. Balance de masa en la etapa de estandarización	41
11. Balance de masa en la etapa de neutralización	54
12. Tanque de separación por flotación y sedimentación	59
13. Balance de masa en la etapa de flotación y sedimentación	60
14. Vista en elevación del tanque de tratamiento biológico	68
15. Vista en planta del tanque de tratamiento biológico	68
16. Relación de desempeño para sistemas de aireación por burbujeo difuso	72

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra la evaluación de alternativas, selección, diseño y dimensionamiento de una planta de tratamiento aeróbico de aguas residuales provenientes del proceso de beneficiado húmedo de café para la finca Buenos Aires, ubicada en el municipio de Nueva Santa Rosa, departamento de Santa Rosa.

El proceso consta de cuatro etapas, la primera es la estandarización, donde se homogenizan dos flujos de aguas residuales, uno proveniente del proceso de despulpado de café y el otro proveniente del proceso de lavado y correteo del café, dando como resultado un flujo de 0.054L/s de aguas residuales, con $\text{pH}=4.41$, una demanda química de oxígeno de 4553mg/L, una demanda bioquímica de oxígeno de 2021mg/L, un porcentaje de sólidos en suspensión de 1.85% v/v y un porcentaje de partículas flotantes igual a 0.92%.

Luego de la etapa de estandarización, el flujo de aguas residuales pasa a la etapa de neutralización, en donde se le agrega al flujo de agua 0.014L/s de una mezcla de caliza dolomítica en agua, dando como resultado un pH igual a 7.12.

La tercera etapa consiste en una separación por flotación y sedimentación, la cual se lleva a cabo en un tanque con una capacidad de 530L, en la primera parte del tanque se separan las partículas flotantes y luego se separan los sólidos sedimentables quedando en el fondo del tanque.

Finalmente el flujo de aguas residuales entra a un tanque de 1.90m de largo por 1.90m de ancho por 3.35m de profundidad, donde se lleva a cabo el tratamiento aeróbico, el cual se airea por burbujeo en el fondo del tanque con un flujo de aire de 12.51L/s, proporcionado por un compresor alternativo de 1hp de potencia, permitiendo una remoción del DBO_5 del 95%. Al finalizar el proceso, se descarga un flujo de aguas residuales de 0.065L/s con un DQO de 188.65mg/L, un DBO_5 de 83.75mg/L y un pH de 7.13.

El costo total de la inversión es de Q 15,380.00, con instalación incluida, que es una inversión muy válida tomando en cuenta las repercusiones que puede traer la contaminación de los ríos y lagos en la actualidad.

I. INTRODUCCIÓN

En Guatemala, el café es el principal rubro agrícola de exportación. Todas las etapas que anteceden a su exportación son importantes. En este trabajo se puso mayor énfasis en el beneficiado húmedo, específicamente en el tratamiento de los desechos líquidos que se producen.

El beneficiado húmedo en Guatemala es especial porque se efectúa directamente en las fincas. En Guatemala hay alrededor de 3000 beneficios diseminados en todo el país, mientras que en otros países, se hace en centrales de acopio de la fruta, por lo que hay un número reducido de beneficios. Al considerar la toxicidad de los desechos que se producen y que la mayoría de beneficios se encuentran localizados en las cercanías de ríos, lagos y otras fuentes de agua, el tratamiento de los mismos tiene un impacto ecológico muy importante.

Debido a que las aguas residuales del proceso de beneficiado del café cuentan con una gran carga de materia orgánica, biodegradable en su mayoría, el tratamiento idóneo es biológico en presencia de oxígeno. Es necesario realizar un pretratamiento de estandarización y neutralización a las aguas antes de alimentarlas al proceso biológico, debido a las condiciones de operación que se requiere.

El trabajo de graduación se elaboró para la finca Buenos Aires, localizada en el municipio de Nueva Santa Rosa, departamento de Santa Rosa, ya que dicha finca cuenta con los recursos y la disposición de elaborar un trabajo de esta índole.

En la finca Buenos Aires, debido a que la producción ha aumentado en años recientes, la forma de deshacerse actualmente de las aguas residuales, ya no se da abasto y se corre el riesgo de contaminar las fuentes de agua cercanas, por lo que hasta podría ser clausurado el beneficio si esto llegara a suceder.

II. ANTECEDENTES

A. Resumen histórico del cultivo

El café es originario de Etiopía; la especie arábiga es indígena, de la región que circunda el Lago Tana, localizada en una latitud entre los 12° y 16° Norte, Guatemala se encuentra localizada entre los 13.5° y 16° Norte (14).

De África, el café pasó a Asia por el Mar Rojo y el Golfo de Adén; de Etiopía a Yemen, principalmente por su Puerto de Moka. Aquí se extendió su cultivo en la parte tropical de Arabia cuyo límite septentrional es el trópico de Cáncer, poco más al Norte de la Meca. Los árabes exportaban su café, primero a Siria, Persia (Irak), Turquía y luego a Europa, cuidando que el grano perdiera su viabilidad como semilla para evitar su propagación. Pero con las peregrinaciones a la Meca, eventualmente el café llegó a India en el siglo XVII, con lo que salió de su reducto árabe y pronto se extendió por Sri Lanka y luego por las Islas del Archipiélago de la Sonda (Indonesia), la mayoría posesiones holandesas en esa época (14).

A principios del Siglo XVII, los holandeses llevaron el café de Java a Holanda, a sus invernaderos del Jardín Botánico de Amsterdam de donde lo distribuyeron a otros jardines botánicos de Europa, incluyendo el de París, en Francia. A partir de entonces ocurrieron hechos muy significativos en la historia del café como cultivo. uno es su introducción de Holanda a la Guyana Holandesa (Surinam) entre 1714 y 1718, y de aquí a la Guyana Francesa en 1719. Por esa época Francia llevaba el café a sus colonias de las Antillas, estableciéndose con éxito en la Isla de Martinica en 1723. Otro es la introducción hecha por los franceses en su colonia de la Isla de Bourbon procedente de Moka, en 1715. La importancia de estos hechos radica, primero en la introducción del café en América y segundo, su introducción en la Isla de Bourbon donde se dieron las circunstancias para que el café recibiera un notorio impulso como cultivo (14).

Los padres Jesuitas reciben el crédito de haber introducido el cafeto a Guatemala por el año 1760. Ellos lo trajeron como planta ornamental para sus jardines de Antigua Guatemala. De allí se propagó a otros lugares como la Hacienda del Soyate, Jutiapa, de Don Miguel Álvarez de las Asturias. El primer registro de cafeto en plantación data de 1800, como cultivo en las orillas de la Ciudad de Guatemala, sembrado por Don Juan Rubio y Gemir, esposo de Doña Inés Álvarez de las Asturias (hija de Don Miguel). Probablemente su plantación se originó en los cafetos del Soyate que sembrara su suegro. Poco después de 1800, el Padre Juarros se refirieron al cafeto como un cultivo de la provincia de la Verapaz. El 15 de noviembre de 1803, por Real Orden se impulsó el cultivo del cafeto al otorgar exoneración de Alcabala, diezmos y cualquier impuesto durante 10 años al cacao, café, azúcar y algodón. Estos acuerdos se ratificaron y ampliaron en 1805 y 1807. El fruto del cafeto quedó exonerado del pago de diezmos y de todo derecho o impuestos; en 1826 se reglamentó esta medida quedando incluido el cafeto como un cultivo (15).

A partir de 1860 surgieron las fincas grandes dedicadas al cultivo del cafeto en los Departamentos de Guatemala, Sacatepéquez, Suchitepéquez, Retalhuleu, Escuintla, Alta Verapaz, Jutiapa y Quetzaltenango. En 1865 el café de Guatemala se hizo representar en la Exhibición Internacional de París. En 1871 el cultivo del cafeto era ya un negocio lucrativo; se constituyó en el renglón principal de la economía de la nación y pasó a ocupar el primer lugar entre los productos de exportación. Durante las décadas de los 70 y 80 del Siglo XIX, se abrieron al café numerosas fincas de otros departamentos como Baja Verapaz, San Marcos, Huehuetenango, Santa Rosa, Sololá, Chimaltenango, Chiquimula, Zacapa, Jalapa, Quiché e incluso Petén (15).

B. Beneficiado del café

I. Fundamentos

El beneficio húmedo es el proceso del fruto maduro a pergamino. En Guatemala es especial porque el beneficiado se efectúa en las fincas. En otros países se hace en centrales

de acopio de la fruta; en Costa Rica hay 115 beneficios, en El Salvador, 35; en Guatemala, 3000. La construcción del beneficio en una finca es una inversión muy alta para el caficultor, ya que sólo funciona en un período de 3 meses y está diseñado para un pico de cosecha de 30 días. Una gran ventaja que tiene, es la obtención de alta calidad, ya que se usa mucho todavía los patios para secamiento al sol y hay un mejor control sobre las diferentes etapas del beneficiado, principalmente la de la fermentación y la del secamiento (11).

a. La recolección del fruto (La Cosecha)

El fruto del cafeto da su mayor calidad inherente cuando alcanza el máximo de madurez; su corte en este punto es indispensable para preparar un café lavado de primera. Debido a esto se enfatiza la conveniencia de llevar al beneficio el café maduro el mismo día (11).

b. El recibo del café maduro

El café que se recibe en el día debe permanecer el menor tiempo posible en los recibidores en seco y en los sifones se aprovecha para la primera limpieza de materiales extraños y para la separación del fruto anormal liviano (11).

c. El despulpado y los pulperos

El despulpado se facilita por la acción lubricante de la miel o mucílago que envuelve al grano con su pergamino. Un quintal en cereza da 60 libras de café despulpado y 40 libras de pulpa. El despulpado debe hacerse el mismo día que llega el fruto del campo para evitar los defectos por recalentamiento y fermentación en el grano. Si se acumula el fruto y no puede despulsarse el mismo día, hay que extenderlo para que se ventile o dejarlo entre agua y cambiarla cada 4 horas o bajo un chorro de agua corriente (11).

d. El lavado del café

Cuando el café ha alcanzado su fermentación completa está a punto de lavado para llegar a obtener un grano con el pergamino limpio, áspero, blanco y sin restos de miel en su hendidura. Posteriormente, el café se pasa por un correteo, que consiste en un canal con un pequeño desnivel donde el grano se clasifica y separa por gravedad. El grano más pesado y de mejor calidad queda en el fondo y las natas y residuos de cascarilla no separadas, durante el despulpado, flotan en la superficie y permiten su fácil eliminación (11).

e. El secamiento del café

El café lavado y escurrido tiene 55% de humedad; en un quintal hay 55 libras de agua y 45 libras de café seco; el secamiento tiene por objeto eliminar el agua hasta 10 ó 12% de humedad para su almacenaje (15).

C. Efluentes del beneficiado húmedo del café

Están formados principalmente por aguas de lavado y de despulpado del café, que usualmente se recirculan para ahorro de agua y para reducir el volumen de aguas de desecho (9).

La contaminación de las aguas con esta clase de desechos, se mide generalmente por la llamada Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) o bien por la Demanda Química de Oxígeno (DQO), las cuales están basadas en la determinación de la cantidad de oxígeno necesaria para que tales aguas resulten inofensivas para la vida vegetal acuática y los peces (9).

Las aguas de lavado del café fermentado tienen DQO muy variables de acuerdo a la cantidad de agua disponible (9).

La contaminación generada por los beneficios de café se basa fundamentalmente en un aporte de carga orgánica del lavado del mucílago fermentado y otros componentes del fruto, el cual le confiere ciertas características indeseables al agua de arrastre del mismo, ya que afectan básicamente sus cualidades organolépticas (olor, color y sabor). Durante el procesamiento del fruto, no se le da ningún aporte de contaminación por medio de microorganismos que puedan ocasionar enfermedades del tipo gastrointestinal, de igual manera no se hace uso de ningún reactivo químico que pueda contener metales pesados. (3).

D. Parámetros a supervisar en efluentes del beneficiado húmedo del café

Los parámetros generalmente seleccionados para la supervisión de este tipo de agua consisten básicamente en la medición de: potencial de hidrógeno o pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Totales y Sólidos Sedimentables. (2).

1. Potencial de Hidrógeno (pH):

Se define como el logaritmo negativo con base 10 de la concentración molar de iones hidrógeno.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (1)$$

En agua pura a 25°C con $[\text{H}^+] = 1.0 \times 10^{-7} \text{ M}$, el pH es $-\log(1.0 \times 10^{-7}) = 7.00$. Debido al signo negativo de la ecuación I, el pH disminuye a medida que aumenta la concentración de iones hidrógeno en una solución. Una solución ácida a 25°C en donde $[\text{H}^+]$ es superior a $1.0 \times 10^{-7} \text{ M}$ tiene un pH inferior a 7.00, en tanto una solución básica $[\text{H}^+]$ es menor a $1.0 \times 10^{-7} \text{ M}$, tiene un pH superior a 7.00 (5).

2. Demanda Bioquímica de Oxígeno de cinco días (DBO_5):

Es la cantidad de oxígeno (mg/L) que se tiene que agregar al agua de desecho para sostener la actividad de los microorganismos presentes en ella durante un período de cinco días (8).

3. Demanda Química de Oxígeno (DQO):

Es la cantidad de oxígeno (mg/L), de dicromato de potasio, necesaria para oxidar químicamente el agua residual en cuestión. Se aplican ciertos compuestos orgánicos no biodegradables. A pesar de ello, ambas, la DBO y la DQO, son medidas imperfectas de contenidos orgánicos, porque algunos compuestos inorgánicos se pueden oxidar mientras que algunos compuestos orgánicos, no (8).

4. Carbono Orgánico Total (TOC):

Otra medida de contaminación es la llamada Carbono Orgánico Total (TOC), que es una medida, expresada en mg/L, que se obtiene al oxidar toda la materia orgánica a dióxido de carbono. En esta medida se incluyen los compuestos orgánicos no biodegradables, al igual que ciertos químicos que causan sabores, olores y espumas en el agua (8).

5. Partículas flotantes (PF):

Es la cantidad de partículas sólidas con menor densidad que el agua, presentes en el líquido, generalmente se expresa con un porcentaje o kilos/m³ (2).

6. Sólidos Sedimentables (SS):

Indican la cantidad de sólidos en suspensión que se encuentran en el flujo de las aguas residuales, expresada en kilos / m³ o, partes por millón -ppm- (mg/L) (2).

7. Sólidos Totales (ST):

Es la cantidad de partículas sólidas que se encuentran presentes en el agua, sean sedimentables o no, generalmente se expresa con un porcentaje o kilos/m³ (2).

E. Tratamientos de aguas residuales

Hay tres tipos de tratamientos principales con los que se pueden manejar las aguas residuales, primarios, secundarios y terciarios. Los tratamientos primarios y secundarios pueden manejar la mayoría de las aguas residuales diluidas y no tóxicas, otras aguas tienen que ser pretratadas antes de ser alimentadas a estos procesos (7).

