

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SUB PRODUCTOS DEL BENFICIADO HÚMEDO DE
CAFÉ, SOMETIDOS A TRATAMIENTO ANAERÓBICO; SAN JUAN LA LAGUNA, SOLOLÁ
TESIS DE GRADO

EDGAR ENRIQUE GARCÍA MONROY
CARNET 29771-05

ESCUINTLA, SEPTIEMBRE DE 2014
SEDE REGIONAL DE ESCUINTLA

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES

EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SUB PRODUCTOS DEL BENFICIADO HÚMEDO DE
CAFÉ, SOMETIDOS A TRATAMIENTO ANAERÓBICO; SAN JUAN LA LAGUNA, SOLOLÁ
TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR
EDGAR ENRIQUE GARCÍA MONROY

PREVIO A CONFERÍRSELE
EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES EN EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIADO

ESCUINTLA, SEPTIEMBRE DE 2014
SEDE REGIONAL DE ESCUINTLA

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. EDUARDO VALDES BARRIA, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: DR. CARLOS RAFAEL CABARRÚS PELLECCER, S. J.
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

DECANO: DR. ADOLFO OTTONIEL MONTERROSO RIVAS
VICEDECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ
SECRETARIA: ING. REGINA CASTAÑEDA FUENTES
DIRECTOR DE CARRERA: MGTR. LUIS MOISÉS PEÑATE MUNGUÍA

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

ING. MARCO ANTONIO BARRIOS OROZCO

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

ING. CÉSAR AUGUSTO SANDOVAL GARCÍA
ING. LUIS FELIPE CALDERÓN BRAN
ING. SERGIO ALEJANDRO MANSILLA JIMÉNEZ

Guatemala 16 de julio de 2014

Consejo de Facultad
Ciencias Ambientales y Agrícolas
Presente

Estimados miembros del Consejo:

Por este medio hago constar que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante Edgar Enrique García Monroy, carné 29771-05, titulada: "Evaluación fisicoquímica de sub productos del beneficiado húmedo de café, sometidos a tratamiento anaeróbico; San Juan La Laguna, Sololá".

La cual considero que cumple con los requisitos establecidos por facultad, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,



Ing. Marco Antonio Barrios Orozco
Colegiado no. 1629
Cod. URL 20813


Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante EDGAR ENRIQUE GARCÍA MONROY, Carnet 29771-05 en la carrera LICENCIATURA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES, de la Sede de Escuintla, que consta en el Acta No. 0665-2014 de fecha 22 de septiembre de 2014, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SUB PRODUCTOS DEL BENFICIADO HÚMEDO DE CAFÉ, SOMETIDOS A TRATAMIENTO ANAERÓBICO; SAN JUAN LA LAGUNA, SOLOLÁ

Previo a conferírsele el título de INGENIERO AGRÓNOMO CON ÉNFASIS EN CULTIVOS TROPICALES en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 29 días del mes de septiembre del año 2014.



ING. REGINA CASTAÑEDA FUENTES, SECRETARIA
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
Universidad Rafael Landívar



AGRADECIMIENTOS

A:

Dios por permitir desempeñarme con la sabiduría que me ha dado

La junta directiva de Cooperativa “La Voz Que Clama en el Desierto”, por haberme permitido desarrollar el proyecto de tesis en sus instalaciones

Ingeniero Marco Antonio Barrios Orozco por su asesoría en el desarrollo de la presente tesis

Ingeniero Oscar Campos Almengor por compartirme sus valiosos conocimientos

El propietario y la gerencia de finca San Jerónimo Miramar, por brindarme apoyo en el desarrollo de la tesis

La Asociación Nacional del Café (ANACAFE), especialmente al Doctor Francisco Anzuetto y al Ingeniero Roberto Soto del departamento de CEDICAFE (Centro De Investigaciones del Café), por brindarme apoyo en el desarrollo de la tesis

Universidad Rafael Landívar por compartirme los conocimientos académicos a través de sus excelentes docentes, e impulsar el desarrollo de mi vida profesional

DEDICATORIA

A:

DIOS: Por darme la fuerza y oportunidad para afrontar los desafíos de la vida

Mis Padres: Edgar Oswaldo García (Q.E.P.D.), e Irma Yolanda Monroy, por haberme dado lo necesario para llevar una vida digna

Mis Abuelos

Paternos: Enrique García y Olga Guerrero, por brindarme todo su apoyo en el momento oportuno

Mis Abuelos

Maternos: Felipe Monroy y Rosa María Ardón (Q.E.P.D), por su convivencia

Mis Hermanos: José y Shirley, por su cariño y convivencia

Mis Hijos: Carlos Rodolfo y Edgar Adán porque son los que me impulsan y dan la energía para salir adelante

Mi Esposa: Karla Fabiola Paiz, por su apoyo y comprensión

Mis tíos: Por su apoyo incondicional

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	3
2.1 PROCESO DE BENEFICIADO HÚMEDO DE CAFÉ	3
2.1.1 Campo (cultivo)	3
2.1.1.1 Recolección	3
2.1.2 Beneficio húmedo (proceso agroindustrial)	3
2.1.2.1 Recibo y clasificación	3
2.1.2.2 Despulpado y clasificación	4
2.1.2.3 Remoción del mucílago	4
2.1.2.4 Lavado y clasificación	5
2.1.2.5 Secamiento	5
2.1.2.6 Almacenamiento	5
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUB PRODUCTOS DEL PROCESO DE BENEFICIADO HÚMEDO DE CAFÉ	6
2.2.1 La pulpa	6
2.2.2 El mucílago	6
2.2.3 El agua miel	7
2.3 FACTORES PARA EXPRESAR LA CONTAMINACIÓN ORGÁNICA EN UN CUERPO RECEPTOR	7
2.3.1 Sólidos en suspensión totales (SST)	7
2.3.2 Sólidos sedimentables (SS)	8
2.3.3 Demanda química de oxígeno (DQO)	8
2.3.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	9
2.4 USOS DE LOS SUB PRODUCTOS DEL CAFÉ	9
2.4.1 Usos de la pulpa del café	9
2.4.2 Usos del mucílago del café	10

2.5	ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES DE CAFÉ	10
2.5.1	Reactores anaerobios	12
2.5.2	Formas de alimentar los biodigestores	13
2.5.3	Proceso bacteriológico de la digestión anaerobia	13
2.5.4	Parámetros que influyen en la digestión anaerobia	15
2.5.5	Sub productos de la digestión anaeróbica	17
III.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
3.1	Definición del problema	18
3.2	Justificación del trabajo	19
IV.	OBJETIVOS	20
V.	HIPÓTESIS	21
5.1	Hipótesis alterna	21
5.2	Discusión de hipótesis	21
VI.	METODOLOGÍA	22
6.1	LOCALIZACIÓN DEL TRABAJO	22
6.2	MATERIAL EXPERIMENTAL	22
6.3	FACTORES A ESTUDIAR	23
6.4	DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS	24
6.5	DISEÑO EXPERIMENTAL	25
6.6	MODELO ESTADÍSTICO	25
6.7	UNIDAD EXPERIMENTAL	26
6.8	CROQUIS DE CAMPO	26
6.9	MANEJO DEL EXPERIMENTO	27
6.10	VARIABLES DE RESPUESTA	28
6.10.1	Determinación de los valores de la demanda química de oxígeno (D.Q.O.)	28
6.10.2	Determinación de los valores de la demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O ₅ .)	29

6.10.3	Determinación de valores de los Sólidos Sedimentables (S.S.)	29
6.10.4	Determinación de valores de Sólidos Totales (S.T.)	29
6.10.5	Determinación de valores de Sólidos Totales Disueltos (S.T.D.)	29
6.10.6	Determinación de valores de Sólidos Totales en Suspensión (S.T.S.)	29
6.10.7	Determinación del valor de potencial hidrogénico (pH)	29
6.10.8	Determinación del valor de nitrógeno total (N)	30
6.10.9	Determinación del valor de fósforo total (P)	30
6.11	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	30
VII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
7.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	31
7.1.1	Análisis de Varianza	31
7.1.1.1	Análisis de varianza de la variable pH	31
7.1.1.2	Análisis de varianza de la variable sólidos totales	34
7.1.1.3	Análisis de varianza de la variable sólidos totales en suspensión	35
7.1.1.4	Análisis de varianza de la variable sólidos totales disueltos	38
7.1.1.5	Análisis de varianza de la variable demanda química de oxígeno	39
7.1.1.6	Análisis de varianza de la variable demanda bioquímica de oxígeno	42
7.1.1.7	Análisis de varianza de la variable nitrógeno total	44
7.1.1.8	Análisis de varianza de la variable fósforo total	46
VIII.	CONCLUSIONES	52
IX.	RECOMENDACIONES	54
X.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	55
XI.	ANEXOS	59

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1:	Composición química del mucílago	4
Cuadro 2:	Comparación del DQO del efluente de la agroindustria del café con otros 8	
Cuadro 3:	Alternativas para el tratamiento de aguas mieles del café	11
Cuadro 4.	Temperatura y la máxima carga orgánica degradable	13
Cuadro 5.	Tratamientos a evaluar	24
Cuadro 6.	Definición de tratamientos	26
Cuadro 7.	Distribución de tratamientos en un diseño completamente al azar y arreglo bi factorial 4x3 con 4 repeticiones	26
Cuadro 8.	Resumen de análisis de varianza para la variable pH	31
Cuadro 9.	Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos para la variable pH	32
Cuadro 10.	Resumen de análisis de varianza para la variable sólidos totales (S.T.)	34
Cuadro 11.	Resumen de análisis de varianza para la variable sólidos totales en suspensión (S.T.S.)	35
Cuadro 12.	Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos, para la variable sólidos totales en suspensión	36
Cuadro 13.	Resumen de análisis de varianza para la variable sólidos totales disueltos (S.T.D.)	38
Cuadro 14.	Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos, para la variable sólidos totales en disueltos	39
Cuadro 15.	Resumen de análisis de varianza para la variable demanda química de oxígeno (D.Q.O.)	40
Cuadro 16.	Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos, para la variable demanda química de oxígeno	42
Cuadro 17.	Resumen de análisis de varianza para la variable demanda bioquímica de oxígeno (d.b.o ₅ .)	43
Cuadro 18.	Resumen de análisis de varianza para la variable nitrógeno total	44
Cuadro 19.	Resumen de análisis de varianza para la variable fósforo total	46

Cuadro 20.	Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos, para la variable fósforo total	47
Cuadro 21.	Resumen de significancias	49
Cuadro 22.	Resumen de concentraciones obtenidas antes y después del tratamiento	50
Cuadro 23.	Resumen de eficiencias obtenidas después del tratamiento	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Fases del proceso de descomposición anaeróbica	17
Figura 2.	Comportamiento de los tratamientos en la variable de pH	33
Figura 3.	Comportamiento de los tratamientos en la variable de sólidos totales	35
Figura 4.	Comportamiento de los tratamientos en la variable de sólidos totales en suspensión	37
Figura 5.	Comportamiento de los tratamientos en la variable de sólidos totales disueltos	39
Figura 6.	Comportamiento de los tratamientos en la variable de demanda química de oxígeno	41
Figura 7.	Comportamiento de los tratamientos en la variable de demanda bioquímica de oxígeno	44
Figura 8.	Comportamiento de los tratamientos en la variable nitrógeno total	45
Figura 9.	Comportamiento de los tratamientos en la variable fósforo total	48
Figura 10.	Envío de muestras a laboratorio	59
Figura 11.	Alimentación de biodigestores con mezcla de pulpa y agua miel	59
Figura 12.	Resultados de análisis de muestras sin tratamiento	60
Figura 13.	Resultados de análisis de muestras con 20 días de retención hídrica	61
Figura 14.	Resultados de análisis de muestras con 30 días de retención hídrica	62
Figura 15.	Resultados de análisis de muestras con 40 días de retención hídrica	63

**“EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SUB PRODUCTOS DEL BENEFICIADO
HÚMEDO DE CAFÉ SOMETIDOS A TRATAMIENTO ANAERÓBICO; SAN JUAN LA
LAGUNA, SOLOLÁ.”**

Resumen

El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de reducción en la concentración de los parámetros de contaminación, en los sub productos de la agroindustria del café (pulpa y agua miel), sometidos a un proceso anaeróbico, como parte de un sistema de tratamiento. Realizado en cooperativa La Voz Que Clama en el Desierto, San Juan La Laguna, Sololá. Se utilizó el arreglo completamente al azar bi factorial, con cuatro proporciones de pulpa y agua miel de café: 25:75, 50:50, 40:60 y 60:40 de pulpa y agua miel, respectivamente. Cada proporción fue sometida a 3 tiempos diferentes de retención hídrica: 20, 30 y 40 días. Las variables de respuesta evaluadas fueron: potencial de hidrógeno (pH), esta variable obtuvo el mejor resultado a los 40 días de retención hídrica. Las variables que obtuvieron mejor eficiencia en reducción de concentración a los 30 días de retención hídrica, fueron: sólidos totales (S.T.), sólidos totales en suspensión (S.T.S.), sólidos totales disueltos (S.T.D.), demanda química de oxígeno (D.Q.O.) y demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.). Las variables de nitrógeno total (N) y fósforo total (P) obtuvieron la mejor eficiencia en reducción de concentración, a los 20 días de retención hídrica. Los beneficios húmedos de café, con uso entre 80 a 350 litros de agua por cada quintal de café pergamino, pueden someter los sub productos (pulpa y agua miel), a tratamiento anaeróbico con retención hídrica de 30 días. Reposar el inóculo de bacterias por un período de 60 días, previo a iniciar la alimentación de los digestores.