1. Tratamientos primarios

Éstos pre-tratan las aguas de desecho para un tratamiento biológico posterior. Entre los principales se encuentran:

a. Estandarización

Es uno de los dispositivos de tratamiento más importantes. Es adecuado utilizar descargas de aguas residuales concentradas. Es importante estandarizar los flujos y las concentraciones de desechos. Descargas periódicas de aguas de desecho tienen a saturar las unidades de tratamiento. La estandarización de los flujos tienden a disminuir los niveles de llenado de las unidades de tratamiento. Puede haber o no variaciones en los niveles máximos de concentraciones que soporta una unidad de tratamiento, depende de la duración del mezclado. Se debe añadir mezcla mecánica en desechos que son puramente químicos. Los desechos biodegradables normalmente requieren una mezcla con aireación, con lo que los microbios se mantienen aeróbicamente y se controla la producción de malos olores. Los sistemas de aireación difusa ofrecen una mejor mezcla que los equipos de aireación superficial mecánica bajo las mismas condiciones. Tanto la mezcla como la transferencia de oxígeno son importantes en las aguas residuales biodegradables. La

operación en ciclos regulares determina el tamaño de la unidad para estandarización. No se deben hacer estandarizaciones demasiado largas que permitan variaciones en los niveles de las aguas residuales. En una operación industrial de 5 días, 40 horas por semana es normal realizar una estandarización de 2 días tan grande como sea necesario para llevar a cabo una operación continua del tratamiento de aguas bajo condiciones uniformes (13).

b. Neutralización

Las aguas residuales ácidas o básicas se deben neutralizar antes de ser descargadas. Si una industria produce ambos tipos de aguas, ácidas y básicas, los desechos se deben mezclar en porcentajes adecuados para obtener niveles de pH neutros. La unidad de estandarización se puede usar también como unidad de neutralización. Cuando se necesita una neutralización química, el material más fácil de utilizar es el hidróxido de sodio en forma líquida y se puede emplear en varias concentraciones sin necesitar equipo muy sofisticado. La cal es el material de preferencia. Se utiliza cuando los flujos son lentos y hay suficiente tiempo para la reacción. El ácido sulfúrico es el principal ácido para neutralizar flujos con pH alto, aunque el sulfato de calcio se puede precipitar como resultado de la neutralización. Se puede utilizar ácido clorhídrico para neutralizar desechos básicos si el ácido sulfúrico no está permitido en el área. Para neutralizaciones muy débiles, se puede emplear dióxido de carbono para llevar a cabo la reacción (13).

Entre otros tratamientos primarios se encuentran la remoción de aceites y grasas, que se pueden llevar a cabo por flotación, sedimentación o filtración (7).

2. Tratamientos secundarios

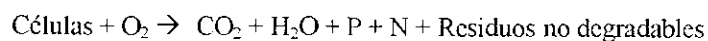
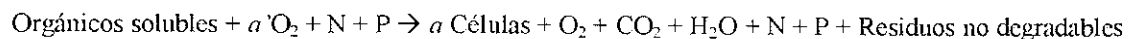
El tratamiento secundario es la degradación biológica de compuestos orgánicos solubles, de niveles a la entrada de 50 – 1000 mg/L DBO y aún mayores a niveles de salida típicos por debajo de 15 mg/L (7).

En tratamientos biológicos, las bacterias y otros microorganismos se precipitan y metabolizan los materiales solubles y coloidales presentes en las aguas de desecho, reduciendo el DBO y el DQO a 10-100 mg/L. A pesar de ello no se degradan todos los compuestos orgánicos aunque se deje un tiempo largo (7).

La mayoría de los tratamientos biológicos se llevan a cabo aeróbicamente. El agua se airea y los microorganismos convierten los compuestos orgánicos en dióxido de carbono y nuevas células. En tratamientos anaeróbicos, los organismos producen metano y dióxido de carbono. En ambos procesos, la biomasa formada y los compuestos no degradables se precipitan y forman lodo (7).

a. Tratamientos aeróbicos

Los tratamientos de aguas de desecho aeróbicos involucran dos tipos de reacciones, una del crecimiento y metabolismo normal de las bacterias y otras células, y otra para la oxidación de su propia materia celular (respiración endógena). Para que el proceso funcione adecuadamente, las células deben forzarse a crecer más rápido de lo que están acostumbradas, lo cual produce lodos:



En la primera reacción, a es la fracción de orgánicos removida que es convertido a nuevas células (mg VSS/mg orgánicos), y a' es la cantidad de oxígeno (mg O_2 /mg orgánicos) necesaria para esto. La tasa de la segunda reacción es b . Esto es la fracción de biomasa degradable oxidada por día (7).

Entre los tratamientos biológicos aeróbicos se encuentran:

a) Tratamiento de lodos activados

En este proceso se reduce la demanda bioquímica de oxígeno a menos de 10-15 mg/L y la demanda bioquímica de oxígeno total, que incluye sólidos suspendidos, es reducida a menos de 30 mg/L. Se prefiere en casos en que es importante la calidad del efluente, el espacio es limitado y el flujo del agua de desecho es mayor de 100,000 gal/día. Trabaja con tiempos de retención cortos y se debe tener cuidado con compuestos tóxicos (7).

Los compuestos orgánicos son degradados por bacterias en recipientes aireados con agitación, y la biomasa se acarrea hacia un clarificador junto con los efluentes, donde los sólidos se depositan en el fondo, se concentran y se remueven. Parte de los lodos se sacan como desecho, el resto se recircula hacia el recipiente de aireación de nuevo, para mantener una concentración alta de bacterias en el sistema. La agitación se puede hacer con la ayuda de agitadores mecánicos o por medio del flujo de aire utilizado para la aireación (7).

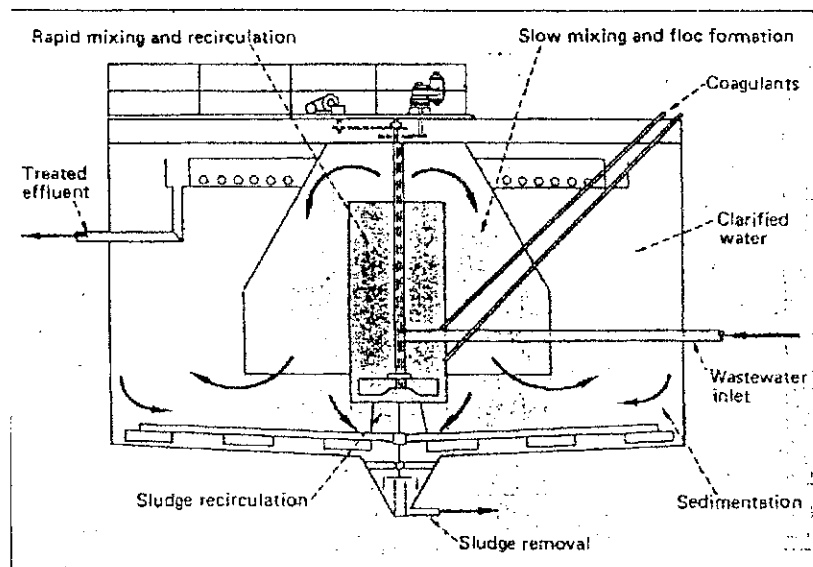


Gráfico No. 1. Reactor-clarificador, diseñado para coagulación y sedimentación (7)

Para que el proceso funcione adecuadamente, los lodos deben sedimentar rápidamente en el clarificador y esto ocurre si las bacterias se aglomeran unas con otras formando flóculos firmes. Un exceso de organismos filamentosos da como resultado flóculos suspendidos o difusos que sedimentan lentamente. Un problema muy común es el de los lodos a granel. El crecimiento de filamentos es favorecido cuando el oxígeno disuelto y el DBO es muy bajo, los organismos filamentosos tienen mayor área superficial, por lo que utilizan mayor cantidad de oxígeno y alimentos que los otros antes de formar flóculos. Los organismos que floculan fácilmente, por otro lado se ven favorecidos por cantidades grandes de oxígeno disuelto y altos valores de DBO. También pueden oxidar compuestos químicos orgánicos complejos que los organismos filamentosos no pueden oxidar (7).

Los compuestos más complicados son tratados de mejor manera en reactores con agitación mecánica, los filamentos no representan un problema en este tipo de reactor. Si los orgánicos son muy concentrados, la biomasa permanecerá como partícula dispersa que pasará a través del clarificador y da como resultado un efluente con una cantidad muy alta de DBO. Temperaturas muy altas o concentraciones muy altas de compuestos inorgánicos presentes dan el mismo problema (7).

Los procesos de lodos activados remueven cantidades considerables de compuestos orgánicos prioritariamente contaminantes con eficiencias de hasta el 95%. Entre los contaminantes que pueden ser degradados se encuentran el nitrobenceno, el 2,4-dinitrobenceno, el fenol, el pentaclorofenol, el fenantreno y el naftaleno. Unos compuestos que pueden ser eliminados entre 5-50% hasta su totalidad se encuentran el benceno, el 1,2-diclorobenceno, el etilbenceno, el tolueno y el acetato de etilo. Luego algunos compuestos volátiles como el 1,2-dicloroetano, el 1,1,1-tricloroetano, el tricloroetileno y el 1,2-dicloropropano son removidos en 95% por arrastre con aire (7).

b) Aireación extendida

Es un proceso de lodos activados operado con tiempos de retención mayores. Puede reducir el DBO a menos de 10mg/L, pero los sólidos que se acarrean pueden correr a razones de 50mg/L. Para limpiar estos efluentes usualmente se recurre a filtración o coagulación. Debido a los tiempos de retención tan grandes (12 a 24 horas), el proceso se considera únicamente para flujos menores a un millón de galones por día (7).

c) Lagunas aireadas

Tienen una profundidad entre 8 y 16 pies y varios acres de superficie, que son oxigenadas por agitación o por difusión para promover la biodegradación de compuestos orgánicos solubles. En lagunas aireadas, el oxígeno disuelto y los compuestos sólidos suspendidos se mezclan bien al utilizar entre 14 y 20 HP/millones de galones y los microorganismos son aeróbicos. En lagunas facultativas, sólo la superficie es agitada (4-10 HP/millones de galones), y algunos de los sólidos se sedimentan en el fondo, en el cual son descompuestos por microorganismos anaerobios, el metano junto con otros compuestos formados en el fondo son oxidados por los organismos aeróbicos en el agua cerca de la superficie (7).

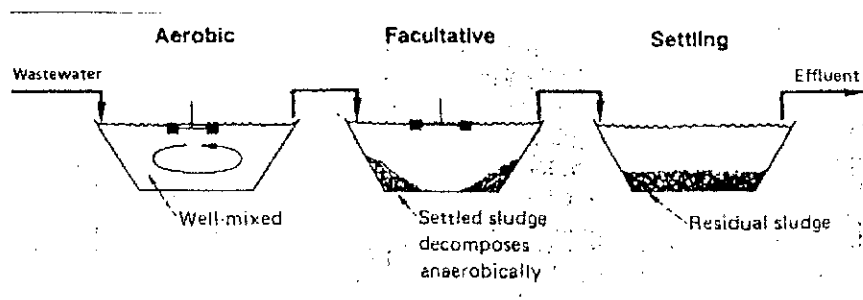


Gráfico No. 2. Una laguna aireada es aeróbica si es bien mezclada, facultativa si hay presencia de sólidos en descomposición en el fondo (7).

En el gráfico No. 2 se observa la configuración óptima de un sistema, una laguna aireada, seguida de una facultativa y luego por una laguna de sedimentación para limpiar el efluente de sólidos suspendidos. La laguna aireada degrada compuestos orgánicos solubles y aumenta la concentración de biomasa, tiene un tiempo de retención de 1 a 3 días. La laguna facultativa remueve el DBO residual y la mayoría de los sólidos suspendidos, en una retención de 3 a 6 días. Si los sólidos suspendidos son menores a 50mg/L, se necesita una laguna de sedimentación. Esta laguna debe ser lo suficientemente grande para que sedimenten los sólidos durante 10 años sin llenarse (7).

Este sistema de lagunas es comparable en la eficiencia con los procesos de lodos activados, no utiliza recirculación de lodos pero se necesitan grandes extensiones de terreno. Un inconveniente de este sistema es que reducen su eficiencia durante el invierno al estar al aire libre (7).

d) Filtros de goteo

Son reactores biológicos de cama empacada en que el empaque ya sea de plástico o de piedras es cubierto por una película o cortina de microorganismos aeróbicos. Conforme el agua de desecho pasa a través de la cama, el oxígeno se difunde en ella, los compuestos orgánicos son descompuestos por la película de microorganismos y se produce CO₂. Las camas antiguas eran diseñadas para utilizar piedras de 2 ¼ a 4 pulgadas empacadas con una profundidad de 3 – 8 pies, pero en la actualidad se prefiere la utilización de empaques de transferencia de masa de plástico, debido a que se puede empacar con grosores de 40 pies y pueden manejar más de 4 gal/pie²-min (7).

No pueden remover económicamente más del 85% del DBO, pero en general son más sencillos y baratos de operar que los sistemas de lodos activados que también pueden pretratar aguas de desecho muy cargadas económicamente. Un filtro opera para una remoción del 50% de DBO puede manejar varias veces la carga de DBO de una operación al 85%. En ese caso, parte del efluente tiene que recircularse para mantener las condiciones aeróbicas (7).

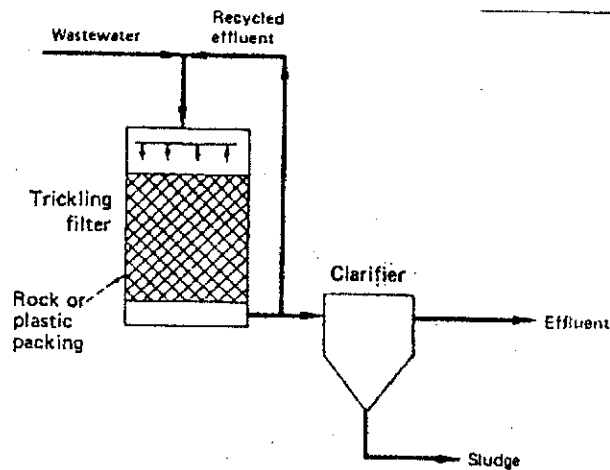


Gráfico No. 3. Un filtro de goteo es un reactor biológico de cama empacada, a menudo provisto de recirculación (7).

e) Contactores biológicos rotatorios (RBC's)

Un contactor biológico rotatorio es hecho con varios discos montados en un eje rotativo con aproximadamente el 40% de su volumen sumergido en un tanque de líquido de desecho. Los discos soportan películas de 1- 4mm. de microorganismos. El contactor rota, acarrea cierta cantidad de agua de desecho hacia el aire, permitiendo que los microorganismos oxiden los compuestos orgánicos solubles. En el agua, fuerzas de corte extraen el exceso de biomasa de los discos, la que es recolectada posteriormente en un clarificador (7).}

Los discos son hechos generalmente de polietileno de alta densidad, que tienen un área superficial de alrededor de $37 \text{ pies}^2/\text{pie}^3$. Una unidad simple puede tener hasta 12pies de diámetro y 25 pies de largo y hasta $100,000 \text{ pies}^2$ de superficie provista por cientos de discos. Un sistema RBC usualmente consiste de 2 – 4 RBC's en serie (7).

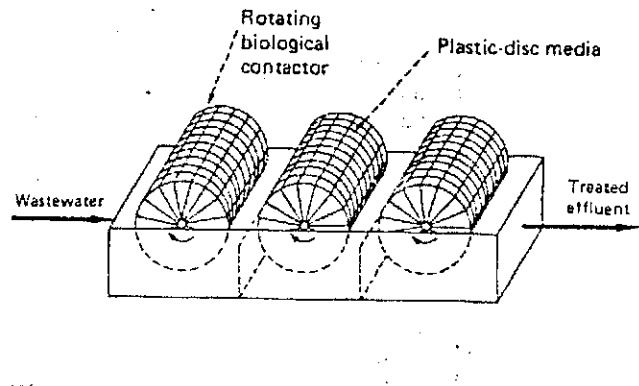
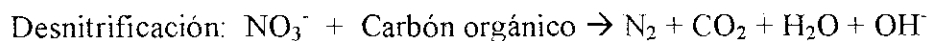
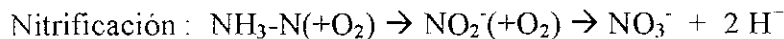


Gráfico No. 4. Los contactores biológicos rotatorios (RBC's) son reactores aeróbicos usualmente operados en series (7).

f) Remoción de nitrógeno biológicamente

El nitrógeno orgánico en aguas de desecho se puede convertir parcial o totalmente en amoníaco por un tratamiento biológico, pero este amoníaco se debe remover posteriormente y una corriente rica en NH_3 u otros compuestos de nitrógeno requiere modificaciones en el proceso biológico (7).