“PHYSICOCHEMICAL EVALUATION OF THE SUB-PRODUCTS OBTAINED FROM WET COFFEE MILLING SUBJECT TO ANAEROBIC TREATMENT, SAN JUAN LA LAGUNA, SOLOLÁ”

Summary

The objective of this study was to evaluate the reduction effect on the concentration of the contamination parameters in the coffee agroindustry sub-products (pulp and mucilage), subject to the anaerobic process as part of the treatment system. The same was carried out in “La Voz Que Clama en el Desierto” cooperative, in San Juan La Laguna, Sololá. A complete randomized bifactorial design with four pulp proportions and mucilage was used: 25:75, 50:50, 40:60 and 60:40 of pulp and mucilage, respectively. Each proportion was subjected to 3 different types of water retention: 20, 30 and 40 days. The evaluated response variable was: hydrogen potential (pH); this variable obtained the best result with the 40-day water retention. The variables that obtained better reduction efficiency with the 30-day water retention were: total solids (TS), total suspended solids (TSS), total dissolved solids (TDS), chemical oxygen demand (COD), and biochemical oxygen demand (BOD). The total nitrogen variables (N) and total phosphorus (P) obtained the best reduction regarding concentration reduction with the 20-day water retention. The wet coffee processing, using from 80 to 350 liters of water per parchment coffee quintal, can subject the sub-products (pulp and mucilage) to an anaerobic treatment with a 30-day water retention. Let the bacteria inoculum stand for a 60-day period, prior to adding feedstock to the digesters.

EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SUB PRODUCTOS DEL BENFICIADO HÚMEDO DE CAFÉ SOMETIDOS A TRATAMIENTO ANAERÓBICO; SAN JUAN LA LAGUNA, SOLOLÁ

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe preocupación por la contaminación que generan los subproductos del beneficiado húmedo de café (pulpa y agua miel), lo que ha motivado a realizar investigaciones para darles tratamiento y así minimizar la carga contaminante. Por ejemplo, en México, Hourbon et al., (2007) realizó una investigación para desarrollar una solución integral y sustentable para el tratamiento de los subproductos sólidos y líquidos del beneficiado húmedo de café a través de sistemas de tratamiento aeróbicos y anaeróbicos.

Hasta ahora en Guatemala a dichos sub productos se les ha dado un tratamiento por separado, lo cual implica atender dos sistemas de tratamiento a la vez, además se requiere más área y mano de obra, la mayoría de estos sistemas son por la vía aeróbica, generando malos olores, vectores y gases de efecto invernadero como el metano, que como se sabe es 23 veces más contaminante que el CO₂.

Según pruebas realizadas durante el desarrollo de esta tesis, se determinó que la densidad aparente de la pulpa fresca es de 0.37 gramos por centímetro cúbico, mientras que la densidad real es de 0.84 gramos por centímetro cúbico, con un espacio poroso de 55.83%, esto quiere decir que en un volumen de un metro cúbico caben aproximadamente 370.01 kilogramos de pulpa fresca y 558.30 litros de agua miel. Por lo anterior, nace la inquietud de realizar esta investigación para contribuir en las alternativas de tratamiento de los sub productos provenientes del proceso agroindustrial del café y así reducir el espacio ocupado, al tratar los dos en conjunto, bajo un sistema de digestión anaeróbica.

El principio de este sistema consiste en la reducción de la carga orgánica a través de una fermentación anaeróbica, donde existe una gran población de bacterias encargadas de la degradación de la materia orgánica; que al reducirse también se reducen los valores de Demanda Química de Oxígeno (D.Q.O), Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (D.B.O.₅), Sólidos Totales en Suspensión (S.T.S.) y otros parámetros de contaminación contenidos en la pulpa y el agua miel del café.

Como resultado de este proceso se puede obtener, biogás o gas metano y un líquido rico en nutrientes y de fácil absorción por las plantas, dicho líquido se puede aplicar vía foliar o al suelo a diferentes cultivos.

La investigación se realizó en el Beneficio Húmedo de Café de la Cooperativa La Voz Que Clama en el Desierto, en el municipio de San Juan La Laguna, Sololá; como un aporte al cuidado y preservación del ambiente de dicho municipio y especialmente del lago de Atitlán.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. PROCESO DE BENEFICIADO HÚMEDO DE CAFÉ

2.1.1. Campo (cultivo)

2.1.1.1. Recolección

La recolección del fruto consiste en cortar los frutos maduros del cafeto, cuidando de no cortar los frutos que no han llegado a su completa madurez. Los recolectores de frutos llevan dos sacos, uno pequeño y otro grande, el pequeño les sirve para ir depositando los frutos cortados de los cafetos y el grande para ir llenándolo con el café del saco pequeño y de esta manera transportarlo hacia el beneficio, en algunos casos en lugar del saco pequeño se utilizan canastos plásticos (Romero, 1985).

2.1.2. Beneficiado húmedo (proceso agroindustrial)

2.1.2.1. Recibo y clasificación

Existen dos formas de recibo: por peso y por volumen. Según Decreto No. 883, emitido por el Congreso de la República de Guatemala en 1951, se autoriza como medida oficial para el corte 45.4 kilogramos, que equivalen a un quintal. El peso se mide en romanas, básculas y en modernas pesas electrónicas. En el caso de fincas, algunos utilizan las medidas volumétricas que consisten en cajas hechas de madera o lámina, con volúmenes equivalentes a 454.4, 22.7 y 11.35 kilogramos. Estas cajas están colocadas encima de los recibidores y al momento de llenarlas, se anota la cantidad en la tarjeta del cortador. Posteriormente al recibo se efectúa la clasificación del fruto de café, se realiza separando los cuerpos por densidad, utilizando agua o bien un flujo de aire. En algunos casos, combinando esto con zarandas oscilantes o cribas rotatorias para hacer una separación por peso y tamaño (ANACAFÉ, 2005).

2.1.2.2. Despulpado y clasificación

El despulpado es la fase mecánica del proceso, donde el fruto es sometido a la eliminación de la pulpa (pericarpio). Esta operación se efectúa a través de máquinas despulpadoras que aprovechan la cualidad lubricante del mucílago del fruto, para que por presión se separen los granos y la pulpa, al despulpar un quintal de fruto maduro se obtienen aproximadamente 27.24 kilogramos de café pergamino despulpado y 18.16 kilogramos de pulpa. El café despulpado deberá clasificarse por tamaño, densidad o por ambos, esto con el objeto de separar cafés enfermos o deformados, mal despulpados, pulpas y uniformizar el tamaño del grano (ANACAFÉ, 2005).

2.1.2.3. Remoción del mucílago (fermentación)

El mucílago representa entre el 15.5 y el 20% en peso del fruto maduro con relación al contenido de humedad, es una estructura rica en azúcares y pectinas (ANACAFÉ, 2005). El mucílago del café contiene 15% de sólidos en forma de hidrogel coloidal insoluble en agua, sin estructura celular; los sólidos presentes en éste tienen un 80% de ácidos pécticos y 20% de azúcares. Durante la fermentación ocurren múltiples reacciones bioquímicas que permiten después de 10 a 18 horas que el mucílago se disuelva en agua (Orozco, 2003).

Cuadro 1: Composición química del mucílago

Elemento	Porcentaje
Materias pépticas totales	33%
Azúcares reductores	30%
Azúcares no reductores	20%
Celulosa, cenizas, etc.	17%
Total	100%

(ANACAFÉ, 2005)

2.1.2.4. Lavado y clasificación

El lavado consiste en la eliminación completa del mucílago adherido al grano de café, se puede realizar en dos formas: manual o mecánica. El método manual se realiza en tanques de lavado y/o canales de correteo tradicionales. El método mecánico es con lavadoras verticales discontinuas, lavadoras horizontales continuas, bombas centrífugas, bombas sumergibles y/o bombas estacionarias. La clasificación del café pergamino lavado, se realiza por densidad utilizando agua, aquí se separan materiales flotantes, o menos densos, la densidad aparente del café lavado de primera es de 662.84 kilogramos por metro cúbico (ANACAFÉ, 2005).

2.1.2.5. Secamiento

El secado se puede realizar en forma natural al sol, en patios de concreto o terrenos planos de tierra cubiertos con nylon negro, también se puede hacer por medio de bandejas, parihuelas y otros dispositivos. Otra forma de realizar el secado del grano de café es en forma mecánica, mediante secadoras de pila estacionarias y/o de cilindro rotativo (ANACAFÉ, 2005).

2.1.2.6. Almacenamiento

Las condiciones óptimas para un buen almacenamiento es que en la bodega se maneje una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 65%, el café puede ser almacenado a granel, o envasado en sacos de nylon o de yute, y con el 10 al 12% de humedad en el grano (ANACAFÉ, 2005).

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUB PRODUCTOS DEL PROCESO DE BENEFICIADO HÚMEDO DE CAFÉ

En el proceso de beneficio del café se originan los subproductos pulpa y aguas mieles, los cuales contienen altas concentraciones de carga orgánica contaminante y pueden generar un impacto negativo al tener contacto con los recursos del medio ambiente debido al desecho indiscriminado sin previo tratamiento de estos (Salazar, Quiroga, Castillo & Vega, 2013). La pulpa y el mucílago contenidos en un kilogramo de café cereza pueden retirarle todo el oxígeno a 7400 litros de agua pura (Orozco, 2003).

2.2.1. La pulpa

Es un subproducto sólido y el que mayor volumen y peso representa; según datos reportan que la pulpa representa el 40% del peso en fresco del fruto de café maduro. La composición química de este residuo aporta una carga contaminante de 0.44 kilogramos DQO por kilogramo de café oro producido (ANACAFE, 2005).

La pulpa de café representa alrededor del 43% del peso fresco del fruto, equivalente al 28% en base seca, en base fresca contiene alrededor de 80% de humedad (CATIE, 1974). En fresco la pulpa de café contiene entre el 75 y 80% de humedad (PROMECAFE, 1992). Es el subproducto de mayor volumen, representa aproximadamente el 40 % del peso total del fruto; en Costa Rica es aprovechado como abono en los cafetales (Erick, 1996).

2.2.2. El mucílago

Es un hidrogel (sistema coloidal líquido liofílico) que posee una carga contaminante equivalente a 0.075 kilogramo D.Q.O. por kilogramo de café oro producido. Representa entre el 15.5 y 20% del peso del fruto, y conforma los elementos contaminantes potenciales por su alto contenido de azúcares, pectinas y ácidos orgánicos.

El pH del mucílago en café maduro es de 5.6 a 5.75, (ANACAFE, 2005). Es una cantidad de geles coloidales de pectinas, y son contaminantes en menor grado (Erick, 1996). De la mezcla de pulpa mucílago se desprenden lixiviados cuya DQO oscila alrededor de 110,000 ppm (Orozco, 2003).