El amoníaco se remueve biológicamente convirtiéndolo en nitrato y luego en gas nitrógeno. Esto lo hacen diferentes organismos en dos etapas:



Los organismos nitrificantes son inhibidos por varios compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en los efluentes industriales. La nitrificación también es inhibida por el amoníaco libre por ácido nitroso libre. Esto se forma cuando el pH es muy alto, por lo que el control adecuado del pH es muy importante. El pH óptimo es 7.0 – 7.5. Se debe notar que la nitrificación genera H^+ suficiente para neutralizar 7.14 mg de álcali (como CaCO_3)/mg $\text{NH}_3\text{-N}$ oxidado. Por lo tanto, en ocasiones se debe agregar cantidades de piedra caliza o bicarbonato de sodio (7).

También es importante proveer suficiente oxígeno disuelto; 2 mg/L es recomendado para una nitrificación máxima. La desnitrificación, en contraste, se lleva a cabo en condiciones anaeróbicas. Esto también genera alcalinidad, pero es solamente la mitad de lo que se pierde en la nitrificación (7).

La nitrificación y la desnitrificación requieren una secuencia de procesos aeróbico y anaeróbico, con carbón orgánico presente y el pH correcto. Se puede llevar a cabo en un reactor de lodos activados con una cantidad limitada de oxígeno, de manera que el proceso anaeróbico se lleve a cabo en el centro de los flocúlos. Una aproximación simple y económica para este proceso se logra con plato de oxidación, que contiene un canal circular y un sistema de aireación para crear zonas aeróbicas y anaeróbicas (7).

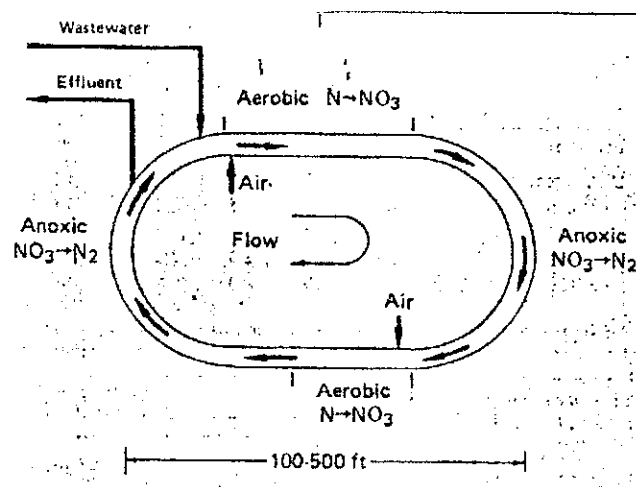


Gráfico No. 5. En un depósito de oxidación, el amoníaco es nitrificado biológicamente en la sección aeróbica, luego es desnitrificado en la sección anaeróbica (7).

Otra forma de lograr este proceso es utilizando una pila de sedimentación con aireación simple pero con un interruptor para la aireación de manera que se puedan desarrollar condiciones aeróbicas y anaeróbicas por turnos. Una forma más complicada es tener pilas separadas para nitrificación y desnitrificación (7).

Todos los procesos biológicos tienen eficiencias entre el 70% y el 95% y pueden remover el nitrógeno de todas formas, pero requieren tiempos de retención largos y son sensibles a cambios en la alimentación, a compuestos tóxicos y a la temperatura (7).

3. Tratamientos terciarios

Éstos se utilizan después de tratamientos biológicos para remover tipos específicos de desechos. Entre estos tratamientos se encuentran: Filtración, que remueve los sólidos suspendidos o coloidales; la adsorción con carbón activado granular (GAC) remueve compuestos orgánicos; la oxidación química también remueve compuestos orgánicos. Desafortunadamente, los procesos terciarios tienen que tratar grandes volúmenes de agua y eso los hace bastante costosos (7).

Los tratamientos existentes se pueden modificar para aprovechar al máximo sus capacidades y mejorar sus rendimientos. Un ejemplo es agregar carbón activado en polvo (PAC) a un tratamiento biológico para remover sustancias que los microorganismos no pueden degradar. Otra opción es agregar coagulantes al final del tratamiento biológico para remover el fósforo y sólidos suspendidos residuales (7).

III. JUSTIFICACIÓN

La contaminación de las fuentes de agua por desechos del beneficiado del fruto del cafeto en las zonas cafetaleras del país, es general. Esta contaminación es más marcada en las zonas donde la cosecha es concentrada, llueve menos que en otras regiones cafetaleras y los caudales de los ríos son más pequeños. La disminución de las precipitaciones pluviales, unido a la deforestación, ha contribuido a agravar la contaminación, debido a los deslaves y a que cada vez fluye menos agua por los ríos, lo que provoca mayores concentraciones de aguas mieles y pulpas al ser desechadas en los ríos. Los volúmenes de los desechos que se producen como resultado de la industrialización del café en el país, son gradualmente mayores, debido principalmente al incremento de la producción que se ha venido dando en los últimos años, por el uso de las modernas técnicas del cultivo e incentivos a la producción.

Las investigaciones que existen en Guatemala para evitar la contaminación por aguas servidas del beneficiado, es muy limitada. Las experiencias obtenidas en la investigación en busca de soluciones a este problema únicamente ha dado como resultado el ensayo en varias instalaciones que van desde los digestores para la producción de biogás y plantas de tratamiento a base de calcio, hasta los canales de oxidación, cuyo costo y eficiencia, en algunos casos, no ha sido evaluada y en otros pueden ser tratamientos o instalaciones con costos muy elevados o que requieren de personal especializado para la operación y mantenimiento.

En los últimos años, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), ha volcado sus esfuerzos en minimizar la contaminación de los recursos naturales y el medio ambiente en Guatemala, según el Acuerdo Gubernativo 60-89: "REGLAMENTO DE REQUISITOS MÍNIMOS Y SUS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINACIÓN PARA LA DESCARGA DE AGUAS SERVIDAS". Un alto porcentaje de esta contaminación es debida a la agro-industria del café, por lo que se ha implementado una serie de sanciones, que van desde multas hasta el cierre definitivo de los beneficios húmedos de café. Para evitar estas sanciones es de suma importancia que estas

instalaciones cuenten con sistemas de tratamientos de aguas residuales para las aguas servidas, que sean accesibles tanto tecnológica como económicamente a todos los beneficios húmedos de café en Guatemala, al utilizar al máximo los recursos disponibles en dichas instalaciones de proceso.

Siendo el café el principal rubro de exportación, que genera el mayor porcentaje de divisas y ocupación de más de 2,000,000 de guatemaltecos, el problema cobra una magnitud que justifica plenamente el estudio y que es necesario volcar esfuerzos y adjudicar recursos para evitar la contaminación de las fuentes de agua provocada por los desechos de la cosecha, provenientes de la agro-industria del café.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo General

Diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales aeróbico para tratar los efluentes del proceso de beneficiado húmedo de café en la Finca Buenos Aires, ubicada en el municipio de Nueva Santa Rosa, departamento de Santa Rosa. De manera eficiente, al utilizar al máximo los recursos disponibles en el área y que se adapte a la topografía del terreno donde se encuentra ubicado el beneficio húmedo de la finca.

B. Objetivos Específicos

1. Determinar los flujos de aguas residuales del beneficiado húmedo de café de la finca, así como la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), durante los días pico de producción.
2. Investigar los niveles mínimos de DQO y DBO aceptados en los efluentes por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).
3. Diseñar un proceso y hacer un diagrama de flujo para el tratamiento de las aguas residuales provenientes del beneficiado húmedo del café.
4. Seleccionar y dimensionar el equipo necesario para un proceso aeróbico de tratamiento de aguas residuales que permita disminuir los niveles de contaminación por debajo de los aceptados por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).
5. Estimar la inversión necesaria para la fabricación y equipamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales.

V. PROBLEMA A RESOLVER

Diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales aeróbico para tratar los efluentes del proceso de beneficiado húmedo de café de una finca, que permita disminuir los niveles actuales de DQO (demanda química de oxígeno) y DBO (demanda bioquímica de oxígeno) hasta los valores permitidos por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Lo anterior se efectuará de manera eficiente y utilizando al máximo los recursos disponibles en el área y que se adapte a la topografía del terreno donde se encuentra ubicado el beneficio húmedo de la finca.

VI. METODOLOGÍA

A. Estudio de las condiciones

1. Condiciones climatológicas del área
2. Condiciones de flujos y características de las aguas servidas.

B. Estudio de leyes y normativas para aguas servidas

1. Reglamentaciones existentes
2. Posibles sanciones

C. Diseño del proceso

1. Localización de la planta de tratamiento
2. Diagrama del flujo del proceso
3. Evaluación de alternativas
4. Selección y diseño del equipo
5. Dimensionamiento del Equipo

D. Evaluación económica

1. Estimación de la inversión

VII. RESULTADOS

A. Condiciones de flujos y características de las aguas servidas

Cuadro No. 1. Condiciones generales del agua utilizada para el proceso de beneficiado húmedo.*

Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	70
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/L)	2
Sólidos en sedimentables (SS) (ml/100mL)	0.0
Sólidos totales disueltos (STD) (mg/L)	74
Nivel de acidez (pH)	7.80

* Análisis efectuados por el Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de ANACAFE.

Cuadro No. 2. Condiciones generales del efluente del proceso de despulpado de café.*

Flujo promedio diario (L/s)	0.019
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	9354
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/L)	4158
Sólidos en sedimentables (SS) (% v/v)	4.18
Nivel de acidez (pH)	4.18
Partículas flotantes (cascarilla y espuma) (% p/p)	2.51

* Análisis efectuados por el Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de ANACAFE.

Cuadro No. 3. Condiciones generales del efluente del proceso de lavado y correteo de café.*

Flujo promedio diario (L/s)	0.034
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	1896
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/L)	837.5
Sólidos en sedimentables (SS) (% v/v)	0.56
Nivel de acidez (pH)	4.63
Partículas flotantes (cascarilla y espuma) (% p/p)	0.0

* Análisis efectuados por el Laboratorio de Suelos, Plantas y Aguas de ANACAFE.

B. Reglamentaciones existentes sobre descarga de aguas servidas provenientes de beneficiado de café

Cuadro No. 4. Límites permisibles en los parámetros de descarga de aguas servidas del beneficiado húmedo del café.

Parámetro	Según Acuerdo Gubernativo 60-89*	Propuesta de ANACAFE**
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	3000 - 2500	1500
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (mg/L)	1500	500
Sólidos en sedimentables (SS) (mL/100mL)	10	2
Sólidos totales (ST) (%)	5	---
Nivel de acidez (pH)	5.2	6.5 - 8.5

* Acuerdo Gubernativo 60-89: "REGLAMENTO DE REQUISITOS MÍNIMOS Y SUS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINACIÓN PARA LA DESCARGA DE AGUAS SERVIDAS".

** "LA REGLAMENTACIÓN DE AGUAS SERVIDAS DEL BENEFICIADO HÚMEDO Y SUS IMPLICACIONES PARA EL SECTOR CAFETALERO".

C. Diseño del proceso

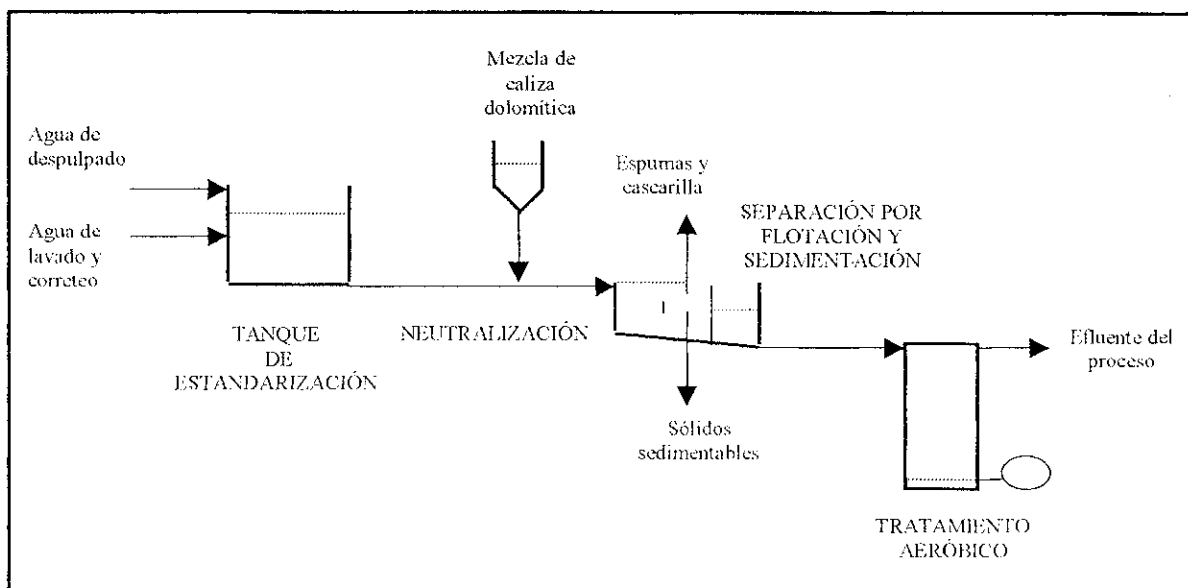
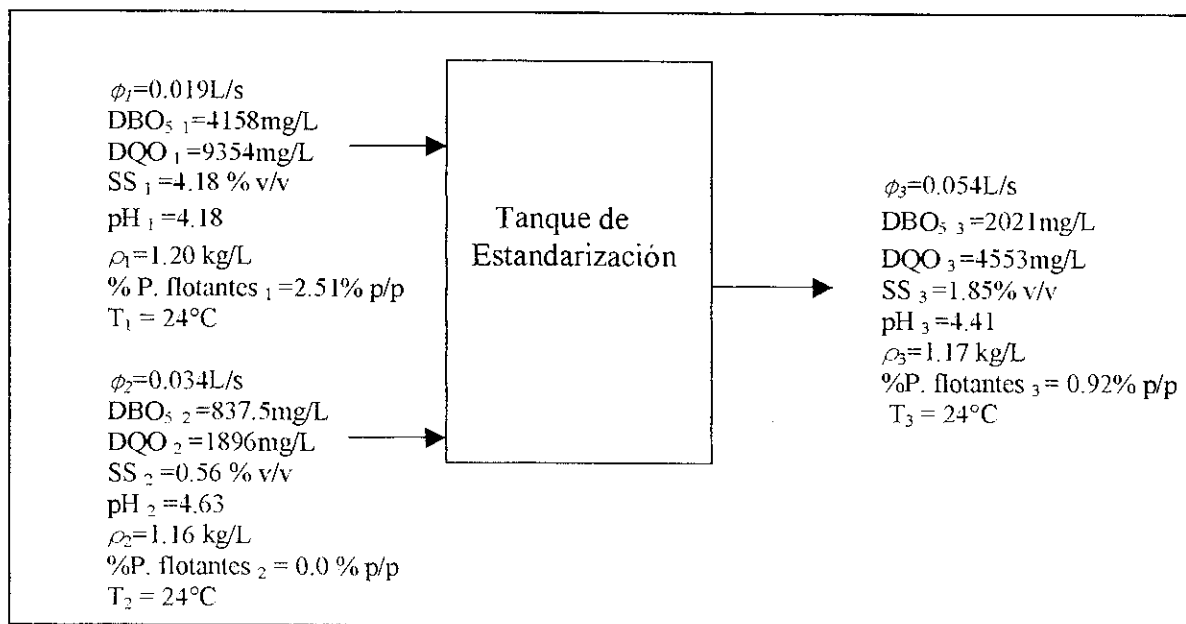


Gráfico No. 6. Diagrama general del proceso.

Cuadro No. 5. Equipo necesario para cada etapa del proceso.

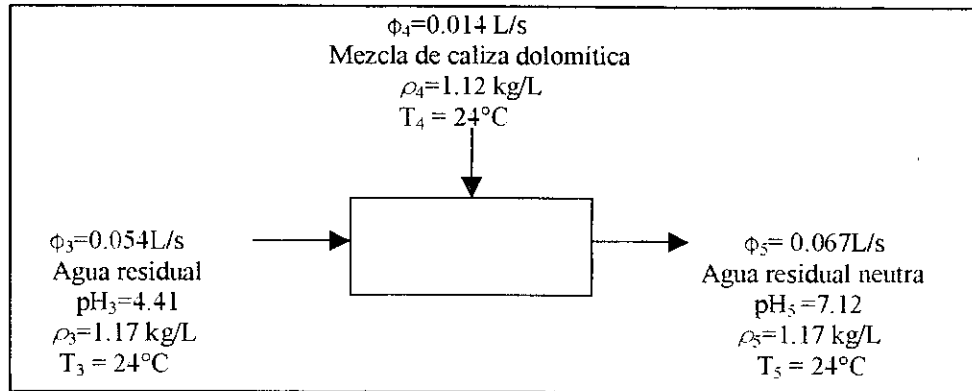
Etapa el proceso	Equipo necesario	Especificaciones
<i>Estandarización</i>	Tanque rectangular	Capacidad = 10,264 L
<i>Neutralización</i>	Tanque para mezcla de caliza dolomítica	Capacidad = 100 L
<i>Separación por flotación y sedimentación</i>	Tanque separador de sólidos flotantes y sedimentables	Capacidad = 530 L
<i>Tratamiento aeróbico</i>	Tanque de aireación	Capacidad = 11,679 L
	Compresor de aire alternativo	Potencia = 1 hp

Gráfico No. 7. Balance de masa en la etapa de estandarización.



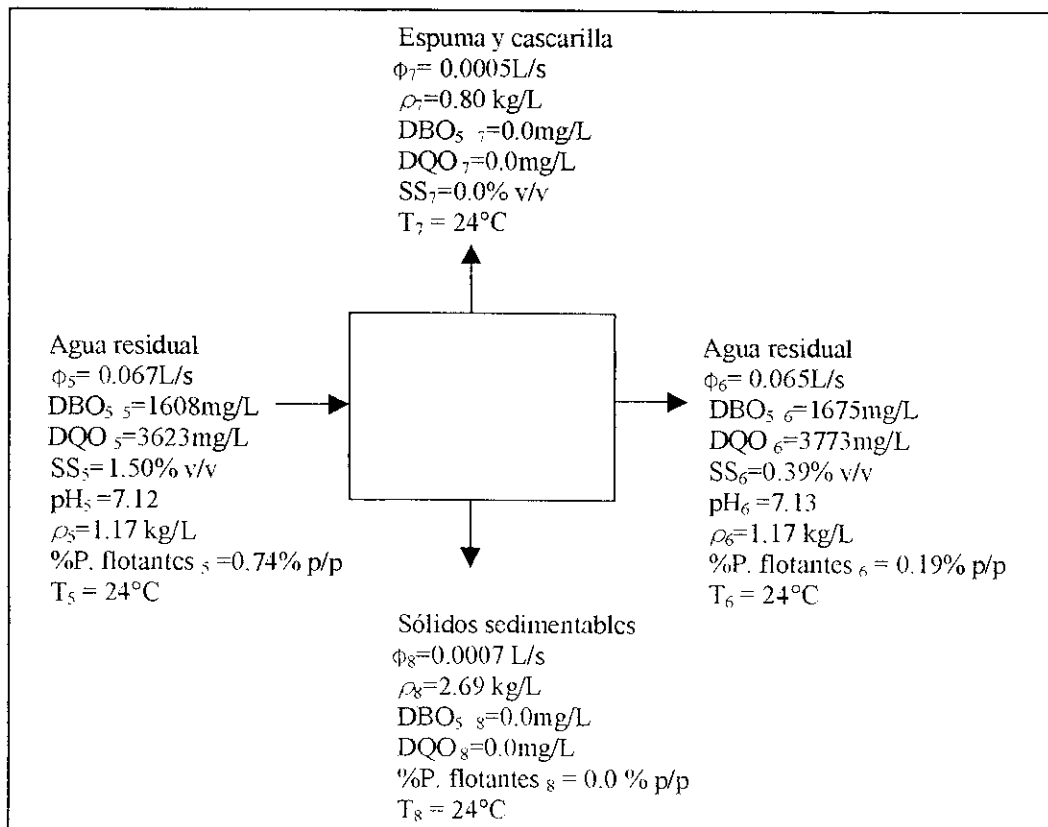
Ver apéndice C (página 41).

Gráfico No. 8. Balance de masa de la etapa de neutralización.



Ver apéndice D (página 46).

Gráfico No. 9. Balance de masa de la etapa de separación por flotación y sedimentación.



Ver apéndice E (página 58).

D. Condiciones de aguas residuales a la salida del proceso

Cuadro No. 6. Condiciones finales de las aguas residuales a la salida del tratamiento biológico.

Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	188.65
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) (mg/L)	83.75
Nivel de acidez (pH)	7.13

E. Estimación de la inversión

Compresor alternativo de 1hp	Q 1,900.00
Tubería para transporte (5 tubos de PVC de 2" x 5')	Q 400.00
Tubería para transporte (1 tubo de PVC de 1/2" x 5')	Q 45.00
Tubería para aireación (3 tubos de PVC de 3/8" x 5')	Q 35.00
Válvulas y accesorios	Q 1,500.00
Materiales de construcción para tanques	Q 7,000.00
Mano de obra	Q 3,000.00
Gastos imprevistos	Q 1,500.00
Total	Q15,380.00

El costo de la inversión asciende a quince mil trescientos ochenta quetzales (Q15,380.00).

VIII. DISCUSIÓN

Las condiciones climatológicas del área donde se pretende instalar la planta de tratamiento son bastante favorables para el proceso, teniendo en cuenta que durante la época del año en que se necesita echar a andar el proceso, que es entre los meses de noviembre y febrero, prácticamente no hay precipitaciones pluviales ni variaciones importantes en la temperatura del ambiente.

El desnivel de 20% que presenta el terreno donde se montará la planta de tratamiento permite que el flujo de agua hacia las distintas etapas del proceso se lleven a cabo por gravedad, evitando la utilización de bombas para su transporte. Esto minimiza la utilización de energía eléctrica u otro tipo de energía como combustibles derivados del petróleo.

Como se muestra en el cuadro No. 1, en la sección de resultados (página 18), el agua que se utiliza para el proceso de beneficiado de café en la finca tiene valores de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y sólidos sedimentables (SS) bastante bajos. Éstos se mantienen relativamente constantes durante la época del año en que funciona la planta de tratamiento, por lo que disminuyen las posibles variaciones en las condiciones de operación del proceso.

La etapa de estandarización permite tener un flujo continuo de aguas residuales hacia la etapa de neutralización y la mezcla de los flujos de aguas de despulpado y lavado da como resultado un flujo homogéneo, con valores de DQO, DBO₅, sólidos sedimentables, partículas flotantes y pH más adecuados para un tratamiento biológico aeróbico.

El tanque de estandarización se dimensionó con base en dos días de flujo continuo, con lo que se asegura que por ningún motivo cese el flujo de aguas residuales hacia el proceso de tratamiento, dando un margen de seguridad de hasta dos días en caso ocurra algún problema en la operación del beneficio. Dicho tanque se sobredimensionó en 10%, que es un porcentaje típico utilizado en la práctica, para evitar rebalses si hay algún aumento repentino en los flujos de agua.

El balance de masa para la etapa de estandarización, específicamente para el porcentaje de sólidos sedimentables, se hizo tomando en cuenta que tanto la densidad de los sólidos sedimentables en el flujo proveniente del despulpado, en el flujo del agua de lavado del café y en el flujo resultante a la salida de esta etapa es la misma, lo que permitió realizar el balance al utilizar volúmenes en lugar de masas.

La determinación del flujo de caliza dolomítica necesario para neutralizar el flujo de aguas residuales provenientes de la etapa de estandarización se hizo experimentalmente, al agregar cantidades conocidas de caliza dolomítica a un volumen dado de agua con el mismo pH que las aguas residuales (pH=4.41) y condiciones ambientales similares a las de operación del sistema de tratamiento y se supervisó el pH constantemente con la ayuda de un potenciómetro hasta obtener un pH neutro. Al comparar los resultados obtenidos para cinco repeticiones, presentada en el cuadro No. 7 en el apéndice D (página 47), con los valores mínimos y máximos aceptables para un nivel de confianza del 95%, presentados en el cuadro No. 9 del apéndice D (página 52), se observa que los resultados obtenidos para todas las repeticiones, caen dentro del intervalo de confianza, lo que demuestra que los resultados experimentales obtenidos son lo suficientemente precisos y confiables para utilizarlos en el dimensionamiento de la etapa de neutralización.

Se utilizó caliza dolomítica como agente neutralizador, ya que está constituida en un 70% por carbonato de calcio, que es una sal básica empleada frecuentemente en la industria para neutralizar medios ácidos, debido a su fácil manejo, precio accesible y disponibilidad en el mercado nacional.

La neutralización se lleva a cabo al agregar una mezcla de caliza dolomítica en agua directamente al flujo de agua residual proveniente de la etapa de estandarización, por lo que no se necesita de un tanque adicional para llevar a cabo el proceso. Para facilitar la medición de la caliza dolomítica necesaria para neutralizar, se hace una mezcla en agua, ya que es más fácil mantener un flujo continuo de un líquido que de un sólido, considerando que queda una fracción de caliza dolomítica que no se disuelve en agua.

En el balance de masa para la etapa de neutralización, se consideró, además que la densidad de los sólidos sedimentables es la misma para todos los flujos involucrados en dicha etapa y que la densidad de los sólidos sedimentables es igual a la densidad de la caliza dolomítica. Por otro lado asumió que el porcentaje de sólidos sedimentables en el flujo de caliza dolomítica y agua se debe principalmente a la materia inerte presente en la caliza dolomítica, la cual representa el 30% en peso del total de caliza dolomítica utilizado.

Como se observa en el gráfico No. 12 del apéndice E (página 59), el tanque utilizado para la separación de sólidos por sedimentación y flotación tiene un área de calma, en la que se separan las partículas flotantes y los sólidos sedimentables del flujo de aguas residuales. Las partículas flotantes están constituidas principalmente por espuma y residuos de cascarilla de café, los cuales tienen una densidad menor a la del agua, por lo que tienden a subir a la superficie, mientras que los sólidos sedimentables, al tener una densidad mayor a la densidad del agua se acumulan en el fondo del tanque. Las partículas flotantes son eliminadas por rebalse y los sólidos sedimentables se eliminan periódicamente del tanque por medio de una válvula de purga en el fondo del mismo. Para asegurar que no haya una cantidad muy elevada de sólidos a la salida del tanque, hay un segundo sedimentador justo antes de la salida del tanque y la descarga de las aguas residuales se hace por decantación.

La capacidad del tanque de flotación y sedimentación se hizo con base en un tiempo residencia de dos horas, que es un tiempo utilizado con éxito en la industria para eliminar al menos el 75% de los sólidos sedimentables. Al igual que el tanque de estandarización, el tanque de flotación y sedimentación se sobredimensionó en 10%, que comúnmente se usa en la práctica, para tener un porcentaje de seguridad en caso de algún imprevisto en el flujo de aguas residuales.

El balance de masa para la etapa de flotación y sedimentación se hizo al tomar una densidad promedio para las partículas flotantes igual a 0.80Kg/L, que es un valor promedio entre la densidad de la espuma y la de la cascarilla de café. Se asumió que la densidad de los flujos de aguas residuales a la entrada y a la salida del tanque permanecían constantes,

si bien es cierto que los sólidos sedimentables aumentan la densidad del agua, las partículas flotantes contrarrestan de cierta manera este incremento.

Para el tratamiento biológico de las aguas residuales, el sistema más adecuado para las condiciones tanto del agua como ambientales y de operación, es un tanque con aireación. Dicho sistema necesita un control relativamente simple y su operación es económica y tecnológicamente accesible para una finca de café. Para airear adecuadamente el tanque se requiere un compresor alternativo de 1hp de potencia, que trabajé con una eficiencia del 75%, conectado a una tubería perforada de PVC como se muestra en los gráficos No. 14 y 15 del apéndice F (página 68). Debido al burbujeo continuo, la biomasa se mantiene constantemente en suspensión y no es necesario un equipo extra de agitación. La disposición de la tubería en el fondo del tanque permite que haya una aireación homogénea y constante a lo ancho de todo el tanque. El tanque tiene una válvula de purga en el fondo para facilitar su limpieza y extracción de biomasa cuando sea necesario.

El dimensionamiento del sistema de tratamiento biológico se hizo con base en una remoción del 95% del DBO_5 , dando como resultado un efluente con concentraciones de DBO_5 y DQO menores a los límites aceptables en el “reglamento de requisitos mínimos y sus límites máximos permisibles de contaminación para la descarga de aguas servidas”. Se utilizó una concentración de sólidos volátiles suspendidos de 1500mg/L, que indica la concentración de biomasa necesaria para que se lleve a cabo la digestión de los contaminantes del agua residual. El valor de la constante cinética del proceso utilizada para el cálculo del tiempo de residencia es un valor típico para este tipo de tratamientos, que ha resultado ser adecuado para distintos tipos de aguas residuales.

En el cálculo del oxígeno necesario para el proceso, se emplearon valores de la fracción de sustrato usado para síntesis, constante de tasa endógena de utilización y fracción de sólidos volátiles suspendidos oxidables típicos usados con éxito en distintos tratamientos. Se tomó que el flujo de nitrógeno removido es cero debido a que las aguas residuales no contienen amonio. El factor de oxidación directa se asume que es cero ya que en el proceso no hay oxidación directa.

El flujo de oxígeno necesario se corrige a condiciones estándar para poder determinar el flujo de aire necesario por un método gráfico, lo que involucra correcciones por temperatura y por elevación. Se aumentó 15% al flujo de oxígeno por posibles imprevistos en el dimensionamiento del equipo. Se tomó un valor 3mg/L como concentración de oxígeno residual con base en que no hay nitrificación en el proceso. El valor utilizado de tasa de transferencia de oxígeno en el desecho dentro de tasa de transferencia de oxígeno en el agua es 0.8, que es un valor promedio entre el valor mínimo y el valor máximo para distintos tipos de aguas residuales.

El tanque de tratamiento biológico tiene una profundidad de 3.35m. Con esto se asegura una eficiencia en la aireación de al menos 75%, pues el recorrido del aire desde el fondo del tanque hasta la superficie es suficiente para oxigenar el medio y favorecer la degradación de los contaminantes. Además, al igual que los tanques de estandarización y sedimentación, tiene un sobredimensionamiento del 10% por seguridad, comúnmente utilizado en este tipo de tanques para evitar posibles problemas debido a variaciones en las condiciones de operación del proceso o climatológicas.