2.2.3. El agua miel

La naturaleza química de este sub producto está relacionada con la composición físico-química de la pulpa y el mucílago, debido a que estos dos elementos proporcionan partículas y componentes durante el contacto turbulento e intenso con el agua limpia, aportando de esta manera, materia orgánica, fósforo, nitrógeno, carbohidratos no fermentados, alcoholes, ácidos orgánicos, taninos, cafeína, ácido cafeico y ácido clorogénico (ANACAFE, 2005). Contiene una alta cantidad de sólidos sedimentables, azúcares, materia soluble y en general materia orgánica en abundancia, lo que la hace altamente contaminante (Erick, 1996).

2.3. FACTORES PARA EXPRESAR LA CONTAMINACIÓN ORGÁNICA EN UN CUERPO RECEPTOR

La carga contaminante es expresada en distintas formas, para el caso de compuestos orgánicos que están sometidos a oxidación bioquímica se utiliza la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Algunas normas de calidad, como la norma para certificación de plantas de tratamiento de aguas negras ISO 14000, exigen medir parámetros como: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), pH, color, turbidez, sólidos disueltos totales (STD), sólidos en suspensión (SS) y temperatura entre otros (Solares, 2006).

2.3.1. Sólidos en suspensión totales (SST)

Es la suma de los sólidos disueltos y los sólidos en suspensión (Lapeña, 1990).

2.3.2. Sólidos Sedimentables (SS)

La cantidad de sólidos en suspensión que se encuentran en el flujo de las aguas residuales, expresado en kilogramos de sólidos sedimentables por metro cúbico (Kg SS/m³) o bien en partes por millón de miligramos litros (ppm (mg/lit) (ANACAFE, 2005). Los sólidos en suspensión es una medida de los sólidos sedimentables (no disueltos) que pueden ser retenidos en un filtro (Lapeña, 1990).

2.3.3. Demanda química de oxígeno (DQO)

Es la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación completa de la materia orgánica por agentes químicos altamente oxidantes, como el permanganato de potasio, en un ambiente altamente ácido (ANACAFE, 2005).

La demanda química de oxígeno corresponde al volumen de oxígeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible de oxidación al dicromato o permanganato en un medio ácido (Ramalho, 2003). Es la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, y se determinan por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación química (Gobierno de la República de Guatemala, 2006).

Cuadro 2. Comparación del DQO del efluente de la agroindustria del café con otros.

Tipo de efluente	DQO mg/lit		
Aguas negras domésticas tratadas	20	a	60
Águas negras domésticas no tratadas	300	a	400
Efluentes del beneficio húmedo de café*	3,000	a	7,000
Pasta de estiércol bovino	10,000	a	20,000
Pasta de estiércol porcino	30,000	a	80,000

(ANACAFE, 2005)

2.3.4. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

Es la medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días a una temperatura de veinte grados Celsius (Gobierno de la República de Guatemala, 2006). La demanda bioquímica de oxígeno se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de la materia orgánica biodegradable (Ramalho, 2003).

La DBO_5 es la cantidad de oxígeno requerida por un inóculo de bacterias para la descomposición de la materia orgánica en la muestra, durante 5 días a una temperatura de 20 grados centígrados. Puede ser expresado como unidad de concentración en agua en kilogramos de DBO por metro cúbico (Kg de DBO/m^3), o bien como cantidad de materia orgánica de un desecho en kilogramos de DBO por quintal (Kg de DBO/qq) de café oro producido. El mal olor causado por las aguas mieles es debido al bisulfuro de hidrógeno (ANACAFE, 2005).

2.4. USO DE LOS SUB PRODUCTOS DEL CAFÉ

Subproductos como la pulpa y las aguas residuales generadas en las unidades de procesamiento del café, son una fuente importante de contaminación si no se les da un manejo apropiado, ya que estos tienen un alto contenido de materia orgánica. El metano generado a partir de los procesos de fermentación de los subproductos del café, sobresale como uno de los aspectos con mayor impacto al ser un gas de efecto invernadero (GEI), 23 veces más perjudicial que el CO_2 (Sánchez, 2012).

2.4.1. Uso de la pulpa de café

La pulpa es utilizada para producción de biogás, producción de hongos comestibles, obtención de abono orgánico, vinos, alcohol y carbón activado; además se utiliza para

alimentación animal (Castillo, 2008). La pulpa en sí no contiene una población de bacterias metanogénicas, que son las responsables de la descomposición de la materia orgánica para la producción de gas, por esta razón se debe de hacer un inoculo con estiércol de ganado bovino ya que este si cuenta con gran población de bacterias metanogénicas (PROMECAFE, 1992).

2.4.2. Uso del mucílago de café

El lodo extraído de las plantas de tratamiento de aguas, es secado y luego es transportado a una planta procesadora de pectinas. Estas tienen un precio internacional de \$6.00 el kilo aproximadamente (CATIE, 1974).

2.5. ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS MIELES DEL CAFÉ

Las aguas mieles del café se pueden tratar a través del riego en cultivos, de esta manera los cultivos aprovechan los nutrientes contenidos en el agua y el agua sirve como vehículo para luego ser transpirada por las plantas. También se puede dejar el agua miel a exposición del sol, para que de esta manera se deshidraten los lodos y puedan aprovecharse como abono orgánico en los distintos cultivos. El agua miel puede ser tratada en forma mecánica, con el uso de tamizados, eliminando los sólidos en suspensión (IICA, 2010).

También se pueden tratar las aguas mieles en forma química, utilizando flocculantes y coagulantes que dan origen a un proceso de sedimentación. Otra forma para el tratamiento de las aguas mieles es por medio del método biológico, con el uso de lagunas facultativas o anaerobias, y/o reactores anaerobios. En estas lagunas y reactores existen bacterias metanogénicas encargadas de degradar la materia orgánica contenida en las aguas mieles y generan gas metano (IICA, 2010).

Cuadro 3. Alternativas para el tratamiento de aguas mieles del café.

Alternativa	Mecanismo de funcionamiento	Eficiencia observada	Observaciones
Riego de cultivos	Infiltración en terrenos de cultivo. Aprovechar materia orgánica en el agua.		Afecta los cultivos por quema.
Disposición en el terreno	Evaporación e infiltración de las aguas.	En dependencia de factores climáticos y del terreno.	Barato, pero existe el riesgo de contaminar el manto freático.
Tamizado	Eliminación de los sólidos en suspensión	Bastante eficiente; eliminación sólidos de mayor tamaño.	
Tratamiento químico	Eliminación de sólidos en suspensión, a través de coagulación/floculación y sedimentación.	Bastante eficiente, elimina los sólidos y malos olores presentes en el agua.	
Lagunaje facultativa o anaerobia	Eliminación de material disuelto en suspensión, a través de actividad biológica (algas y bacterias).	Poca materia orgánica removida por procesos biológicos.	Las lagunas fácilmente se acidifican y crean un ambiente ácido no apto para las bacterias descontaminantes.
Reactores anaerobios	Eliminación de material disuelto o en suspensión a través de actividad biológica (bacterias anaerobias)	Buena remoción de materia orgánica. Producción de gas metano que puede ser aprovechado	Manejo complejo y caro, en cuanto a inversión y operación.

(ANACAFE, 2005)

2.5.1. Reactores anaerobios

La digestión anaerobia está basada en el principio de descomposición y fermentación de la materia orgánica presente en los residuos de origen animal y vegetal. Actualmente se utiliza para el tratamiento de aguas residuales de café y se ha considerado su aplicación para el tratamiento de la pulpa (PROMECAFE, 1992). La degradación anaerobia en reactores metanogénicos es uno de los procesos que permite degradar la materia orgánica disuelta en las aguas mieles. El proceso anaeróbico es aquel en que se efectúa la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular como aceptor de electrones (Castillo, 2008). El biodigestor es un medio más eficiente y radical para eliminar la contaminación, lo consigue en un 80% (ANACAFE, 2005).

Por cada kilogramo de DQO eliminado por el metabolismo microbiano, la vía aerobia requerirá de un kW/h de energía eléctrica para un equipo de aeración, mientras que la vía anaerobia producirá el equivalente a 3kW/h como energía química acumulada en el metano, la cual puede ser convertida en una máquina de combustión acoplada a un generador eléctrico de eficiencia media (20%), lo que equivale a 0,6kW de energía eléctrica por Kg de DQO removida. El biogás es el producto de la degradación de la materia orgánica presente en los desechos orgánicos, con contenidos mayores al 50% de CH₄ y menores al 50% de CH₂ además contiene trazas de nitrógeno, hidrógeno, vapor de agua, amoníaco y compuestos aromáticos como escatol y catecol (Castillo, 2008).

Hay que tomar en cuenta tres parámetros para la descomposición de la materia orgánica dentro de un reactor biológico, temperatura, pH y nutrientes. La temperatura influye en la actividad y crecimiento bacteriano. El pH de los materiales debe ser cercano al valor de neutro (7.0), por lo que se hace necesario agregar un agente neutralizante, especialmente en la etapa inicial de funcionamiento del reactor (PROMECAFE, 1992).

Por último se tiene a los nutrientes, ya que las bacterias además de la materia orgánica y adecuada temperatura y pH, también necesitan básicamente nitrógeno y fósforo para su desarrollo (PROMECAFE, 1992).

Cuadro 4. Temperatura y la máxima carga orgánica degradable

	Temperatura °C	Carga Máxima kg DQO/m ³
Psicrofílico	8-20	1-3
Mesofílico	20-40	3-20
Termofílico	50-65	40-70

(PROMECAFE, 1992)

2.5.2. Formas de alimentar los biodigestores

Para la fermentación anaeróbica de sólidos existen dos formas de alimentar los biodigestores. Uno es el método batch, en el cual se alimenta el biodigestor con los residuos hasta que se completa el volumen total y se espera hasta que se descomponga toda la materia orgánica para volverlo a alimentar. Otro método es de forma continua, en el cual la alimentación se puede realizar a diario durante una o dos veces, y resulta ser más eficiente que el método anterior (PROMECAFE, 1992).

2.5.3. Proceso bacteriológico de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia se caracteriza por la existencia de tres fases en el proceso de degradación del sustrato (material orgánico), entre las cuales se encuentran la hidrólisis, la acidogénesis y la metano génesis. La hidrólisis es donde la materia orgánica es metabolizada por los microorganismos, descomponiendo las cadenas largas en cadenas cortas (Chávez, Cartolin, Villa Nueva y Cervantes, 2007).

La acidogénesis es la fase donde los productos de la hidrólisis se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. Las fases de hidrólisis y acidogénesis se llevan a cabo por un grupo de bacterias, las hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas, en estos procesos se da origen al oxígeno. Aquí aún no se da ninguna reducción en la DQO del sustrato, dado a que las cadenas orgánicas complejas únicamente se en cadenas más cortas, sin consumo o reducción de la materia orgánica presente (Chávez, et al., 2007). En la fase de hidrólisis y acidogénesis se produce una degradación de la materia orgánica que genera un ambiente más propicio para el consumo de la materia orgánica para la fase metanogénica (Salazar, et al., 2013).

En la metanogénesis el segundo grupo de bacterias convierte los ácidos orgánicos en metano y dióxido de carbono, se trata de bacterias estrictamente anaerobias, es decir que el oxígeno molecular las elimina. Estas bacterias son del grupo metanogénicas y las más importantes son las acetoclásticas estas transforman el ácido propanoico y acético. Las bacterias hidrogenófilas son las que consumen el hidrógeno generado en la primera parte de la reacción y lo convierten en biogás. El biogás está formado, dependiendo en gran parte del sustrato, por un 40-70% de metano; 30-60% de CO₂ y pequeñas cantidades de otros gases, como el ácido sulfhídrico. El factor de conversión de la DQO a metano será de 0.25 kg CH₄/kg de DQO (equivalente a 0.38 m³ de CH₄/kg de DQO a una temperatura de 25°C y presión de una atmosfera), en energía primaria sería de 3.5 kWh/kg de DQO eliminada, esto representa una gran ventaja frente a sistemas aerobios que requieren de 1 kWh/kg de O₂ consumido (Chávez et al., 2007).

En la digestión de materia orgánica en condiciones anaerobias, se llevan a cabo una serie de procesos de descomposición de polímeros orgánicos por medio de bacterias acidogénicas, generando un medio ácido que inhibe el desarrollo de las bacterias metanogénicas, por el contrario los ácidos orgánicos producidos en esta fase, como el acético, butírico y propiónico son la fuente de alimento de las bacterias metanogénicas, si se regula el pH (Salazar, et al., 2013).