IX. CONCLUSIONES

1. El tanque de 10,264L de la etapa de estandarización tiene la capacidad de manejar los flujos de agua provenientes del despulpado y lavado de café equivalentes a 2 días de producción continua.
2. El tanque para la mezcla de caliza dolomítica almacena suficiente producto para neutralizar el flujo de aguas residuales durante dos horas continuas, dando tiempo suficiente al operador para medir la cantidad de caliza dolomítica a utilizar de forma adecuada y evitar así posibles errores en las mediciones.
3. Al utilizar una mezcla acuosa de 10g de caliza dolomítica por litro en la etapa de neutralización, se mide de mejor manera la cantidad de caliza dolomítica agregada al flujo de aguas residuales.
4. La capacidad de 530L del tanque de flotación y sedimentación, da un tiempo de residencia a las aguas residuales, suficiente para separar con el 75% de eficiencia los sólidos sedimentables, la espuma y los residuos de cascarilla.
5. En el tanque de tratamiento aeróbico, con un compresor alternativo de 1hp de potencia que proporciona 12.5 L/s de aire, que trabaje con una eficiencia del 75%, se remueve el 95% del DBO₅ de las aguas residuales.
6. Las condiciones de las aguas residuales descargadas al final del proceso de tratamiento aeróbico cumplen con las condiciones del “reglamento de requisitos mínimos y sus límites máximos permisibles de contaminación para la descarga de aguas servidas” y con la propuesta de la Asociación Nacional del Café ANACAFE para la reglamentación de aguas servidas del beneficiado húmedo y sus implicaciones para el sector cafetalero.

7. El sistema de tratamiento de aguas residuales se adapta satisfactoriamente a la topografía del terreno, valiéndose de la gravedad como medio principal para transportar las aguas residuales hacia las distintas etapas del proceso, al minimizar el uso de energía al prescindir de bombas para mover los fluidos.

X. RECOMENDACIONES

1. Debido a la importancia del pH en un sistema biológico de tratamiento de aguas residuales, se recomienda contar con potenciómetros para supervisar constantemente el nivel de acidez de las aguas residuales a la salida de la etapa de neutralización. De esta manera se asegura que el flujo de agua siempre se encuentre en un pH que no ponga en peligro la vida de los microorganismos responsables de la digestión de los contaminantes en la etapa de tratamiento aeróbico.
2. Se recomienda utilizar este trabajo como base para investigaciones futuras sobre contaminación ambiental, tanto en beneficios húmedos de café como en otras áreas.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Nacional del Café. 1995. *Hombres de Café*. Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ), 1ª ed. Guatemala. 166págs.
2. Asociación Nacional del Café. 1998. *Análisis de Situación del Beneficiado Húmedo del Café. Propuesta de Parámetros de Descarga de Aguas*. 1ª ed. Guatemala, Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ). 15págs.
3. Asociación Nacional del Café. 1998. *La Reglamentación de Aguas Servidas del Beneficiado Húmedo y sus Implicaciones para el Sector Cafetalero*. 1ª. ed. Guatemala. Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ). 13págs.
4. Bressani, R. 1979. «Potential Uses of Coffee-Berry By-Products.» En J. Braham & R. Bressani (ed.) *Coffee Pulp Composition, Technology, and Utilization*. Canadá. The International Development Research Centre. Págs. 17-24.
5. Brown, T., B. Bursten & H. LeMay. 1993. *QUÍMICA La Ciencia Central*. 5ª. ed. México. Prentice Hall Hispanoamericana, S. A.. 1159págs.
6. Departamento de Investigaciones de Café. 1992. *Memoria Técnica de Investigaciones en Café 90-91*. 1ª ed. Guatemala. Asociación Nacional de Café (ANACAFÉ). 152págs.
7. Eckenfelder Jr., W., J. Patoczka & A. Watkin. 1985. «Wastewater Treatment» *Chemical Engineering*. 2 (64): 60-74.
8. Howe, J., R. C. Howe, & R. H. Howe. 1981. «The Complications of BOD tests» *Chemical Engineering*. 30 (58) : 99-100.

9. Lipton, S. & J. Lynch. 1994. *Handbook of Health Hazard Control in the Chemical Process Industry*. 1ª. ed. Estados Unidos. John Wiley & Sons, Inc. 1003págs.
10. McCabe, W. et. al. 1993. *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. 4ª ed. México. McGraw-Hill. 1112págs.
11. Menchú, J.F. 1985. *Manual de Beneficiado de Café*. 2ª ed. Guatemala. Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ). 119págs.
12. Morjan, H. et. al. 1979. *Beneficiado y Aprovechamiento Integral de Subproductos del Café*. 1ª ed. Guatemala. INTECAP. 52págs.
13. Perry, R. & D. Green. 1984. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 6ª. ed. Estados Unidos. McGraw-Hill Inc.
14. Sub-Gerencia de Asuntos Agrícolas. 1991. *Manual de Caficultura*. 2ª ed. Guatemala. Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ). 169págs.
15. Sub-Gerencia de Asuntos Agrícolas. 1988. *Manual de Caficultura*. 1ª ed. Guatemala. Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ). 247págs.
16. Ukers, W. 1935. *All about Coffee*. 2ª ed. Estados Unidos. International Copyright Union. 820págs.

APÉNDICES

Apéndice A: Condiciones climatológicas del área

El beneficio húmedo de café está situado en el municipio de Nueva Santa Rosa, en el departamento de Santa Rosa. Se encuentra a 1500 metros sobre el nivel del mar. El área es montañosa, con una precipitación pluvial promedio de 1600mm³ anuales, concentrada entre los meses de mayo a septiembre. La temperatura ambiente oscila entre 15°C y 27°C.

Apéndice B: Localización de la planta de tratamiento

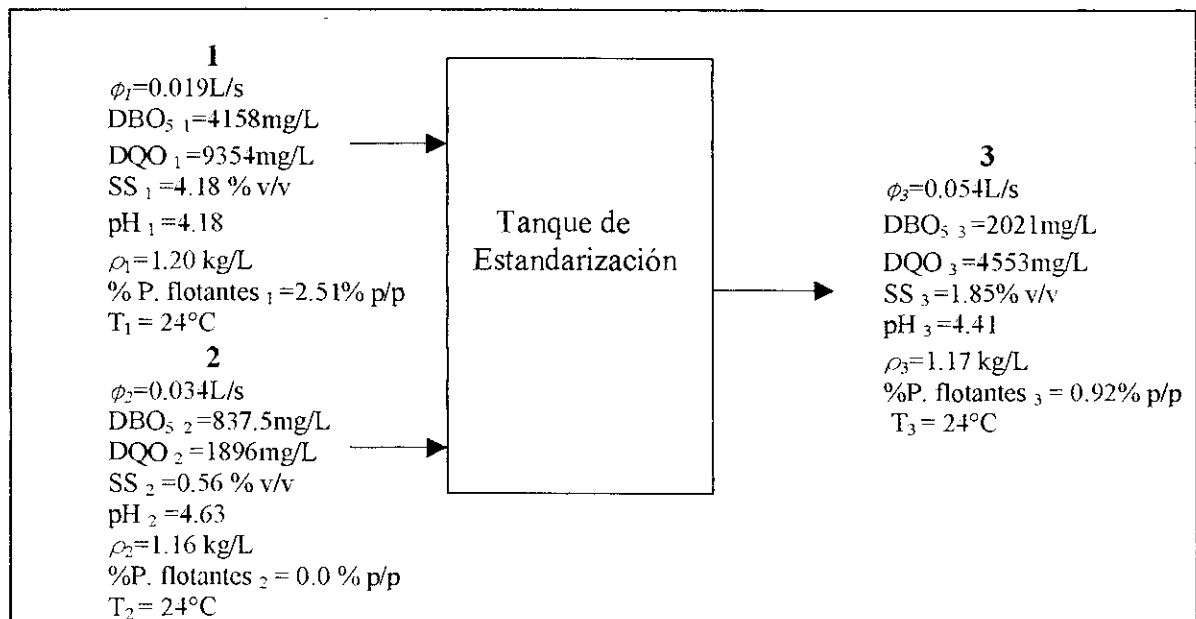
La planta de tratamiento se ubicará aproximadamente a 50 metros del beneficio húmedo, a orillas del río Las Flores. El área es parcialmente quebrada, con un desnivel de alrededor de 20%. El tipo de terreno es pedregoso, ligeramente arenoso, lo que permite una buena filtración de agua.

Apéndice C: Cálculos de la etapa de estandarización

La estandarización se lleva a cabo en un tanque rectangular de 10,264 litros de capacidad. En dicho tanque se recibe tanto el efluente del proceso de despulpado de café (Flujo No. 1) como el del proceso de lavado y correteo (Flujo No. 2).

1. Balance de masa en la etapa de estandarización:

Gráfico No. 10. Balance de masa en la etapa de estandarización.



Base: 1 hora.

$$1h \times \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 3600s$$

En el proceso de estandarización no hay acumulación, por lo tanto,

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

$$1 + 2 = 3$$

a. Masas de entrada y salida:

$$V_1 = 0.019 \text{ L/s} \times 3600s = 68.80 \text{ L}$$

$$m_1 = V_1 \times \rho_1 = (68.80 \text{ L}) \times \left(\frac{1.20 \text{ kg}}{1 \text{ L}} \right) = 82.56 \text{ kg}$$

$$V_2 = 0.034L / s \times 3600s = 122.40L$$

$$m_2 = V_2 \times \rho_2 = (122.40L) \times \left(\frac{1.16kg}{1L} \right) = 143.84kg$$

$$m_1 + m_2 = m_3$$

$$m_3 = 82.56kg + 143.84kg = 226.4kg$$

b. Flujo de aguas servidas a la salida de la etapa de estandarización:

$$V_3 = \frac{m_3}{\rho_3} = \frac{226.4kg}{1.17kg/L} = 193.50L$$

$$\phi_3 = \frac{V_3}{\text{Base de tiempo}} = \frac{193.50L}{3600s} = 0.054L/s$$

c. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) a la salida de la etapa de estandarización:

$$DBO_{5\ 1} = 4158mg/L$$

$$DBO_{5\ 2} = 1896mg/L$$

$$\text{masa } O_2\ 1 = (4158mg/L) \times (68.80L) = 2.86 \times 10^4 mg O_2$$

$$\text{masa } O_2\ 2 = (837.5mg/L) \times (122.40L) = 1.04 \times 10^5 mg O_2$$

$$\text{masa } O_2\ 1 + \text{masa } O_2\ 2 = \text{masa } O_2\ 3$$

$$\text{masa } O_2\ 3 = (2.86 \times 10^4 mg O_2) + (1.04 \times 10^5 mg O_2) = 3.90 \times 10^5 mg O_2$$

$$DBO_{5\ 3} = \frac{3.90 \times 10^5 mg O_2}{193.50L} = 2021mg/L$$

d. Demanda química de oxígeno (DQO) a la salida de la etapa de estandarización:

$$DQO\ 1 = 9354mg/L$$

$$DQO_2 = 1896 \text{ mg/L}$$

$$\text{masa } O_{2\ 1} = (9354 \text{ mg/L}) \times (68.80 \text{ L}) = 6.44 \times 10^5 \text{ mg } O_2$$

$$\text{masa } O_{2\ 2} = (1896 \text{ mg/L}) \times (122.40 \text{ L}) = 2.35 \times 10^5 \text{ mg } O_2$$

$$\text{masa } O_{2\ 1} + \text{masa } O_{2\ 2} = \text{masa } O_{2\ 3}$$

$$\text{masa } O_{2\ 3} = (6.44 \times 10^5 \text{ mg } O_2) + (2.35 \times 10^5 \text{ mg } O_2) = 8.79 \times 10^5 \text{ mg } O_2$$

$$DQO_3 = \frac{8.79 \times 10^5 \text{ mg } O_2}{193.50 \text{ L}} = 4553 \text{ mg/L}$$

e. Porcentaje de sólidos sedimentables (SS) a la salida de la etapa de estandarización:

$$SS_1 = 4.18\% \text{ v/v}$$

$$SS_2 = 0.56\% \text{ v/v}$$

$$V_{SS_1} = (68.80 \text{ L}_{ss}) \times \left(\frac{0.0418 \text{ L}_{ss}}{1 \text{ L}_{sol.}} \right) = 2.88 \text{ L}_{ss}$$

$$V_{SS_2} = (122.40 \text{ L}_{sol.}) \times \left(\frac{0.0056 \text{ L}_{ss}}{1 \text{ L}_{sol.}} \right) = 0.69 \text{ L}_{ss}$$

$$\rho_{ss_1} = \rho_{ss_2} = \rho_{ss_3}$$

$$V_{SS_1} + V_{SS_2} = V_{SS_3}$$

$$V_{SS_3} = (2.88 \text{ L}_{ss}) + (0.69 \text{ L}_{ss}) = 3.58 \text{ L}_{ss}$$

$$SS_3 = \left(\frac{V_{SS_3}}{V_3} \right) = \frac{3.58 \text{ L}_{ss}}{193.50 \text{ L}_{sol.}} \times 100 = 1.85\% \text{ v/v}$$

f. Porcentaje de partículas flotantes a la salida de la etapa de estandarización:

$$m_1 = 82.56 \text{ kg}$$

$$m_3 = 226.4 \text{ kg}$$

$$P.\text{flot.}_1 = 82.56 \text{ kg} \times \left(\frac{2.51 \text{ kg } P.\text{flot.}}{100 \text{ kg}} \right) = 2.07 \text{ kg}$$

$$P.\text{flot.}_1 = P.\text{flot.}_3 = 2.07 \text{ kg}$$

$$\%P.\text{flot.}_3 = \frac{P.\text{flot.}_3}{m_3} \times 100 = \frac{2.07 \text{ kg}}{226.4 \text{ kg}} \times 100 = 0.92\%$$

g. Potencial de hidrógeno (pH) a la salida de la etapa de estandarización:

$$pH_1 = 4.18$$

$$pH_2 = 4.63$$

$$pH = -\log([H^+]) \Rightarrow [H^+] = \log^{-1}(pH)$$

$$[H^+]_1 = \log^{-1}(-4.18) = 6.61 \times 10^{-5} \text{ M}$$

$$gmolH^+_1 = [H^+]_1 \times V_1 = (6.61 \times 10^{-5} \text{ gmol/L}) \times (68.80 \text{ L}) = 4.55 \times 10^{-3} \text{ gmolH}^+$$

$$[H^+]_2 = \log^{-1}(-4.63) = 2.34 \times 10^{-5} \text{ M}$$

$$gmolH^+_2 = [H^+]_2 \times V_2 = (2.34 \times 10^{-5} \text{ gmol/L}) \times (122.40 \text{ L}) = 2.90 \times 10^{-3} \text{ gmolH}^+$$

$$gmolH^+_1 + gmolH^+_2 = gmolH^+_3$$

$$gmolH^+_3 = (4.55 \times 10^{-3} \text{ gmolH}^+) + (2.90 \times 10^{-3} \text{ gmolH}^+) = 7.45 \times 10^{-3} \text{ gmolH}^+$$

$$[H^+]_3 = \frac{gmolH^+_3}{V_3} = \frac{7.45 \times 10^{-3} \text{ gmolH}^+}{193.50 \text{ L}} = 3.86 \times 10^{-5} \text{ M}$$

$$pH_3 = -\log([H^+]_3) = -\log(3.86 \times 10^{-5}) = 4.41$$

2. Volumen del tanque:

$$V_{\text{tanque}} = \phi_s \times t = (0.054L/s) \times (2\text{días}) \times \left(\frac{86400s}{1\text{día}}\right) = 9,331L$$

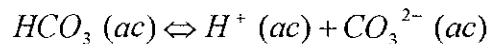
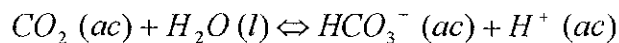
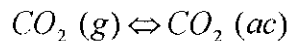
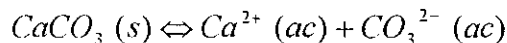
Factor de seguridad por imprevistos = 10%

$$V_{\text{tanque}} = 9,331L \times (1.10) = 10,264L$$

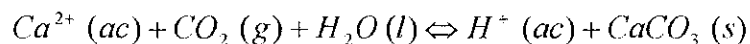
Apéndice D: Flujo de cal necesario para la etapa de neutralización

El proceso de neutralización consiste en agregar una sustancia básica como hidróxido de sodio o carbonato de calcio a las aguas residuales para disminuir la concentración de iones hidrógeno hasta obtener un valor de pH neutro. En esta etapa se utiliza caliza dolomítica, que contiene 70% de carbonato de calcio. Se agrega 0.014L/s de una mezcla de caliza dolomítica (10g caliza dolomítica / L mezcla) al efluente del tanque de estandarización y se obtiene un pH final de 7.12.

El proceso de neutralización se rige por la siguiente serie de reacciones:



Lo cual conlleva a la reacción resultante:



La fuente de carbonato de calcio utilizada para el proceso de neutralización es caliza dolomítica, la cual está constituida en un 70.0% de carbonato de calcio, 28% de carbonato de magnesio, 0.5% de óxido de silicio, 0.2% de óxido de hierro y 0.3% de óxido de aluminio.

1. Resultados experimentales de neutralización de aguas residuales con cal:

Condiciones ambientales del experimento:

- Temperatura: 24°C
- Presión: 0.84 atm.

Equipo utilizado durante el experimento:

- Potenciómetro marca Beckman modelo 302 pH meter.
- Balanza analítica OHAUS Analytical Plus modelo AB-110-0, precisión de 0.00005.

Cuadro No. 7. Resultados obtenidos de la neutralización con caliza dolomítica de muestras de 243.0mL de agua con pH=4.41.

No. de muestra	Cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar (g) (+/- 0.00005)	pH final de la muestra (+/- 0.01)
1	0.6180	7.03
2	0.6183	7.01
3	0.6179	7.05
4	0.6175	7.00
5	0.6185	7.01

2. Cálculos estadísticos para valores experimentales de neutralización:

a. Media aritmética:

Para calcular la media aritmética se utiliza la ecuación siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

donde, \bar{x} = media aritmética, x_i = i-esimo dato y n = número total de datos.

Ejemplo para la cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar:

$$\bar{x} = \frac{0.6180 + 0.6183 + 0.6179 + 0.6175 + 0.6185}{5} = 0.61804$$

La media aritmética para el pH final de la muestra se calcula de manera análoga.

b. Mediana:

La mediana es el valor central de la distribución al estar ordenada ya sea ascendente o descendente.

Ejemplo para la cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar:

Distribución ordenada en orden ascendente:

(0.6175, 0.6179, 0.6180, 0.6183, 0.6185)

La mediana de la distribución es 0.6180.

La mediana para el pH final de la muestra se calcula de manera análoga.

c. Moda:

La moda es el valor de la distribución que más veces se repite.

Ejemplo para la cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar:

Distribución ordenada en orden ascendente:

(0.6175, 0.6179, 0.6180, 0.6183, 0.6185)

Para esta distribución no hay ningún valor que se repita, por lo tanto no hay moda.

La moda para el pH final de la muestra se calcula de manera análoga.

d. Desviación estándar:

Para calcular la desviación estándar se utiliza la ecuación siguiente:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

donde, s = desviación estándar, \bar{x} = media aritmética, x_i = i-esimo dato y n = número total de datos.

Ejemplo para la cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar:

$$s = \sqrt{\frac{(0.6180-0.6180)^2 + (0.6183-0.6180)^2 + (0.6179-0.6180)^2 + (0.6175-0.6180)^2 + (0.6185-0.6180)^2}{5-1}}$$
$$s = 0.0004$$

La desviación estándar para el pH final de la muestra se calcula de manera análoga.

e. Varianza:

Para calcular la varianza se utiliza la ecuación siguiente:

$$s^2 = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

donde, s = desviación estándar, \bar{x} = media aritmética, x_i = i-esimo dato y n = número total de

datos.

Ejemplo para la cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar:

$$s^2 = (0.0004)^2 = 0.0000$$

La varianza para el pH final de la muestra se calcula de manera análoga.

f. Rango:

El rango se calcula con la fórmula siguiente:

$$\text{rango} = \text{máximo} - \text{mínimo}$$

Ejemplo para la cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar:

$$\text{rango} = 0.6185 - 0.6175 = 0.001$$

El rango para el pH final de la muestra se calcula de manera análoga.

g. Nivel de confianza (95%):

El nivel de confianza se calcula con la fórmula siguiente:

$$\text{nivel de confianza} = \frac{ts}{\sqrt{n}}$$

donde, t = t de Student para $n-1$ grados de libertad, s = desviación estándar y n = número de datos.

Ejemplo para la cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar:

$t = 2.776$, ver cuadro No. 10 en apéndice H (página 72), para 4 grados de libertad y nivel de confianza del 95%.

$$\text{nivel de confianza} = \frac{(2.776) \times (0.0004)}{\sqrt{5}} = 0.0005$$

El nivel de confianza para el pH final de la muestra se calcula de manera análoga.

h. Resultados del análisis estadístico aplicado a los valores de neutralización:

Cuadro No. 8. Resultados de análisis estadístico aplicado a los valores estadísticos de la neutralización.

No. de muestra	Cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar (g)	pH final de la muestra
<i>Media aritmética</i>	0.61804	7.02
<i>Mediana</i>	0.6180	7.01
<i>Moda</i>	---	7.01
<i>Desviación estándar</i>	0.0004	0.0200
<i>Varianza de la muestra</i>	0.0000	0.0004
<i>Rango</i>	0.001	0.05
<i>Mínimo</i>	0.6175	7
<i>Máximo</i>	0.6185	7.05
<i>Suma</i>	3.0902	35.1
<i>Cuenta</i>	5	5
<i>Nivel de confianza(95.0%)</i>	0.0005	0.02

i. Intervalo de confianza para una precisión aceptable:

El intervalo de confianza se calcula con la fórmula siguiente:

$$\text{intervalo de confianza} = \bar{x} \pm \frac{ts}{\sqrt{n}}$$

Ejemplo para la cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar:

$$\text{intervalo de confianza} = 0.61804 \pm \frac{(2.776) \times (0.0004)}{\sqrt{5}}$$

Cuadro No. 9. Intervalos de confianza para una precisión del 95%.

	Mínimos	Máximos
<i>Cantidad de caliza dolomítica utilizada para neutralizar (g)</i>	0.6176	0.6185
<i>pH final de la muestra</i>	7.00	7.04

3. Relación cantidad de caliza dolomítica-concentración de hidrógeno, necesaria para neutralización:

Según los resultados experimentales obtenidos, es necesario 0.61804g de caliza dolomítica para neutralizar 243mL de agua con un pH de 4.41.

$$pH = -\log([H^+]) \Rightarrow [H^+] = \log^{-1}(pH)$$

$$[H^+] = \log^{-1}(-4.41) = 3.89 \times 10^{-5} M$$

$$243\text{mL} \times \left(\frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \right) \times \left(\frac{3.89 \times 10^{-5} \text{ gmol } H^+}{1\text{L}} \right) = 9.45 \times 10^{-6} \text{ gmol } H^+$$

$$\text{Relación} = \frac{0.61804 \text{ g cal}}{9.45 \times 10^{-6} \text{ gmol } H^+} = 65401.06 \text{ g cal / gmol } H^+$$

4. Cálculo del flujo de caliza dolomítica necesario para la etapa de neutralización:

Base: 1 hora.

$$1\text{h} \times \left(\frac{3600\text{s}}{1\text{h}} \right) = 3600\text{s}$$

$$\phi_3 = 0.054\text{L} / \text{s}$$

$$V_3 = \phi_3 \times \text{base de tiempo} = (0.054\text{L/s}) \times (3600\text{s}) = 193.50\text{L}$$

$$\begin{aligned} \text{masa caliza} &= 193.50\text{L} \times \left(\frac{3.89 \times 10^{-5} \text{ gmol } H^+}{1\text{L}} \right) \times \left(\frac{65401.06 \text{ g caliza}}{1 \text{ gmol } H^+} \right) \times \left(\frac{1\text{Kg caliza}}{1000\text{g caliza}} \right) \\ &= 0.491\text{Kg caliza dolomítica} \end{aligned}$$

a. Mezcla de caliza dolomítica en agua:

Concentración de la mezcla: 10g de caliza dolomítica por litro de mezcla.

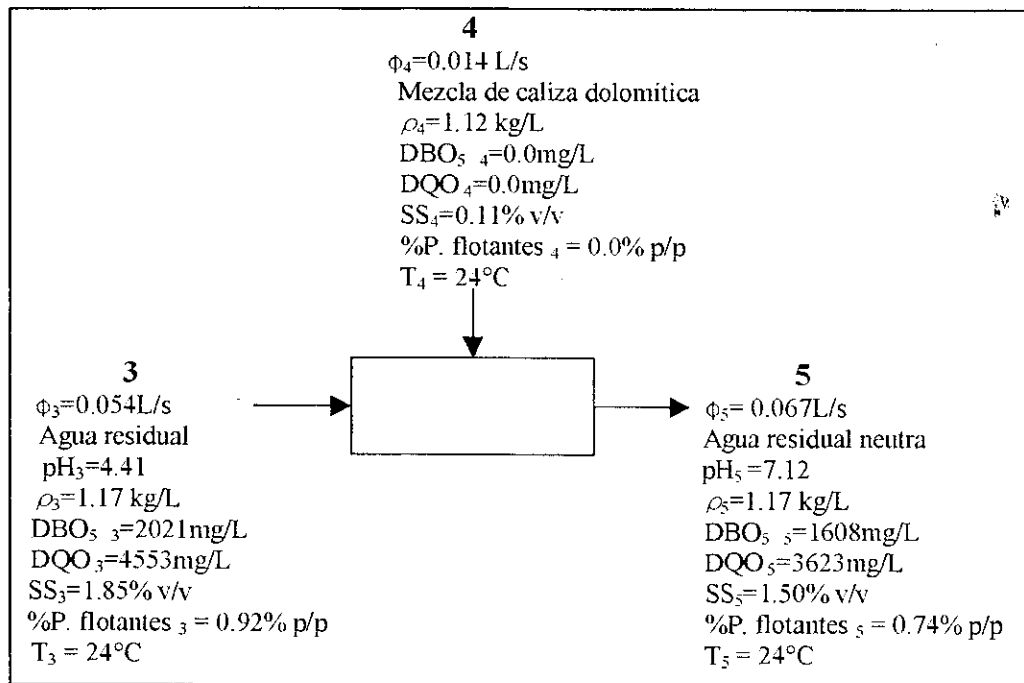
$$V_{\text{mezcla de caliza}} = 0.491\text{Kg caliza} \times \left(\frac{1000\text{g caliza}}{1\text{Kg caliza}} \right) \times \left(\frac{1\text{L mezcla}}{10\text{g caliza}} \right) = 49.10\text{L mezcla}$$

b. Flujo de mezcla de caliza dolomítica:

$$\phi_4 = \frac{V_{\text{mezcla de caliza}}}{\text{base de tiempo}} = \frac{49.10\text{L mezcla}}{3600\text{s}} = 0.014\text{L mezcla} / \text{s}$$

4. Balance de masa en etapa de neutralización:

Gráfico No. 11. Balance de masa en la etapa de neutralización.



Base: 1 hora.

$$1h \times \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 3600s$$

En el proceso de neutralización no hay acumulación, por lo tanto,

Entrada = Salida

$$3 + 4 = 5$$

a. Masas de entrada y salida:

$$V_3 = 193.50L$$

$$m_3 = 226.4kg$$

$$V_4 = V_{\text{mezcla de caliza dolomítica}} = 49.10L$$

$$m_4 = V_4 \times \rho_4 = (49.10L) \times \left(\frac{1.12kg}{1L} \right) = 55.0kg$$

$$m_3 + m_4 = m_5$$

$$m_5 = 226.4\text{kg} + 55.0\text{kg} = 281.4\text{kg}$$

$$\rho_5 = \rho_3 \times \left(\frac{m_3}{m_5} \right) + \rho_4 \times \left(\frac{m_4}{m_5} \right) = 1.17\text{kg/L} \times \left(\frac{226.4\text{kg}}{281.4\text{kg}} \right) + 1.12\text{kg/L} \times \left(\frac{55.0\text{kg}}{281.4\text{kg}} \right) = 1.16\text{kg/L}$$

b. Flujo de aguas servidas a la salida de la etapa de neutralización:

$$V_5 = \frac{m_5}{\rho_5} = \frac{281.4\text{kg}}{1.16\text{kg/L}} = 242.59\text{L}$$

$$\phi_5 = \frac{V_5}{\text{Base de tiempo}} = \frac{242.59\text{L}}{3600\text{s}} = 0.067\text{L/s}$$

c. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) a la salida de la etapa de neutralización:

$$\text{DBO}_{5,3} = 2021\text{mg/L}$$

$$\text{masa } O_{2,3} = 3.90 \times 10^5 \text{ mg } O_2$$

$$\text{masa } O_{2,3} = \text{masa } O_{2,5}$$

$$\text{DBO}_{5,5} = \frac{\text{masa } O_{2,5}}{V_5} = \frac{3.90 \times 10^5 \text{ mg } O_2}{242.59\text{L}} = 1607.65\text{mg/L} \approx 1608\text{mg/L}$$

d. Demanda química de oxígeno (DQO) a la salida de la etapa de neutralización:

$$\text{DQO}_3 = 4553\text{mg/L}$$

$$\text{masa } O_{2,3} = 8.79 \times 10^5 \text{ mg } O_2$$

$$\text{masa } O_{2,3} = \text{masa } O_{2,5}$$

$$\text{DQO}_5 = \frac{\text{masa } O_{2,5}}{V_5} = \frac{8.79 \times 10^5 \text{ mg } O_2}{242.59\text{L}} = 3623.40\text{mg/L} \approx 3623\text{mg/L}$$

e. Porcentaje de sólidos sedimentables (SS) a la salida de la etapa de neutralización:

$$SS_3 = 1.85\% \text{ v/v}$$

$$V_{SS_3} = 3.58L$$

$$\rho_{cal} = 2.69 \text{ kg/L}$$

$$\text{masa caliza} = 0.491 \text{ Kg}$$

$$\text{materia inerte en cal} = 30\%$$

$$\text{masa mat. inerte} = \text{masa caliza} \times 0.3 = 0.491 \text{ Kg} \times 0.3 = 0.147 \text{ Kg}$$

$$\rho_{caliza} \approx \rho_{SS_4}$$

$$V_{SS_4} = \frac{\text{masa mat. inerte}}{\rho_{SS_4}} = \frac{0.147 \text{ Kg}}{2.69 \text{ Kg/L}} = 0.055 \text{ L}$$

$$SS_4 = \left(\frac{V_{SS_4}}{V_4} \right) = \frac{0.055 \text{ L}}{49.10 \text{ L}} \times 100 = 0.11\% \text{ v/v}$$