Las bacterias por lo general no son capaces de asimilar el material orgánico que se encuentra en partículas, por lo que debe degradarse hasta polímeros o monómeros solubles, esto se lleva a cabo en la fase de hidrólisis donde interactúan enzimas celulolíticas, proteolíticas y lipolíticas. La oxidación anaerobia de ácidos grasos volátiles produce acetato, bióxido de carbono e hidrogeno (Bermudez, Canovas, Manjon, Iborra y Howell, 1988).

La fase ácida es donde los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis, son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico. En la fase metanogénica el ácido acético presenta una fórmula química CH_3COOH , y por acción de bacterias pierde un carbono y se generan una molécula de CO_2 y otra de CH_4 . El producto CH_4 se llama metano y es el principal componente del biogás, como se observa en la siguiente reacción $\text{CH}_3\text{COOH} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$. En esta etapa metabólica el CH_4 es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H_2 y CO_2 pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol (Castillo, 2008).

2.5.4. Parámetros que influyen en la digestión anaeróbica

Para que el proceso de fermentación anaeróbica tenga condiciones adecuadas se deben de tomar en cuenta varios aspectos, dentro de los cuales se puede mencionar la acidez del medio, manteniendo el pH en un rango óptimo de 6.6-7.6 (Chávez et al., 2007).

Nutrientes ajenos al nitrógeno y al fósforo, como hierro, níquel, magnesio, calcio, bario, cobalto y sulfatos, son esenciales para los procesos anaeróbicos. Su influencia se hace notar en aspectos como la floculación, la precipitación del sulfuro (en el caso del hierro) y el incremento de la actividad bacteriana (Orozco, 2003).

Otro parámetro a considerar es la relación carbono:nitrógeno:fósforo, debiendo mantener una relación óptima de 150:5:1 respectivamente (Chávez et al., 2007).

El requerimiento de nutrientes del sistema es descrito generalmente por la relación mínima: (Orozco, 2003)

$$\frac{DQO_{ent}}{N.P} = 70$$

Donde:

DQO_{ent}: Concentración de sustrato del afluente

N.P: Concentraciones de Nitrógeno y Fósforo en la alimentación.

El factor exterior más importante es la temperatura esta debe mantenerse en un rango óptimo entre 15-70 °C. Existen tres rangos de trabajo de la temperatura por los tipos de degradaciones bacterianas existentes, está la zona psicrófila donde las temperaturas son debajo de los 20 °C, la zona mesofílica donde se manejan entre 20 y 40 °C y la zona termofílica que son temperaturas por encima de los 40°C. A medida que la temperatura aumenta, aumenta el crecimiento de bacterias y por lo tanto también la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás. El valor de los sólidos totales debe estar en un rango óptimo de 10-40% (Chávez et al., 2007).

La eficiencia de remoción de carga contaminante en un sistema de tratamiento de aguas residuales viene dado por: (Orozco, 2003)

$$E = \frac{S_o - S}{S_o} * 100$$

Donde:

E: Eficiencia de remoción del sistema (%)

S: Carga contaminante de salida (mg DQO, DBO₅, SST/l)

So: Carga contaminante de entrada (mg DQO, DBO₅, SST/l)

2.5.5. Sub productos de la digestión anaeróbica

Los sub productos de la digestión anaeróbica incluyen el biogás y el bioabono. El biogás es un gas compuesto de 60-80% de metano (CH₄), 20-40% de dióxido de carbono (CO₂) y otros componentes. Es una fuente de combustible similar al gas propano. Un metro cúbico de biogás tiene un poder calorífico para 6 y 8 kW/h y el gas propano tiene un poder calorífico para 6.95 kW/h por libra de presión. El bioabono es un abono orgánico con propiedades de fertilizante y mejorador del suelo, rico en materia orgánica estabilizada y libre de bacterias patógenas (PROMECAFE, 1992).

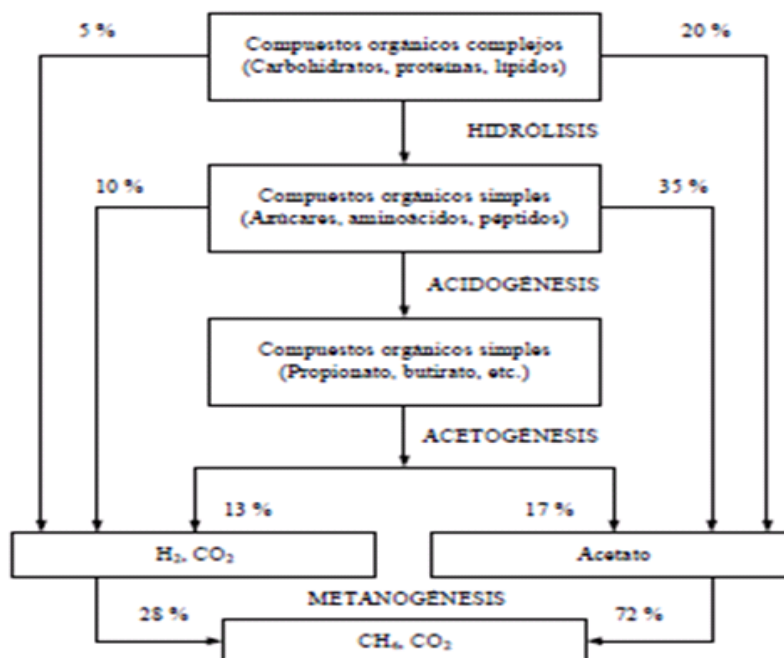


Figura 1. Fases del proceso de descomposición anaeróbica (Guardia, 2012)

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 Definición del problema

En la caficultura, durante el proceso agroindustrial del café se generan subproductos que pueden causar contaminación cuando no se manejan adecuadamente, estos sub productos son pulpa y agua miel de café.

La cantidad de café maduro procesado en el beneficio de Cooperativa La Voz Que Clama en el Desierto es de 953,400 kilogramos, de este proceso se generan alrededor de 381,360 kilogramos de pulpa fresca, que pueden ocupar un volumen real equivalente a 459.50 metros cúbicos, además se generan 546 metros cúbicos de agua miel, la cosecha de café dura 5 meses iniciando entre los meses de noviembre a diciembre y finaliza entre los meses de febrero a marzo.

Actualmente estos sub productos en la mayoría de beneficios de café, son tratados en sistemas de depósitos abiertos y en la cooperativa, de igual manera, la pulpa es almacenada en un depósito abierto generándose una fermentación aeróbica, donde se emanan gases de efecto invernadero al ambiente y por lo mismo se emanan malos olores.

Además al estar expuesta al ambiente, dicha pulpa se convierte en fuente de proliferación de vectores, también genera contaminación visual para los visitantes del lugar. Esta pulpa permanece en el depósito desde el inicio de la cosecha hasta dos o tres meses después de que esta haya finalizado.

Parte de esta pulpa es tratada a través de un sistema de lombricompost utilizando lombrices coqueta roja (*Eisenia foetida*), para esto se espera que la pulpa sufra un proceso de semi descomposición en el tanque abierto, previo a dársela a las lombrices.

En general con este sistema se le da tratamiento por lo menos a unos 15,436 kilogramos de pulpa con 65% de humedad, generados del proceso de unos 47,443 kilogramos de café maduro, la cantidad de pulpa tratada representa únicamente un 4.98% del total de la pulpa generada en una cosecha de la cooperativa; el resto sigue almacenada en el depósito abierto donde se espera que se descomponga naturalmente previo a su aprovechamiento en almácigos de café o cultivos en campo definitivo.

Con los sistemas de tratamiento utilizados actualmente se encuentra el inconveniente de tener contaminación visual, proliferación de vectores, generación de malos olores, gases de efecto invernadero liberados al ambiente y se pueden contaminar los cuerpos de agua, si los efluentes del tratamiento no se manejan adecuadamente.

3.2 Justificación del trabajo

Por tratarse de un lugar turístico y que uno de los atractivos es el cultivo y el proceso agroindustrial del café, el tratamiento de los sub productos generados por dicho proceso agroindustrial, se convierte en un tema de importancia para la cooperativa y para las instituciones encargadas de velar por el bienestar ambiental.

Por lo que nace la inquietud de realizar el presente trabajo de tesis, con la finalidad de aportar opciones o alternativas para el tratamiento de los sub productos del beneficiado húmedo de café bajo un sistema de fermentación anaeróbica, que permitiría realizar un tratamiento en ambientes cerrados, evitando así el contacto visual con los materiales a tratar, además de permitir menor proliferación de vectores y de malos olores, en estos sistemas también se tiene la ventaja de reducir la absorción de oxígeno requerido por las bacterias para la degradación de la materia orgánica y se pueden atrapar los gases de efecto invernadero generados por la misma fermentación anaeróbica para aprovecharlos como fuente de combustible.

IV. OBJETIVOS

GENERAL:

- Determinar la eficiencia y factibilidad de la biodigestión anaeróbica en la reducción de los parámetros de contaminación ambiental de los sub productos del beneficiado húmedo de café (pulpa y agua miel), comparado contra el potencial de contaminación de muestras sin tratamiento.

ESPECÍFICOS:

- Evaluar diferentes tiempos de retención de la materia orgánica dentro de los biodigestores, para su degradación.
- Evaluar diferentes proporciones en base a volumen, de pulpa y agua miel de café, sometidos al proceso de digestión anaeróbica, para su degradación.
- Evaluar el comportamiento de parámetros de contaminación ambiental, en los sub productos del beneficiado húmedo de café (pulpa y agua miel), antes y después de haberse sometido a procesos de fermentación anaeróbica.

V. HIPÓTESIS

5.1 HIPÓTESIS ALTERNA

Los tres diferentes tiempos de retención hídrica dentro de los biodigestores, favorecen la degradación de la materia orgánica.

Al menos una de las proporciones de pulpa y agua miel, favorecen su degradación al ser sometidas al proceso de biodigestión anaeróbica.

La ausencia de tratamiento anaeróbico a los sub productos del café (pulpa y agua miel), incidirá negativamente en la contaminación ambiental.

5.2 DISCUSIÓN DE HIPÓTESIS

El tiempo de retención hídrica de la materia orgánica dentro de los biodigestores juega un papel importante, ya que de este depende el desarrollo de las distintas etapas de la digestión anaeróbica, donde se pueden mencionar la hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis.

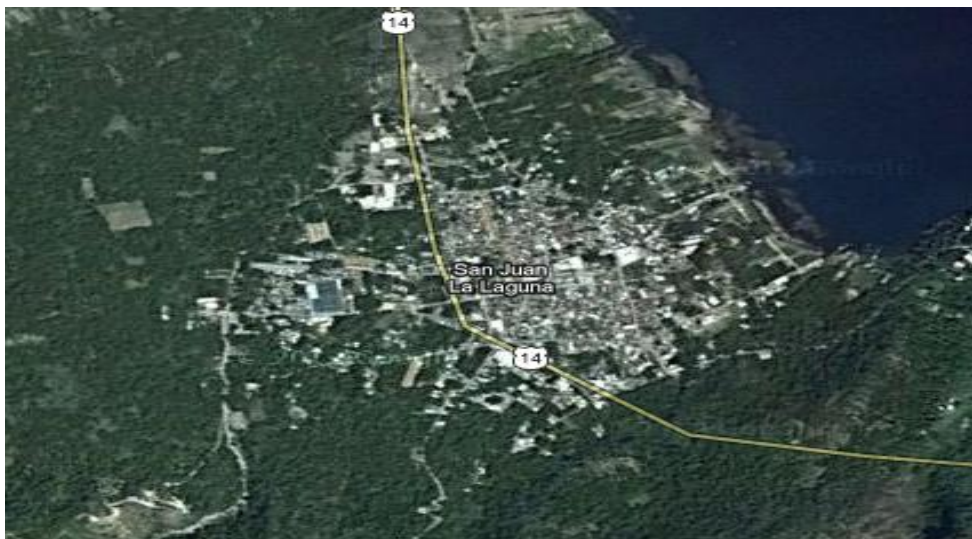
Mientras mas contenido de sólidos existe en las distintas proporciones de mezcla de pulpa y agua miel, se reporta mayor contenido de solidos totales disueltos en el transcurso del tiempo de retención hídrica, lo cual puede deberse al proceso de hidrólisis donde se degrada la materia orgánica, pasando los lípidos, proteínas y carbohidratos a formas mas simples como aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes.