Asumiendo,

$$\rho_{SS_3} = \rho_{SS_4} = \rho_{SS_5}$$

$$V_{SS_3} + V_{SS_4} = V_{SS_5}$$

$$V_{SS_5} = (3.58 \text{ L}) + (0.055 \text{ L}) = 3.63 \text{ L}$$

$$SS_5 = \left(\frac{V_{SS_5}}{V_5} \right) = \frac{3.63 \text{ L}}{242.59 \text{ L}} \times 100 = 1.50\% \text{ v/v}$$

f. Porcentaje de partículas flotantes a la salida de la etapa de neutralización:

$$m_5 = 281.4 \text{ kg}$$

$$P.\text{flot.}_3 = 2.07 \text{ kg}$$

$$P.\text{flot.}_3 = P.\text{flot.}_5 = 2.07 \text{ kg}$$

$$\%P.\text{flot.}_5 = \frac{P.\text{flot.}_5}{m_5} \times 100 = \frac{2.07 \text{ kg}}{281.4 \text{ kg}} \times 100 = 0.74\%$$

g. Corrección de pH de las aguas residuales a la salida de la etapa de neutralización debido al aumento del volumen de líquido:

$$\text{pH teórico} = 7.02$$

$$[H^+]_{s \text{ teórico}} = \log^{-1}(-7.02) = 9.55 \times 10^{-8} M$$

$$gmolH^+_{s \text{ real}} = [H^+]_{s \text{ teórico}} \times V_3 = (9.55 \times 10^{-8} gmol/L) \times (193.50L) = 1.84 \times 10^{-5} gmolH^+$$

$$[H^+]_{s \text{ real}} = \frac{gmol H^+_{s \text{ real}}}{V_5} = \left(\frac{1.84 \times 10^{-5} gmol H^+}{242.59L} \right) = 7.62 \times 10^{-8} M$$

$$pH_{s \text{ real}} = -\log([H^+]_{s \text{ real}}) = -\log(7.62 \times 10^{-8}) = 7.12$$

5. Volumen del tanque de almacenamiento de mezcla de caliza dolomítica:

$$V_{\text{tanque}} = \phi_4 \times t = (0.014L/s) \times (2h) \times \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 100L$$

Apéndice E: Cálculos para la etapa de flotación y sedimentación

La eliminación de sólidos consta de dos etapas, primero, eliminación de partículas flotantes (espumas y cascarilla), por medio de flotación o sedimentación inversa. La segunda etapa consiste en una sedimentación para la eliminación de sólidos densos. Ambas etapas se llevan a cabo dentro de un mismo tanque de 530L (ver gráfico No. 12 en apéndice E, página 59).

1. Diseño del tanque de flotación y sedimentación:

El equipo de flotación y sedimentación se dimensiona en base a un tiempo de residencia típico de 2 horas, esperando con ello una separación del 75%.

a. Volumen del tanque:

$$\phi_s = 0.067L/s$$

$$tiempo\ de\ residencia = 2h \times \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 7200s$$

$$V_{tan\ que} = \phi_s \times tiempo\ de\ residencia = 0.067L/s \times 7200s = 482.4L$$

Factor de seguridad por imprevistos = 10%

$$V_{tan\ que} = 482.4L \times 1.10 = 530.64L \approx 530L$$

b. Diseño del tanque:

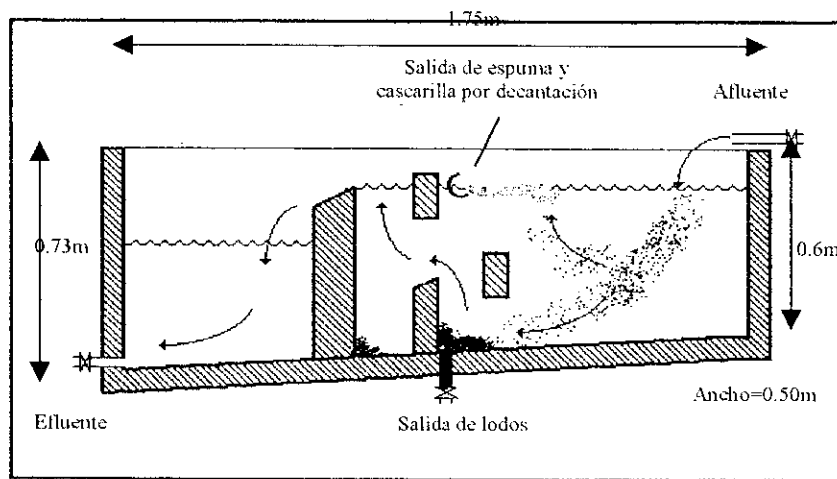
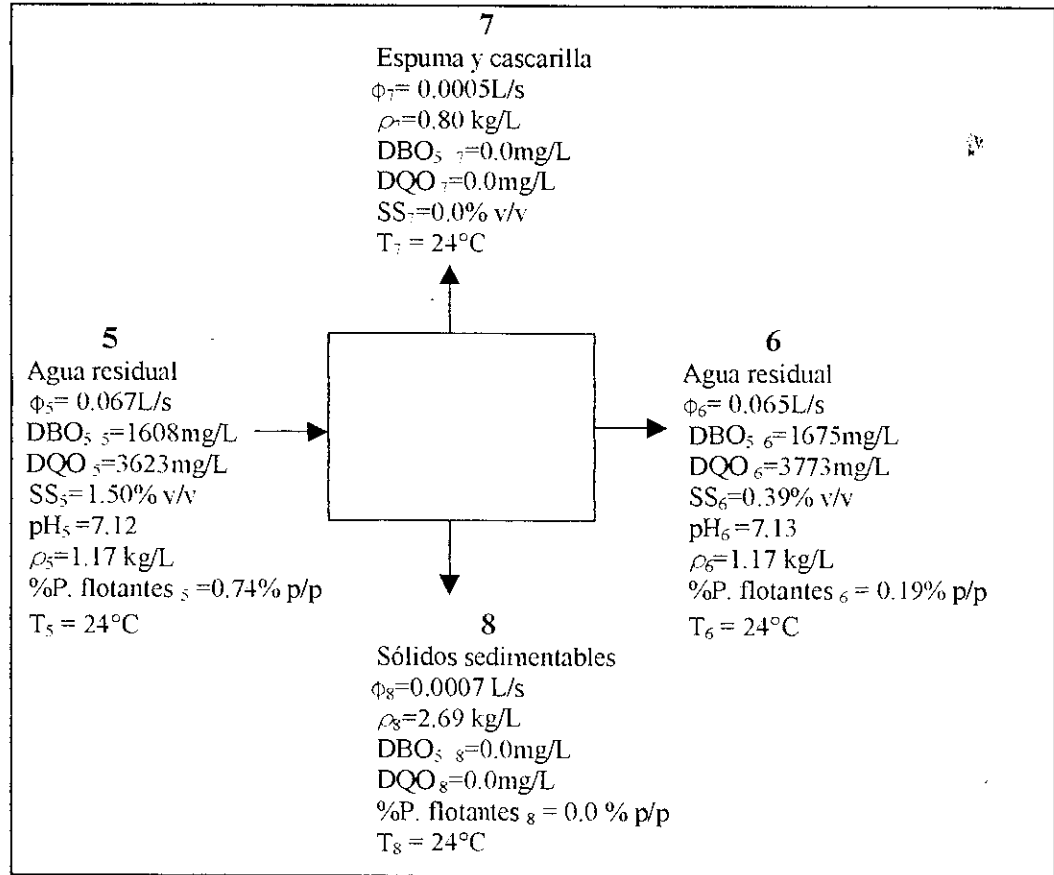


Gráfico No. 12. Tanque de separación por flotación y sedimentación.

2. Balance de masa de la etapa de flotación y sedimentación:

Gráfico No. 13. Balance de masa en la etapa de flotación y sedimentación.



Base: 1 hora.

$$1h \times \left(\frac{3600s}{1h} \right) = 3600s$$

En el proceso de separación por flotación y sedimentación no hay acumulación, por lo tanto,

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

$$5 = 6 + 7 + 8$$

Por lo tanto,

$$6 = 5 - 7 - 8$$

a. Masas de entrada y salida:

$$m_5 = 281.4 \text{ kg}$$

$$P.\text{flot.}_5 = 2.07 \text{ kg}$$

$$m_7 = P.\text{flot.}_5 \times 0.75 = 2.07 \text{ Kg} \times 0.75 = 1.55 \text{ Kg}$$

$$m_8 = (V_{ss\ 5} \times 0.75) \times \rho_{ss\ 5} = (3.63 \text{ L} \times 0.75) \times 2.69 \text{ Kg} / \text{L} = 7.32 \text{ Kg}$$

$$m_6 = m_5 - m_7 - m_8$$

$$m_6 = 281.4 \text{ Kg} - 1.55 \text{ Kg} - 7.32 \text{ Kg} = 272.53 \text{ Kg}$$

b. Flujo de aguas servidas a la salida de la etapa de flotación y sedimentación:

$$V_5 = 242.59 \text{ L}$$

Asumiendo, $\rho_5 \approx \rho_6$

$$V_6 = \frac{m_6}{\rho_6} = \frac{272.53 \text{ kg}}{1.17 \text{ kg} / \text{L}} = 232.93 \text{ L}$$

$$V_7 = \frac{m_7}{\rho_7} = \frac{1.55 \text{ kg}}{0.80 \text{ kg} / \text{L}} = 1.94 \text{ L}$$

$$V_8 = (V_{ss\ 5} \times 0.75) = (3.63 \text{ L} \times 0.75) = 2.72 \text{ L}$$

$$\phi_6 = \frac{V_6}{\text{Base de tiempo}} = \frac{232.93 \text{ L}}{3600 \text{ s}} = 0.065 \text{ L} / \text{s}$$

$$\phi_7 = \frac{V_7}{\text{Base de tiempo}} = \frac{1.94 \text{ L}}{3600 \text{ s}} = 0.0005 \text{ L} / \text{s}$$

$$\phi_8 = \frac{V_8}{\text{Base de tiempo}} = \frac{2.72 \text{ L}}{3600 \text{ s}} = 0.0007 \text{ L} / \text{s}$$

- c. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) a la salida de la etapa de flotación y sedimentación:

$$DBO_{5\ 5} = 1608 \text{ mg/L}$$

$$DBO_{5\ 7} = 0.0 \text{ mg/L}$$

$$DBO_{5\ 8} = 0.0 \text{ mg/L}$$

$$\text{masa } O_2\ 5 = DBO_{5\ 5} \times V_5 = (1608 \text{ mg/L}) \times (242.59 \text{ L}) = 3.90 \times 10^5 \text{ mg } O_2$$

$$\text{masa } O_2\ 5 = \text{masa } O_2\ 6$$

$$DBO_{5\ 6} = \frac{\text{masa } O_2\ 6}{V_6} = \frac{3.90 \times 10^5 \text{ mg } O_2}{232.93 \text{ L}} = 1674.69 \text{ mg/L} \approx 1675 \text{ mg/L}$$

- d. Demanda química de oxígeno (DQO) a la salida de la etapa de flotación y sedimentación:

$$DQO_5 = 3623 \text{ mg/L}$$

$$DQO_7 = 0.0 \text{ mg/L}$$

$$DQO_8 = 0.0 \text{ mg/L}$$

$$\text{masa } O_2\ 5 = DQO_5 \times V_5 = (3623 \text{ mg/L}) \times (242.59 \text{ L}) = 8.79 \times 10^5 \text{ mg } O_2$$

$$\text{masa } O_2\ 5 = \text{masa } O_2\ 6$$

$$DQO_6 = \frac{\text{masa } O_2\ 6}{V_6} = \frac{8.79 \times 10^5 \text{ mg } O_2}{232.93 \text{ L}} = 3773.25 \text{ mg/L} \approx 3773 \text{ mg/L}$$

- e. Porcentaje de sólidos sedimentables (SS) a la salida de la etapa de flotación y sedimentación:

$$V_{ss\ 5} = 3.63 \text{ L}$$

$$V_6 = 232.93 \text{ L}$$

$$V_8 = 2.72 \text{ L}$$

$$\rho_{ss5} = \rho_6 = \rho_8$$

$$SS_6 = \frac{(V_{ss5} - V_8)}{V_6} \times 100 = \frac{(3.63L - 2.72L)}{232.93L} \times 100 = 0.39\%$$

f. Porcentaje de partículas flotantes a la salida de la etapa de flotación y sedimentación:

$$P.\text{flot.}_5 = 2.07\text{kg}$$

$$m_6 = 272.53\text{Kg}$$

$$P.\text{flot.}_7 = P.\text{flot.}_5 \times 0.75 = 2.07\text{Kg} \times 0.75 = 1.55\text{Kg}$$

$$P.\text{flot.}_6 = P.\text{flot.}_5 - P.\text{flot.}_7 = 0.52\text{kg}$$

$$\%P.\text{flot.}_6 = \frac{P.\text{flot.}_6}{m_6} \times 100 = \frac{0.52\text{kg}}{272.53\text{kg}} \times 100 = 0.19\%$$

g. Potencial de hidrógeno (pH) a la salida de la etapa de flotación y sedimentación:

$$pH_5 = 7.12$$

$$V_5 = 242.59\text{L}$$

$$V_6 = 232.93\text{L}$$

$$pH = -\log([H^+]) \Rightarrow [H^+] = \log^{-1}(pH)$$

$$[H^+]_5 = \log^{-1}(-7.12) = 7.62 \times 10^{-8} \text{M}$$

$$gmolH^+_5 = [H^+]_5 \times V_5 = (7.62 \times 10^{-8} \text{gmol/L}) \times (242.59\text{L}) = 1.72 \times 10^{-5} \text{gmolH}^+$$

$$gmolH^+_5 = gmolH^+_6$$

$$[H^+]_6 = \frac{gmolH^+_6}{V_6} = \frac{1.72 \times 10^{-5} \text{gmolH}^+}{232.93\text{L}} = 7.37 \times 10^{-8} \text{M}$$

$$pH_6 = -\log([H^+]_6) = -\log(7.37 \times 10^{-8}) = 7.13$$

Apéndice F: Dimensionamiento y cálculos del tratamiento aeróbico

El proceso se lleva a cabo en un tanque con capacidad para 11,679L, de 1.90m de largo por 1.90m de ancho y 3.35m de profundidad, diseñado para un tiempo de residencia de 45.37 horas y equipado con un sistema de aireación por medio de burbujeo en el fondo. Para lo cual cuenta con un compresor alternativo de 1 hp de potencia, con la capacidad de proporcionar 12.51L/s de aire. Para la dispersión del aire se utiliza tubería perforada de PVC de 3/8 de pulgada de diámetro (ver gráfico No. 14 y gráfico No. 15 en apéndice F, página 68).