Una de las condiciones para generar una fermentación anaeróbica es someter los sustratos a un ambiente totalmente cerrado o hermético, por lo tanto existe ausencia de oxígeno, además los gases generados en este tipo de fermentación se pueden atrapar y aprovecharse, cosa que no se puede hacer cuando la fermentación es en medios anaeróbicos.

VI. METODOLOGÍA

6.1 LOCALIZACIÓN

La evaluación se realizó en jurisdicción del municipio de San Juan La Laguna, Sololá, en las instalaciones de la Cooperativa “La Voz Que Clama en el Desierto”, ubicada en Latitud Norte: 14°41’48” y Longitud Oeste: 91°17’23” a una altitud de 1,600 metros sobre el nivel del mar.



6.2 MATERIAL EXPERIMENTAL

Los materiales evaluados fueron la pulpa y agua miel de café como sub-productos generados del proceso de beneficiado húmedo de café. La pulpa representa el 40% del peso en fresco del fruto y el mucílago representa el 18% del peso del fruto fresco, éste es removido del grano de café con agua limpia, dando origen al agua miel en el proceso de lavado. Además surge agua miel en la actividad del despulpado del fruto, debido a que se utiliza un sistema de recirculación de agua para transporte del fruto a la maquinaria de despulpado y esto hace que el agua se vaya cargando de material orgánico.

6.3 FACTORES ESTUDIADOS

Factor A: Se evaluaron las siguientes proporciones de mezcla, en base a volumen de pulpa y agua miel:

- a) proporción 40/60
- b) proporción 50/50
- c) proporción 75/25
- d) proporción 60/40, de pulpa y agua miel, respectivamente.

Factor B: Los tiempos de retención evaluados dentro de los biodigestores, fueron los siguientes:

- a) 20 días
- b) 30 días
- c) 40 días

Se evaluó proporciones de mezcla en base a volumen de pulpa y agua miel de café; se utilizó un volumen de 0.14 metros cúbicos disponibles para retención de los materiales en un tonel, representando el 66% del volumen total de cada tonel, dejando un 33% como cámara de gas.

Se evaluó los tiempos de retención de las mezclas dentro de los biodigestores, permaneciendo por un tiempo determinado para lograr su degradación. Para esto se calculó el volumen disponible y se dividió dentro del número de días para cada tratamiento, y el resultado fue el volumen de alimentación diaria de cada biodigestor.

En los tratamientos evaluados a 20 días, el volumen de alimentación diario fue de 7 litros, en los tratamientos evaluados a 30 días el volumen diario fue de 4.67 litros y para los tratamientos evaluados a 40 días el volumen de alimentación fue de 3.50 litros.

Estos volúmenes fueron distribuidos según las proporciones de mezcla evaluadas (40:60, 50:50, 75:25 y 60:40, de pulpa y agua miel respectivamente), es decir que de los 7 litros para los tratamientos a 20 días, y la proporción de 40:60, fueron 2.80 litros de pulpa y 4.20 litros de agua miel.

6.4 DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Se evaluaron 12 tratamientos, derivados de 4 proporciones de mezcla de pulpa y agua miel de café, con 3 tiempos de retención dentro de los biodigestores, con 4 repeticiones por tratamiento para un total de 48 unidades experimentales.

Cuadro 5. Tratamientos a evaluar

Tratamiento	Proporción Pulpa	Proporción Agua Miel	Tiempo de Retención (días)
1	40	60	20
2	50	50	20
3	60	40	20
4	75	25	20
5	40	60	30
6	50	50	30
7	60	40	30
8	75	25	30
9	40	60	40
10	50	50	40
11	60	40	40
12	75	25	40

Elaboración propia

6.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se utilizó un diseño completamente al azar bi factorial, con arreglo factorial 4x3 y 4 repeticiones.

6.6. MODELO ESTADÍSTICO

El modelo estadístico utilizado para la investigación fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = U + A_i + B_j + A_iB_j + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = la variable respuesta a estudiar

U = la media general,

A_i = efecto del i -ésimo nivel del factor A

B_j = efecto del j -ésimo nivel del factor B

A_iB_j = efecto de la interacción entre el i -ésimo nivel del factor A con el j -ésimo nivel del factor B

E_{ijk} = efecto del error experimental asociado a la i - j - k -ésima unidad experimental

Varianzas y covarianzas

$$\text{Var}(y_{ij}) = \sigma^2$$

Las y_{ij} son independientemente distribuidas. Por lo tanto las covarianzas son cero, lo cual es razonable debido a la aleatorización.

Cada parte del modelo juega un papel importante, el valor esperado es usado para construir estimadores, las varianzas y covarianzas son usadas para construir errores estándar de nuestros estimadores.

6.7. UNIDAD EXPERIMENTAL

La unidad experimental en esta investigación estuvo representado por cada uno de los toneles usados como biodigestores en cada tratamiento, por lo tanto el total de unidades experimentales fue de 48.

6.8. CROQUIS DE CAMPO

Se identificaron las proporciones de pulpa y agua miel de la siguiente manera: PA: 40/60; PB: 50/50; PC: 60/40 y PD: 75/25, y los tiempos como, tiempo 1: 20 días; tiempo 2: 30 días y tiempo 3: 40 días.

Cuadro 6: Definición de tratamientos

Proporción	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3
PA	1. PA1	2. PA2	3. PA3
PB	4. PB1	5. PB2	6. PB3
PC	7. PC1	8. PC2	9. PC3
PD	10. PD1	11. PD2	12. PD3

Elaboración propia

A continuación se presenta la distribución de los tratamientos y repeticiones en el campo definitivo.

Cuadro 7. Distribución de tratamientos en un diseño completamente al azar y arreglo bi factorial 4x3 con 4 repeticiones

Repeticiones	Tratamientos											
I	PA1	PB2	PD1	PA3	PC3	PC2	PD2	PB1	PC2	PC1	PD3	PD2
II	PB3	PA2	PC3	PA2	PD3	PB2	PD1	PA3	PA1	PB3	PB1	PC1
III	PB2	PA1	PD3	PA3	PC3	PD1	PC1	PB3	PB1	PA2	PD2	PC2
IV	PC3	PA3	PB3	PC1	PD2	PA1	PD3	PA2	PD1	PB2	PB1	PC2

Elaboración propia

6.9. MANEJO DEL EXPERIMENTO

Antes de alimentar los biodigestores (toneles de 212 litros), con los materiales experimentales, se realizó un inóculo de bacterias utilizando estiércol fresco de ganado bovino a razón de 9 partes de agua por 1 de estiércol fresco, hasta lograr cubrir el volumen disponible para retención de materia orgánica en cada biodigestor (140 litros), se dejó reposar por 9 días.

Después de los 9 días de reposo, se inició la alimentación de los biodigestores, para esto se realizó un proceso de molienda a la pulpa, luego se mezcló con el agua miel según la proporción indicada para cada tratamiento y se incorporó a los biodigestores.

Se tomaron muestras para análisis de composición física y química, antes y después de someterlas al proceso de digestión anaeróbica. Los análisis se realizaron en el laboratorio de Anacafé (Analab); el análisis que se realizó fue el identificado con el código A-11, que es un análisis para aguas servidas, reportando: demanda química de oxígeno (D.Q.O), demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (D.B.O.₅), potencial hidrogénico (pH), sólidos sedimentables (S.S.), sólidos totales disueltos (S.T.D.), sólidos totales (S.T.) , sólidos totales en suspensión (S.T.S), nitrógeno (N) y fósforo (P).

El 07 de febrero de 2012 se tomaron 4 muestras, antes del proceso de digestión anaeróbica, una para cada proporción evaluada (40/60, 50/50, 60/40 y 75/25 de pulpa y agua miel, respectivamente). Las demás muestras se tomaron después del proceso de digestión anaeróbica, y se hicieron conforme se cumplieron los tiempos de retención en cada uno de los tratamientos; de esta manera se tomaron 16 muestras a los 20 días (28 de febrero de 2012), 16 muestras a los 30 días (08 de marzo) y 16 muestras a los 40 días (19 de marzo de 2012), para un total de 52 muestras, 4 antes y 48 después del proceso de digestión.

6.10. VARIABLES DE RESPUESTA

1. Demanda Química de Oxígeno (D.Q.O.) en mg/l
2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.B.O.) en mg/l
3. Sólidos Sedimentables (S.S.) en ml/l
4. Sólidos Totales (S.T.) en mg/l
5. Sólidos Totales en Disueltos (S.T.D.) en mg/l
6. Sólidos Totales en Suspensión (S.T.S) en mg/l
7. Potencial Hidrogénico (pH)
8. Nitrógeno (N) en mg/l
9. Fósforo (P) en mg/l
10. Temperatura ambiental en °C

6.10.1 Determinación de los valores de la demanda química de oxígeno (D.Q.O.)

Se determinó por el método fotométrico con bicromato potásico, este método se basa en la oxidación de la materia utilizando bicromato potásico como oxidante en presencia de ácido sulfúrico e iones de plata como catalizador. Esta solución se calienta a 150 °C durante 2 horas, luego con la ayuda de un espectrofotómetro se calcula la oxidación ocurrida midiendo en base al color, la cantidad de bicromato potásico reducido a ion cromo III (Cr+3) y la resta entre la cantidad final y la inicial de bicromato, nos dice la cantidad de oxígeno requerido para oxidar los materiales difícilmente biodegradable.

6.10.2 Determinación de los valores de la demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O₅.)

Esta variable se determinó mediante el método OxiTop, este consiste en disolver 5 gramos de allil-tiourea en un litro de agua destilada, luego se colocan 20 gotas de la solución en un litro de muestra, se agregan 2 perlas de hidróxido de sodio (sosa caustica) y se llena con esta solución un biómetro con su respectivo tapón registrador de lecturas y se coloca en 0, luego se coloca el biómetro en una cámara a 25 °C y se

enciende el agitador magnético, esto creará una reacción que producirá dióxido de carbono (CO_2) y se creará una presión dentro del biómetro la cual se irá registrando durante un lapso de 5 días hasta obtener el resultado final, en algunos casos se realiza una lectura diaria y en otros casos una sola lectura al final de los 5 días, dependiendo del tipo de biómetro.

6.10.3 Determinación de valores de los sólidos sedimentables (S.S.)

Se determinó por gravedad, haciendo uso de conos imhoff donde se agrega un litro de muestra y después de 2 horas se determina la cantidad de sólidos que se han precipitado, para luego realizar la lectura en mililitros de sólidos sedimentados.

6.10.4 Determinación de valores de sólidos totales (S.T.)

Es la sumatoria de los sólidos sedimentables y sólidos totales disueltos.

6.10.5 Determinación de valores de sólidos totales disueltos (S.T.D.)

Se determinó por gravedad, haciendo uso de conos imhoff para sedimentar los sólidos, luego se realiza un filtrado en un filtro de fibra de vidrio y se realiza una evaporación del agua filtrada en un horno entre 103 a 105 °C, luego se pesa la cantidad de sólidos obtenidos dentro del recipiente y se expresa en miligramos por un litro de muestra.

6.10.6 Determinación de valores de sólidos totales en suspensión (S.T.S.)

Se determinan mediante la separación de sólidos en un filtro y se determina la materia retenida en el filtro mediante diferencia de peso, es decir descontando el peso del filtro.

6.10.7 Determinación del valor de potencial hidrogénico (pH)

Se determinó la lectura mediante un potenciómetro, para esto primero se realiza la calibración del potenciómetro con una solución ácida y una alcalina, por último se utiliza

agua destilada para regular el pH a 7 (neutro) y se realizan las lecturas del agua a analizar.

6.10.8 Determinación del valor de nitrógeno total (N)

Se realizó mediante el método fotométrico, que consiste en realizar una corrección mediante dos mediciones con el espectrofotómetro, una a 220 nanómetros y la otra a 275 nanómetros, estas dos mediciones se comparan con un blanco de agua. Si el valor corregido es mayor a 10% de la lectura realizada a 220 nanómetros, debe utilizarse otro método para la medición, el valor es expresado en miligramos por litro (mg/L).

6.10.9 Determinación del valor de fósforo total (P)

Para la determinación de la concentración de fósforo, primero se debe convertir el fósforo puro en ortofosfato disuelto, luego se analiza por el método espectrofotométrico utilizando el método del azul de molibdeno y como reductor el ácido ascórbico, además se utilizan reactivos como: una solución indicadora de fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$) al 0.1%, ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 96%, solución de tartrato de antimonio y potasio, solución de molibdato de amonio, solución de ácido ascórbico. De esta manera y utilizando los distintos reactivos, se determinan las diferentes formas del fósforo, fósforo reactivo total, fósforo reactivo disuelto, fósforo hidrolizable por ácido disuelto y fósforo disuelto total.

6.11. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se realizó un análisis estadístico de la varianza y se realizaron pruebas de Tukey, para lo cual se utilizó el paquete de diseños experimentales de la facultad de agronomía de la Universidad de Nuevo León, México.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

7.1.1 Análisis de varianza

7.1.1.1 Análisis de varianza de la variable potencial de hidrógeno (pH)

Cuadro 8. Resumen de análisis de varianza para la variable potencial de hidrógeno (pH)

Fuente de Variación	Sumatoria de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	"F" Calculada	Significancia	"F" Tabulada	
						0.05	0.01
Factor A (Proporc.)	1.3107	3	0.4369	10.1295	**	2.80	4.22
Factor B (Tiempo)	0.1531	2	0.0765	1.7746	NS	3.19	5.08
Factor Ax B	0.4036	6	0.0673	1.5595	NS	2.29	3.21
Error	1.5527	36	0.0431				
Total	3.4200	47					

Elaboración propia

NS= No existe diferencia significativa

*= Existe diferencia estadística significativa

**= Existe diferencia estadística altamente significativa

Coefficiente de Variación: 4.11%

Según el cuadro 8, el análisis estadístico reporta diferencia estadística altamente significativa para el factor A, que corresponde a las proporciones de mezcla de pulpa y agua miel; mientras que para el factor B, que representa el tiempo y la interacción entre los factores A y B no existe diferencia estadística significativa. El coeficiente de variación para esta variable fue de 4.11%, índice que refleja un adecuado manejo del estudio para esta variable.

Cuadro 9. Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos, para la variable potencial de hidrógeno (pH)

Tratamiento	Descripción	pH	Significancia al 1%
11	75% pulpa 25% agua miel, con 40 días de retención	5.43	A
9	40% pulpa 60% agua miel, con 40 días de retención	5.2	A
10	50% pulpa 50% agua miel, con 40 días de retención	5.18	AB
5	40% pulpa 60% agua miel, con 30 días de retención	5.18	AB
7	75% pulpa 25% agua miel, con 30 días de retención	5.15	AB
12	60% pulpa 40% agua miel, con 40 días de retención	5.15	AB
6	50% pulpa 50% agua miel, con 30 días de retención	5.08	ABC
8	60% pulpa 40% agua miel, con 30 días de retención	5.03	ABC
2	50% pulpa 50% agua miel, con 20 días de retención	4.83	BCD
3	75% pulpa 25% agua miel, con 20 días de retención	4.8	BCD
4	60% pulpa 40% agua miel, con 20 días de retención	4.8	BCD
1	40% pulpa 60% agua miel, con 20 días de retención	4.78	BCD

Elaboración propia

En el cuadro 9 de prueba de comparación de medias para la variable de potencial de hidrógeno (pH), se observan 4 grupos homogéneos, el primer grupo lo comprenden los tratamientos 11 y 9, en el segundo están los tratamientos 10,5,7 y 12; el tercero está comprendido por los tratamientos 6 y 8, y finalmente el cuarto grupo formado por los tratamientos 2,3,4 y 1.

Estadísticamente los tres primeros grupos presentan similitud, los grupos 1 y 2 muestran significancia al nivel del 5% y 1% sobre el grupo 4 formado por los tratamientos 2,3,4 y 1.

Para el caso del potencial de hidrógeno (pH) el mejor tratamiento fue el 11, que corresponde a la proporción 75% pulpa y 25% agua miel, con retención hídrica de 40 días, obteniendo un valor de 5.43; se observa que a mayor tiempo de residencia hídrica se reporta un incremento en el pH, esto puede deberse a que la etapa de hidrólisis y acidificación por efecto de la misma fermentación anaeróbica logran desarrollarse en su plenitud con el paso del tiempo, pasando a un pH más estable.

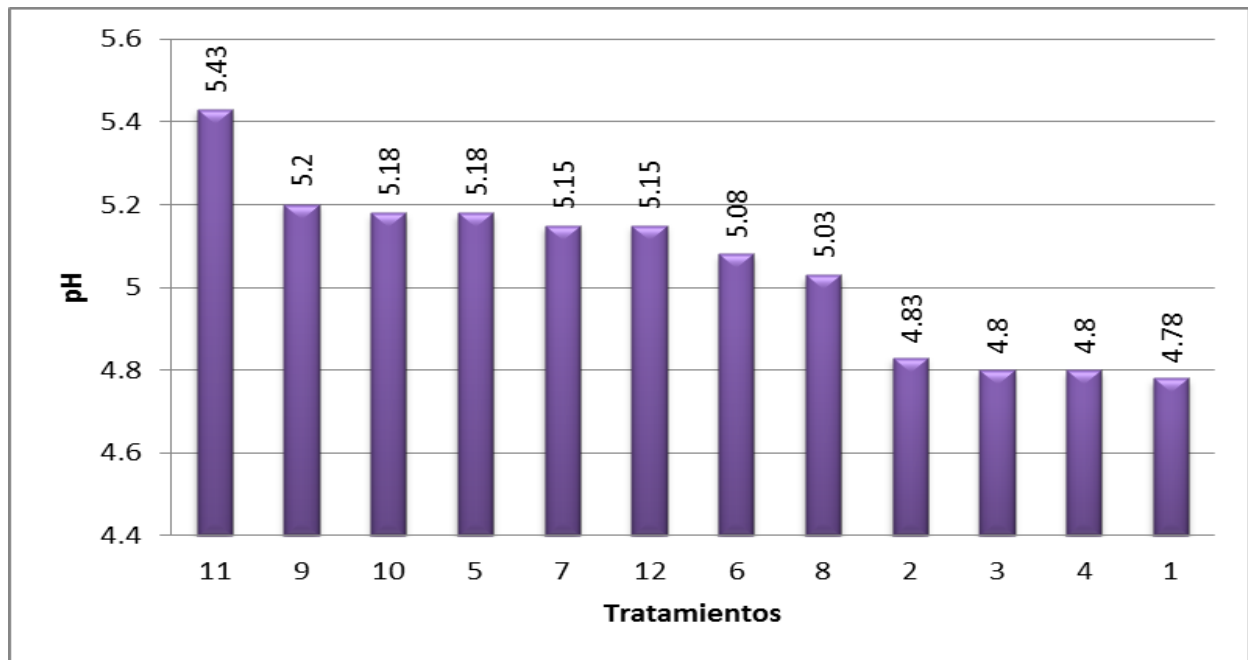


Figura 2. Comportamiento de los tratamientos en la variable de pH

Elaboración propia

7.1.1.2 Análisis de varianza de la variable sólidos totales (S.T.)

Cuadro 10. Resumen de análisis de varianza para la variable sólidos totales (S.T.)

Fuente de Variación	Sumatoria de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	"F" Calculada	Significancia	"F" Tabulada	
						0.05	0.01
Factor A (Proporc.)	14735616.00	3	4911872.00	2.5486	NS	2.80	4.22
Factor B (Tiempo)	1854976.000	2	927488.000	0.4812	NS	3.19	5.08
Factor AxB	4417536.000	6	736256.000	0.3820	NS	2.29	3.21
Error	69383168.00	36	1927310.22				
Total	90391296.00	47					

NS= No existe diferencia significativa

*= Existe diferencia estadística significativa

**= Existe diferencia estadística altamente significativa

Coefficiente de Variación: 20.87%

Elaboración propia

En el cuadro 10 de análisis de varianza para la variable de sólidos totales, no se reportó diferencia significativa para ninguno de los factores, ni para la interacción de los mismos. Durante el proceso de digestión anaeróbica se van eliminando algunos sólidos que son fácilmente biodegradables, mientras que con el paso del tiempo se liberan otro tipo de sólidos por efecto de la hidrólisis, especialmente pueden desprenderse algunas fibras de la pulpa las cuales deben pasar por todo el proceso de hidrólisis, hasta convertirse en un material degradable por las bacterias. El coeficiente de variación para esta variable fue de 20.82%

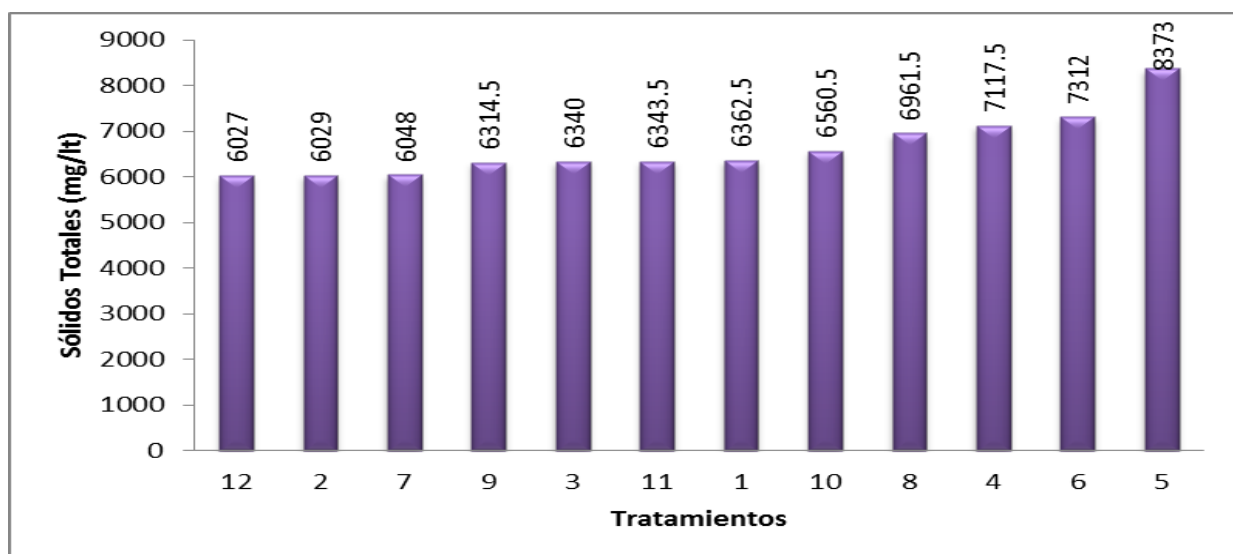


Figura 3. Comportamiento de los tratamientos en la variable de sólidos totales

Elaboración propia

7.1.1.3 Análisis de varianza de la variable sólidos totales en suspensión (S.T.S.)

Cuadro 11. Resumen de análisis de varianza para la variable sólidos totales en suspensión (S.T.S.)

Fuente de Variación	Sumatoria de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	"F" Calculada	Significancia	"F" Tabulada	
						0.05	0.01
Factor A (Proporc.)	19127056	3	6375685.3	4.1958	*	2.80	4.22
Factor B (Tiempo)	7743856.	2	3871928.0	2.5481	NS	3.19	5.08
Factor AxB	18737776	6	3122962.6	2.0552	NS	2.29	3.21
Error	54703680	36	1519546.6				
Total	10031236	47					
	8.00						

NS= No existe diferencia significativa

*= Existe diferencia estadística significativa

**= Existe diferencia estadística altamente significativa

Coeficiente de Variación: 56.08%

Elaboración propia

En el cuadro 11 de análisis de varianza para la variable de sólidos totales en suspensión, se observa que existe diferencia estadística significativa para el factor A, de proporciones de mezcla de pulpa y agua miel, solo al nivel del 5%, mientras que para el factor B, de tiempos de retención hídrica y para la interacción de los factores; se observa que no hubo diferencia significativa. El coeficiente de variación en el análisis de esta variable fue de 56.08%

Cuadro 12. Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos, para la variable sólidos totales en suspensión (S.T.S.)