1. Tiempo de residencia:

Se usa la fórmula:

$$t = (S_o - S_e)(24h) / X_v K S_e$$

donde, S_o = DBO₅ del afluente mg/L

S_e = DBO₅ del efluente en mg/L

X_v = Cantidad de sólidos volátiles suspendidos

K = constante cinética del proceso

Remoción del 95%:

$$S_o = 1675 \text{ mg/L}$$

$$S_e = 2021 \text{ mg/L} (0.05) = 83.75 \text{ mg/L}$$

$$X_v = 1500 \text{ mg/L}$$

$$K = 0.0067$$

$$t = [(1675 \text{ mg/L} - 83.75 \text{ mg/L})(24h)] / [(1500 \text{ mg/L}) \times (0.0067) \times (83.75 \text{ mg/L})]$$

$$t = 45.37h$$

2. Volumen del tanque:

$$V_{\text{tanque}} = \phi_s \times t = (0.065 \text{ L/s}) \times (45.37 \text{ h}) \times \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) = 10,617 \text{ L}$$

Factor de seguridad por imprevistos = 10%

$$V_{\text{tanque}} = 10,617 \text{ L} \times (1.10) = 11,679 \text{ L}$$

3. Demanda de O₂:

Se usa la fórmula:

$$O_2 / \text{día} = (\alpha \times S_R) + (1.4 \times b \times x \times X_v) + (4.8 \times N_R) + (K^0 \times Q)$$

Donde, α = Fracción de sustrato usado para síntesis = 0.4 (valor típico)

b = Constante de tasa endógena de utilización = 0.2 (valor típico)

S_R = Lbs. DBO removidas al día (Lb/día)

x = Fracción de sólidos volátiles suspendidos oxidables

X_v = Peso de cant. de sólidos volátiles suspendidos (Lb/día)

N_R = Nitrógeno removido (Lb/día)

K^0 = Factor de oxidación directa (químico)

Q = Flujo (Lb/día)

Para el 95% de remoción:

$\alpha = 0.4$ (valor típico)

$b = 0.2$ (valor típico)

$x = 0.25$ (valor típico)

$N_R = 0$ (el afluente no contiene amonio)

$K^0 = 0$ (se asume que no hay oxidación directa)

a. Cálculo de S_R :

$$S_R = (S_o - S_e) = (1675 \text{ mg/L} - 83.75 \text{ mg/L}) \times \left(\frac{0.065 \text{ L}}{1 \text{ s}} \right) \times \left(\frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ Lb}}{453.59 \text{ g}} \right)$$

$$S_R = 19.70 \text{ Lb/día}$$

b. Cálculo de X_r :

$$X_r = 1500 \text{ mg/L} \times \left(\frac{0.065 \text{ L}}{1 \text{ s}} \right) \times \left(\frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ Lb}}{453.59 \text{ g}} \right) = 18.61 \text{ Lb/día}$$

c. Cálculo de Q :

$$Q = 0.065 \text{ L/s} \times \left(\frac{1.17 \text{ Kg}}{1 \text{ L}} \right) \times \left(\frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}} \right) \times \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ Kg}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ Lb}}{453.59 \text{ g}} \right) = 14,486 \text{ Lb/día}$$

Sustituyendo valores:

$$O_2 / \text{día} = (0.4 \times 19.70 \text{ Lb/día}) + (1.4 \times 0.2 \times 0.25 \times 18.61 \text{ Lb/día}) + (4.8 \times 0) + (0 \times 14,932 \text{ Lb/día})$$

$$O_2 / \text{día} = 9.18 \text{ Lb/día}$$

d. Corrección a condiciones estándar:

Se usa la fórmula:

$$N = N_o \left[(\beta \times E \times C_T - C_r) \right] / \left[(9.17) \times (1.024^{(T-20)}) \times (\alpha) \right]$$

Donde, N = Demanda de O_2 (Lb/día)

N_o = Demanda de O_2 en condiciones estándar (20°C y 1atm) (Lb/día)

β = Concentración de saturación de oxígeno

E = Factor de corrección por elevación

C_T = concentración de O_2 a condiciones de diseño (mg/L)

C_r = Concentración de oxígeno residual (mg/L)

T = Temperatura de diseño (°C)

$1.024^{(T-20)}$ = relación de corrección por temperatura

α = Tasa de transferencia de O_2 del desecho dentro de la tasa de transferencia de O_2 del agua.

Valores utilizados:

$$N = 9.18 \text{ Lb/día}$$

$$\beta = 0.9 \text{ (valor típico)}$$

$$f = 0.834 \text{ (interpolando en cuadro No. 12 en apéndice H, página 73 para } 1500 \text{msnm} = 4921 \text{pies sobre el nivel del mar)}$$

$$C_T = 8.53 \text{ (ver cuadro No. 11 en apéndice H, página 73, para } T = 24^\circ\text{C)}$$

$$C_r = 3 \text{ mg/L (valor asumido en base a que no hay nitrificación)}$$

$$T = 24^\circ\text{C}$$

$$1.024^{(T-20)} = 1.100 \text{ (ver cuadro No. 11 en apéndice H, página 73, para } T = 24^\circ\text{C)}$$

$$\alpha = 0.8 \text{ (valor asumido)}$$

Sustituyendo Valores:

$$9.18 \text{ Lb/día} = N_o [(0.9 \times 0.834 \times 8.53 - 3)] / [(9.17) \times (1.100) \times (0.8)]$$

$$9.18 \text{ Lb/día} = N_o [0.42]$$

$$N_o = \frac{9.18 \text{ Lb/día}}{0.42} = 21.78 \text{ Lb/día}$$

Factor de seguridad por imprevistos en el diseño = 15%

$$\text{Demanda de } O_2 \text{ en cond. std.} = 21.78 \text{ Lb/día} \times (1.15) =$$

$$25.04 \text{ Lb/día} \times \left(\frac{1 \text{ Kg}}{2.20 \text{ lb}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} \right) = 1.32 \times 10^{-4} \text{ Kg/s}$$

e. Dimensionamiento del tanque:

Largo = 1.90m

Ancho = 1.90m

Profundidad = 3.35m

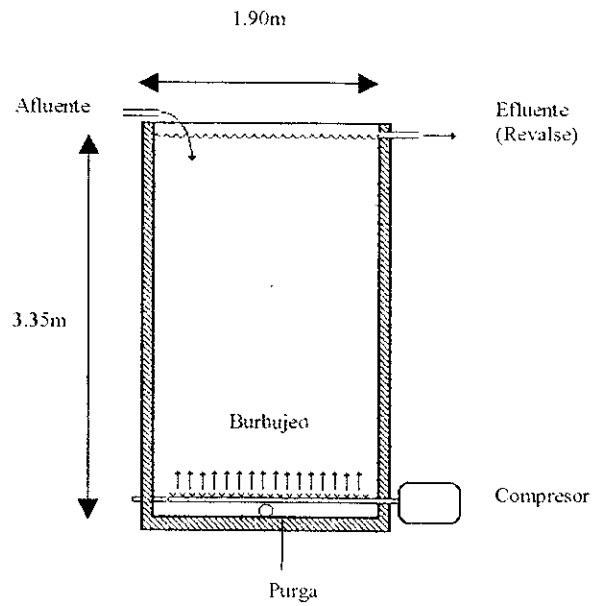


Gráfico No. 14. Vista en elevación del tanque de tratamiento biológico.

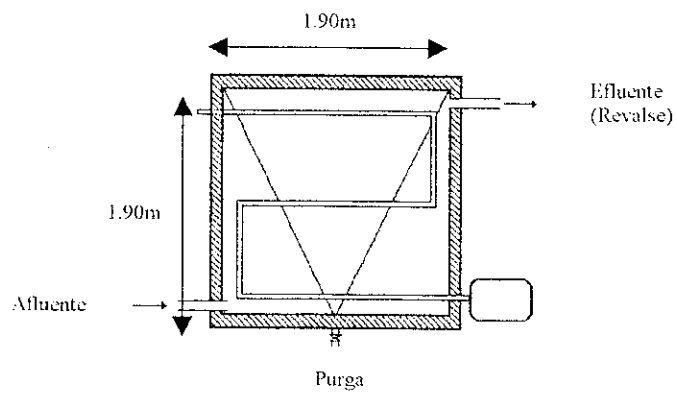


Gráfico No. 15. Vista en planta del tanque de tratamiento biológico.

4. Requerimientos de potencia:

a. Cálculo del oxígeno a tomar:

$$\text{Oxígeno a tomar} = \frac{\text{Demanda de } O_2}{V_{\text{tanque}}}$$

$$\text{Oxígeno a tomar} = \left(\frac{25.04 \text{ Lb} / \text{día}}{11,679 \text{ L}} \right) \times \left(\frac{453.59 \text{ g}}{1 \text{ Lb}} \right) \times \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right) \times \left(\frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \right)$$

$$\text{Oxígeno a tomar} = 40.52 \text{ mg} / \text{L} / \text{h}$$

b. Cálculo del flujo de aire:

Ver gráfico No. 16 en apéndice H (página 72). Para un requerimiento de 40.52 mg/L/h se necesita 45scfm (std. pie³/min) de aire por cada 1000pies³ de volumen de líquido, por lo tanto:

$$\phi_{\text{aire}} = V_{\text{tanque}} \times \left(\frac{45 \text{ pie}^3 / \text{min}}{1000 \text{ pie}^3} \right) = 11,679 \text{ L} \times \left(\frac{45 \text{ pie}^3 / \text{min}}{1000 \text{ pie}^3} \right) \times \left(\frac{1 \text{ pie}^3}{28.32 \text{ L}} \right) = 18.56 \text{ pie}^3 / \text{min}$$

$$\phi_{\text{aire}} = 18.56 \text{ pie}^3 / \text{min} \times \left(\frac{28.32 \text{ L}}{1 \text{ pie}^3} \right) \times \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = 8.76 \text{ L} / \text{s}$$

c. Corrección del flujo de aire debido a condiciones ambientales:

$$T = 24^\circ \text{C}$$

$$P = 0.84 \text{ atm}$$

$$\phi_{\text{aire}} = 8.76 \text{ L} / \text{s} \times \left(\frac{1 \text{ atm}}{0.84 \text{ atm}} \right) \times \left(\frac{24^\circ \text{C}}{20^\circ \text{C}} \right) = 12.51 \text{ L} / \text{s}$$

d. Cálculo de potencia:

$$W = \phi_{aire} \times \rho_s \times g \times H$$

$$W = (12.51L/s) \times (1.17Kg/L) \times (9.8m/s^2) \times (3.048m) = 437.32Kg \cdot m^2 / s^3 = 437.32W$$

$$W = 437.32W \times \left(\frac{1hp}{745.70W} \right) = 0.59hp$$

Al asumir una eficiencia del 75%:

$$W = \frac{0.59hp}{0.75} = 0.78hp$$

Se necesita un compresor de 1hp, del tipo alternativo.

Apéndice G: Determinación de las condiciones finales de las aguas residuales a la salida del proceso

Remoción del 95%

$$DBO_5_{final} = 83.75 \text{ mg/L}$$

$$DQO_{final} = DQO_6 \times (0.05) = 3,773 \text{ mg/L} \times (0.05) = 188.65 \text{ mg/L}$$

Apéndice H: Gráficos utilizados para el diseño y dimensionamiento del proceso

Cuadro No. 10. Valores de la t de Student

Grados de libertad	Nivel de confianza (%)				
	50	80	90	95	99
1	1.000	3.078	6.314	12.706	63.657
2	0.816	1.886	2.920	4.303	9.925
3	0.765	1.638	2.353	3.182	5.841
4	0.741	1.533	2.132	2.776	4.604
5	0.727	1.476	2.015	2.571	4.032
6	0.718	1.440	1.943	2.447	3.707
7	0.711	1.415	1.895	2.365	3.500
8	0.706	1.397	1.860	2.306	3.355
9	0.703	1.383	1.833	2.262	3.250
10	0.700	1.372	1.812	2.228	3.169
15	0.691	1.341	1.753	2.131	2.947
20	0.687	1.325	1.725	2.086	2.845
∞	0.674	1.282	1.645	1.960	2.576

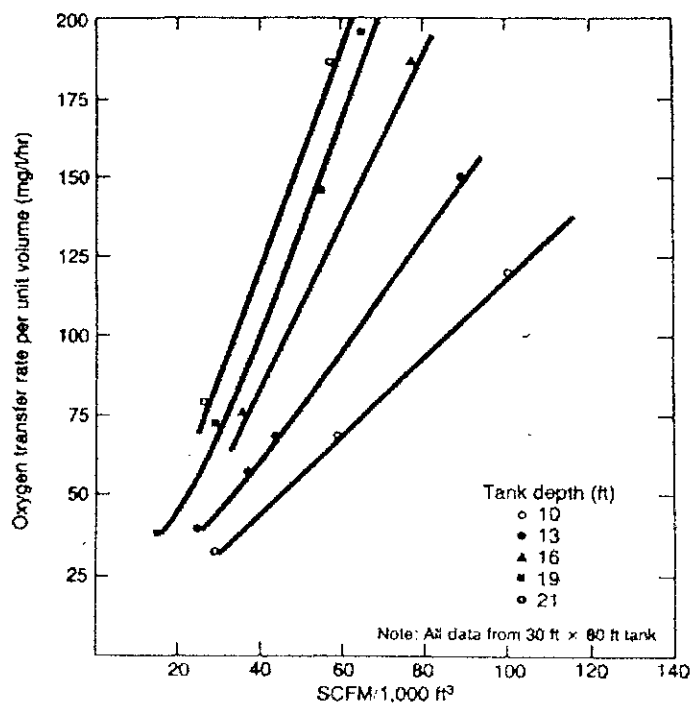


Gráfico No. 16. Relación de desempeño para sistemas de aireación por burbujeo difuso (7).

Cuadro No. 11. Valores de saturación de oxígeno y corrección de valores K_{La} vrs. Temperatura (7).

Temperature °C	°F	C_1 mg/l	$1.024^{(T-20)}$	Temperature °C	°F	C_1 mg/l	$1.024^{(T-20)}$
0	32.0	14.62	.622	26	78.8	8.22	1.153
1	33.8	14.23	.636	27	80.6	8.07	1.181
2	35.6	13.84	.652	28	82.4	7.92	1.208
3	37.4	13.48	.668	29	84.2	7.77	1.238
4	39.2	13.13	.684	30	86.0	7.63	1.268
5	41.0	12.80	.700				
6	42.8	12.48	.717	31	87.8	7.5	1.298
7	44.6	12.17	.734	32	89.6	7.4	1.329
8	46.4	11.87	.752	33	91.4	7.3	1.361
9	48.2	11.59	.770	34	93.2	7.2	1.394
10	50.0	11.33	.788	35	95.0	7.1	1.427
11	51.8	11.08	.807	36	96.8	7.0	1.461
12	53.8	10.83	.827	37	98.6	6.9	1.496
13	55.4	10.60	.847	38	100.4	6.8	1.532
14	57.2	10.37	.867	39	102.2	6.7	1.570
15	59.0	10.15	.888	40	104.0	6.6	1.606
16	60.8	9.95	.909	41	105.8	6.5	1.645
17	62.6	9.74	.931	42	107.6	6.4	1.685
18	64.4	9.54	.954	43	109.4	6.3	1.725
19	66.2	9.35	.977	44	111.2	6.2	1.768
20	68.0	9.17	1.000	45	113.0	6.1	1.810
21	69.8	8.99	1.024	46	114.8	6.0	1.852
22	71.6	8.83	1.049	47	116.6	5.9	1.896
23	73.4	8.68	1.074	48	118.4	5.8	1.941
24	75.2	8.53	1.100	48	120.2	5.7	1.990
25	77.0	8.38	1.126	50	122.0	5.6	2.038

C_1 = oxygen saturation concentration at design condition temperature

Cuadro No. 12. Factores de corrección por altitud (7).

Elev. above sea level	Corr.	Elev. above sea level	Corr.	Elev. above sea level	Corr.
0	1.000	3000	.895	6000	.801
200	.992	3200	.889	6200	.795
400	.985	3400	.882	6400	.790
600	.978	3600	.876	6600	.784
800	.971	3800	.870	6800	.777
1000	.964	4000	.862	7000	.772
1200	.957	4200	.857	7200	.766
1400	.950	4400	.851	7400	.760
1600	.943	4600	.844	7600	.754
1800	.936	4800	.838	7800	.748
2000	.929	5000	.831	8000	.743
2200	.922	5200	.825		
2400	.915	5400	.819		
2600	.908	5600	.813		
2800	.903	5800	.808		