Trata- miento	Descripción	S.T.S	Significancia 1%
7	75% pulpa 25% agua miel, con 30 días de retención hídrica	1266	A
4	60% pulpa 40% agua miel, con 20 días de retención hídrica	1516	AB
2	50% pulpa 50% agua miel, con 20 días de retención hídrica	1609	AB
11	75% pulpa 25% agua miel, con 40 días de retención hídrica	1678	AB
3	75% pulpa 25% agua miel, con 20 días de retención hídrica	1745	AB
12	60% pulpa 40% agua miel, con 40 días de retención hídrica	1787	AB
1	40% pulpa 60% agua miel, con 20 días de retención hídrica	1838	B
9	40% pulpa 60% agua miel, con 40 días de retención hídrica	1889	B
10	50% pulpa 50% agua miel, con 40 días de retención hídrica	2149	B
8	60% pulpa 40% agua miel, con 30 días de retención hídrica	2555	B
6	50% pulpa 50% agua miel, con 30 días de retención hídrica	3483	BC
5	40% pulpa 60% agua miel, con 30 días de retención hídrica	4857	C

Elaboración propia

En el cuadro 12 donde se reporta la prueba de comparación de medias en la variable de sólidos totales en suspensión, se observan 5 grupos, el primer grupo lo comprende el tratamiento 7, el segundo grupo está comprendido por los tratamientos 4,2,11,3 y 12; el tercer grupo está comprendido por los tratamientos 1,9,10 y 8; el grupo cuatro lo conforma únicamente el tratamiento 6, por último se encuentra el grupo cinco conformado por el tratamiento 5.

Los tratamientos con menor proporción de agua miel en la mezcla, reportan una menor concentración de sólidos totales en suspensión debido a que es precisamente en el agua donde se ubican los sólidos en suspensión. Para esta variable el mejor tratamiento fue el 7, que corresponde a la proporción 75/25 de pulpa y agua miel, respectivamente y al tiempo de retención hídrica de 20 días, el valor obtenido fue de 1,266 miligramos por litro.

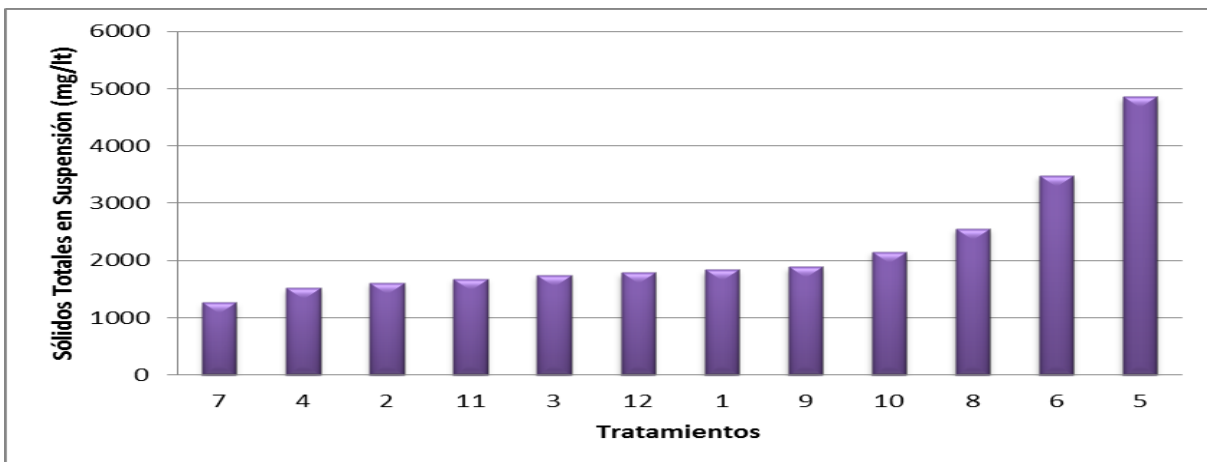


Figura 4. Comportamiento de los tratamientos en la variable de sólidos totales en suspensión

Elaboración propia

7.1.1.4 Análisis de varianza de la variable sólidos totales disueltos (S.T.D.)

Cuadro 13. Resumen de análisis de varianza para la variable Sólidos totales disueltos (S.T.D.)

Fuente de Variación	Sumatoria de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	"F" Calculada	Significancia	"F" Tabulada	
						0.05	0.01
Factor A (Proporc.)	883072.000	3	294357.3	0.2803	NS	2.802	4.22
Factor B (Tiempo)	3072512.00	2	1536256.00	1.4631	NS	3.195	5.08
Factor AxB	7980032.00	6	1330005.33	1.2666	NS	2.299	3.21
Error	37800960.0	36	1050026.66				
Total	49736576.0	47					

NS= No existe diferencia significativa

*= Existe diferencia estadística significativa

**= Existe diferencia estadística altamente significativa

Coefficiente de Variación: 22.81%

Elaboración propia

En el cuadro 13 para el análisis de varianza, de la variable de sólidos totales disueltos, se observa que no existe diferencia significativa para ningún factor, ni para la interacción de los mismos. Esto puede deberse a la misma acción de la hidrólisis que hace que se desprendan sólidos durante esta fase, incrementando o manteniendo las concentraciones cercanos a los niveles iniciales. El coeficiente de variación en el análisis de esta variable fue de 22.81%

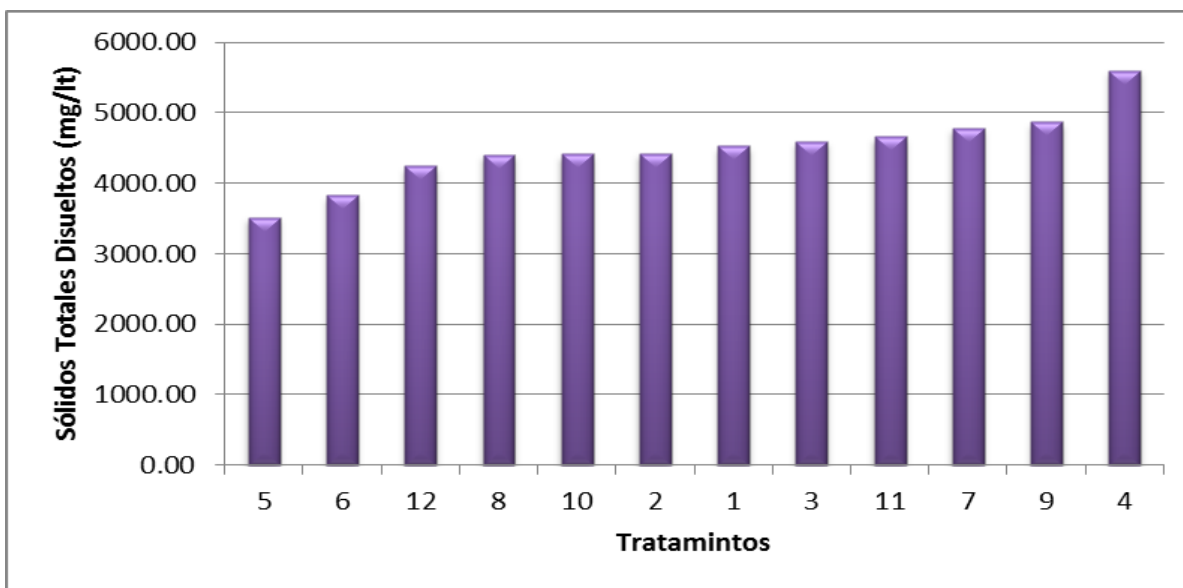


Figura 5. Comportamiento de los tratamientos en la variable de sólidos totales disueltos
Elaboración propia

7.1.1.5 Análisis de varianza de la variable demanda química de oxígeno (D.Q.O.)

Cuadro 14. Resumen de análisis de varianza para la variable demanda química de Oxígeno (D.Q.O.)

Fuente de Variación	Sumatoria de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	"F" Calculada	Significancia	"F" Tabulada	
						0.05	0.01
Factor A (Proporc.)	69298176	3	23099392.0	14.6388	**	2.802	4.22
Factor B (Tiempo)	83704320	2	4185216.0	2.6523	NS	3.195	5.08
Factor AxB	37157120	6	6192853.33	3.9246	**	2.299	3.21
Error	56806400	36	1577955.55				
Total	171632128	47					

NS= No existe diferencia significativa

*= Existe diferencia estadística significativa

**= Existe diferencia estadística altamente significativa

Coeficiente de Variación: 18.76%

Elaboración propia

En el cuadro 14 donde se reporta el análisis de varianza para la variable de demanda química de oxígeno, se observa que existe diferencia estadística altamente significativa para el factor A, correspondiente a proporciones de mezcla de pulpa y agua miel. Mientras que para el factor B, de tiempos de retención hídrica, no existe diferencia significativa, también se observa diferencia estadística altamente significativa en la interacción de los dos factores. El coeficiente de variación en el análisis de esta variable fue de 18.76%

Cuadro 15. Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos, para la variable demanda química de oxígeno (D.Q.O.)

Tratamiento	Descripción	D.Q.O.	Significancia 1%
5	40% pulpa 60% agua miel, con 30 días de retención hídrica	4051.25	A
8	60% pulpa 40% agua miel, con 30 días de retención hídrica	4938.75	AB
7	75% pulpa 25% agua miel, con 30 días de retención hídrica	4950	AB
6	50% pulpa 50% agua miel, con 30 días de retención hídrica	5688.75	ABC
9	40% pulpa 60% agua miel, con 40 días de retención hídrica	6472.5	ABC
2	50% pulpa 50% agua miel, con 20 días de retención hídrica	6627.5	ABC
12	60% pulpa 40% agua miel, con 40 días de retención hídrica	6636.25	ABC
4	60% pulpa 40% agua miel, con 20 días de retención hídrica	6960	ABC
3	75% pulpa 25% agua miel, con 20 días de retención hídrica	7645	ABC
1	40% pulpa 60% agua miel, con 20 días de retención hídrica	8522.5	BC
10	50% pulpa 50% agua miel, con 40 días de retención hídrica	8538.75	BC
11	75% pulpa 25% agua miel, con 40 días de retención hídrica	9303.75	C

Elaboración propia

Para el cuadro 15 de prueba de comparación de medias de la variable demanda química de oxígeno (D.Q.O.), se observan 5 grupos, el primer grupo lo comprende el tratamiento 5, el segundo grupo está comprendido por los tratamientos 8 y 7; el tercer grupo está comprendido por los tratamientos 6,9,2,12,4 y 3; mientras que el cuarto grupo está compuesto por los tratamientos 1 y 10, el último grupo lo forma el tratamiento 11.

Para esta variable el mejor tratamiento fue el 5, que corresponde a la proporción 40% pulpa y 60% agua miel, con 20 días de retención hídrica, el valor obtenido fue de 4,051.25 miligramos por litro. En general se puede observar que los tratamientos sometidos a 30 días de retención hídrica, obtuvieron los mejores resultados en reducción de la demanda química de oxígeno, esto puede deberse a la posible precipitación de sólidos difícilmente biodegradables, con dicho tiempo de retención hídrica.

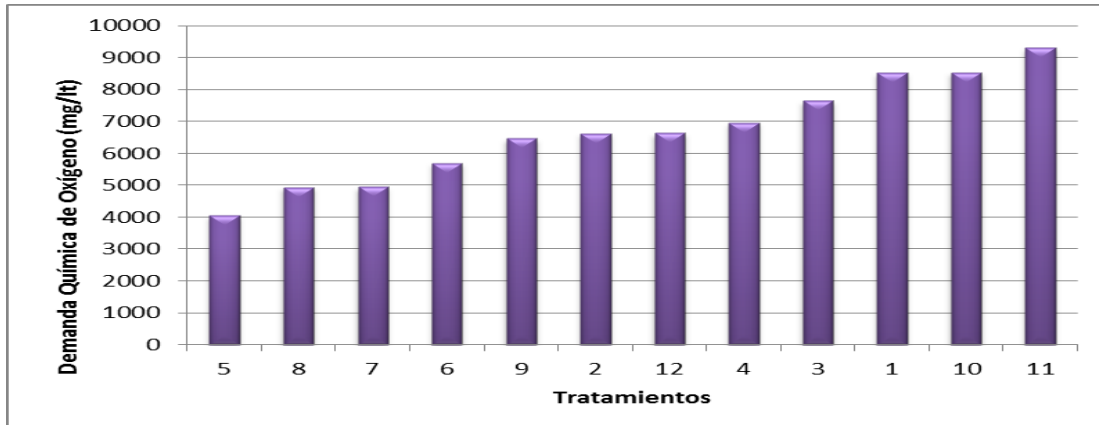


Figura 6. Comportamiento de los tratamientos en la variable de demanda química de oxígeno (D.Q.O.)

Elaboración propia

7.1.1.6 Análisis de varianza de la variable demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.)

Cuadro 16. Resumen de análisis de varianza para la variable demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.)

Fuente de Variación	Sumatoria de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	"F" Calculada	Significancia	"F" Tabulada	
						0.05	0.01
Factor A (Proporc.)	29750016.00	3	9916672.00	5.8912	**	2.802	4.228
Factor B (Tiempo)	15078272.00	2	7539136.00	4.4788	*	3.195	5.087
Factor AxB	14102016.00	6	2350336.00	1.3963	NS	2.299	3.213
Error	60598656.00	36	1683296.00				
Total	119528960.00	47					

Elaboración propia

NS= No existe diferencia significativa

*= Existe diferencia estadística significativa

**= Existe diferencia estadística altamente significativa

Coefficiente de Variación: 22.19%

En el cuadro 16 se análisis de varianza para la variable de demanda bioquímica de oxígeno, se observa que existe diferencia estadística altamente significativa únicamente para el factor A, que corresponde a proporciones de mezcla de pulpa y agua miel. Estadísticamente no se encontraron diferencias para el factor B, ni para la interacción AxB; el coeficiente de variación en el análisis de esta variable fue de 22.19%

Cuadro 17. Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos, para la variable demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.₅)

Tratamiento	Descripción	D.B.O. ₅	Significancia 1%
5	40% pulpa 60% agua miel, con 30 días de retención hídrica	3985	A
8	60% pulpa 40% agua miel, con 30 días de retención hídrica	4655	A
7	75% pulpa 25% agua miel, con 30 días de retención hídrica	4657.5	AB
6	50% pulpa 50% agua miel, con 30 días de retención hídrica	4992.5	AB
11	40% pulpa 60% agua miel, con 40 días de retención hídrica	5427.5	AB
9	50% pulpa 50% agua miel, con 20 días de retención hídrica	5447.5	AB
12	60% pulpa 40% agua miel, con 40 días de retención hídrica	6045	AB
2	60% pulpa 40% agua miel, con 20 días de retención hídrica	6507.5	AB
10	75% pulpa 25% agua miel, con 20 días de retención hídrica	6557.5	AB
3	40% pulpa 60% agua miel, con 20 días de retención hídrica	7015	AB
4	50% pulpa 50% agua miel, con 40 días de retención hídrica	7270	AB
1	75% pulpa 25% agua miel, con 40 días de retención hídrica	7577.5	B

Elaboración propia

En el cuadro 17 de la prueba de comparación de medias de la variable demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.₅), se observan 3 grupos, el primer grupo lo comprende los tratamientos 5 y 8, el segundo grupo está comprendido por los tratamientos 7,6,11,9,12,2,10,3, y 4; el tercer grupo está comprendido únicamente por el tratamiento 1. Para esta variable el mejor tratamiento fue el 5, que corresponde a la proporción 40/60 de pulpa y agua miel, respectivamente, con 30 días de retención hídrica, el valor obtenido fue de 3,985 miligramos por litro. Al igual que para el caso de la demanda química de oxígeno se puede observar que los tratamientos sometidos a 30 días de retención hídrica, obtuvieron los mejores resultados en reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, esto puede deberse a la reacción de hidrólisis durante los primeros 20 días y a la acción de las bacterias para absorber la materia orgánica fácilmente biodegradable, durante la etapa de metanogénesis.

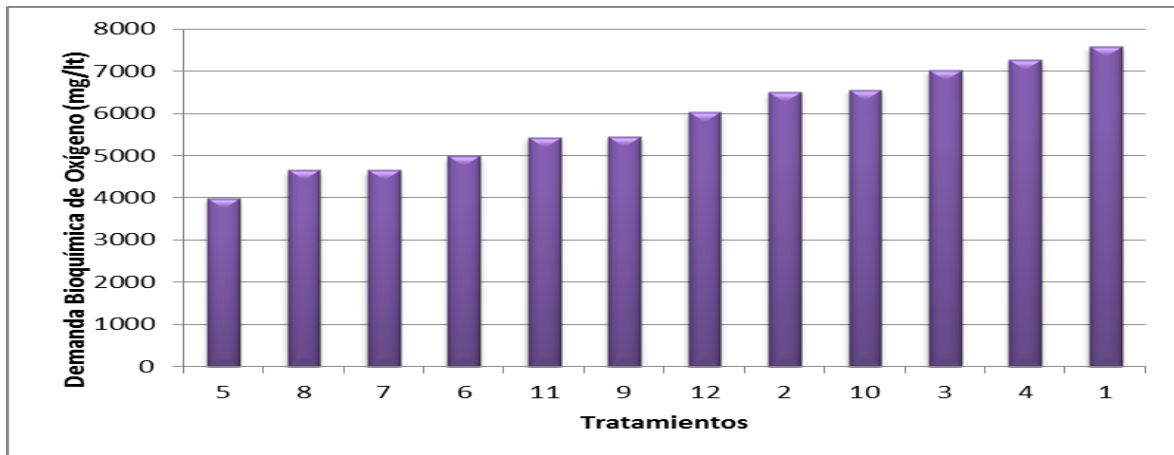


Figura 7. Comportamiento de los tratamientos en la variable de demanda bioquímica de oxígeno.

Elaboración propia

7.1.1.7 Análisis de varianza de la variable nitrógeno total

Cuadro 18. Resumen de Análisis de Varianza para la variable nitrógeno total

Fuente de Variación	Sumatoria de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadros Medios	"F" Calculada	Significancia	"F" Tabulada	
						0.05	0.01
Factor A (Proporc.)	2373.00	3	791.00	0.3378	NS	2.80	4.22
Factor B (Tiempo)	3445.75	2	1722.8	0.7357	NS	3.19	5.08
Factor AxB	37132.2	6	6188.7	2.6426	*	2.29	3.21
Error	84307.7	36	2341.8			9	3
Total	127258	47					

NS= No existe diferencia significativa

*= Existe diferencia estadística significativa

**= Existe diferencia estadística altamente significativa

Coefficiente de Variación: 22.75%

Elaboración propia

En el cuadro 18 de análisis de varianza para la variable de nitrógeno total, no se observa diferencia estadística al nivel del 1%, para ninguno de los factores A y B, ni para la interacción AxB. El coeficiente de variación en el análisis de esta variable fue de 22.75%

Los valores se encontraron en el rango de 168.88 a 267.75 miligramos por litro, comparándolos con los valores iniciales, se nota una reducción del 77 al 90%, durante la etapa de metanogénesis debe existir una adecuada relación carbono/nitrógeno, ya que estos elementos juegan un papel importante en la formación de metano, las bacterias utilizan nitritos y nitratos como aceptores finales de electrones en los procesos anaeróbicos.

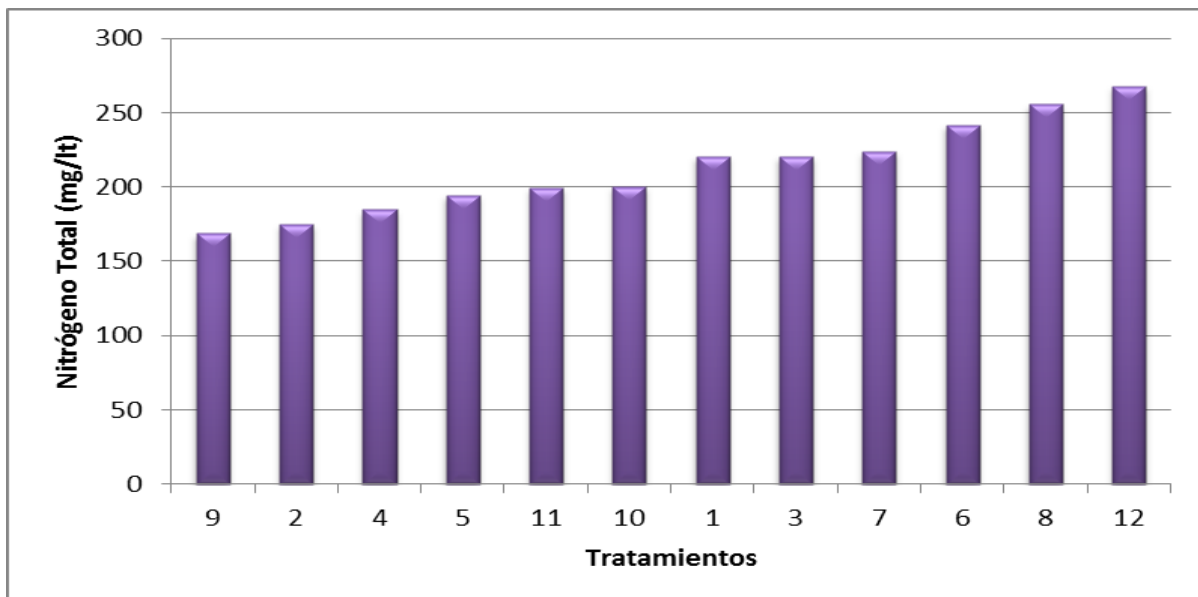


Figura 8. Comportamiento de los tratamientos en la variable nitrógeno total

Elaboración propia

7.1.1.8 Análisis de varianza de la variable fósforo total

Cuadro 19. Resumen de análisis de varianza para la variable fósforo total

Fuente de Variación	Sumatoria de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadros Medios	"F" Calculada	Significancia	"F" Tabulada	
						0.05	0.01
Factor A (Proporc.)	6006.140	3	2002.04	5.5382	**	2.80	4.22
Factor B (Tiempo)	268.4063	2	134.203	0.3712	NS	3.19	5.08
Factor Ax B	9014.656	6	1502.44	4.1562	**	2.29	3.21
Error	13013.81	36	361.494				
Total	28303.01	47					

NS= No existe diferencia significativa

*= Existe diferencia estadística significativa

**= Existe diferencia estadística altamente significativa

Coefficiente de Variación: 31.54%

Elaboración propia

En el cuadro 19 donde se reporta el análisis de varianza para la variable de fósforo total, se observa que existe diferencia estadística altamente significativa para el factor A, de proporciones de mezcla de pulpa y agua miel, además se observa diferencia estadística altamente significativa para la interacción de los factores A y B; mientras que para el factor B, de tiempos de retención hídrica, no se observa diferencia significativa. El coeficiente de variación en el análisis de esta variable fue de 31.54%

Cuadro 20. Prueba de tukey para comprobar las diferencias estadísticas entre los tratamientos, para la variable fósforo total (P)

Tratamiento	Descripción	P	Significancia 1%
4	60% pulpa 40% agua miel, con 20 días de retención hídrica	35.21	A
2	50% pulpa 50% agua miel, con 20 días de retención hídrica	44.17	AB
3	75% pulpa 25% agua miel, con 20 días de retención hídrica	47.42	AB
7	75% pulpa 25% agua miel, con 30 días de retención hídrica	47.71	AB
5	40% pulpa 60% agua miel, con 30 días de retención hídrica	58.05	AB
1	40% pulpa 60% agua miel, con 20 días de retención hídrica	59.28	AB
8	60% pulpa 40% agua miel, con 30 días de retención hídrica	60.68	AB
9	40% pulpa 60% agua miel, con 40 días de retención hídrica	61.76	AB
12	60% pulpa 40% agua miel, con 40 días de retención hídrica	62.03	B
11	75% pulpa 25% agua miel, con 40 días de retención hídrica	65.98	B
6	50% pulpa 50% agua miel, con 30 días de retención hídrica	71.47	B
10	50% pulpa 50% agua miel, con 40 días de retención hídrica	109.69	B

Elaboración propia

Para el caso del cuadro 20 de la prueba de comparación de medias de la variable fósforo total, se observan 3 grupos, el primer grupo lo comprende el tratamiento 4, el segundo grupo está comprendido por los tratamientos 2,3,7,5,1,8 y 9; el tercer grupo está comprendido por los tratamientos 12,11,6 y 10. Para esta variable el mejor tratamiento fue el 4, que corresponde a la proporción 60/40 de pulpa y agua miel, respectivamente, con 20 días de retención hídrica, el valor obtenido fue de 35.22 miligramos por litro.

La reducción del fósforo en el tiempo de 20 días puede deberse a que forma parte de la energía utilizada por las bacterias para degradar la materia orgánica, se puede decir que a los 20 días de retención hídrica las bacterias aún estaban en fase de estabilización y activación por lo que requirieron cantidades considerables de fósforo para su reproducción.

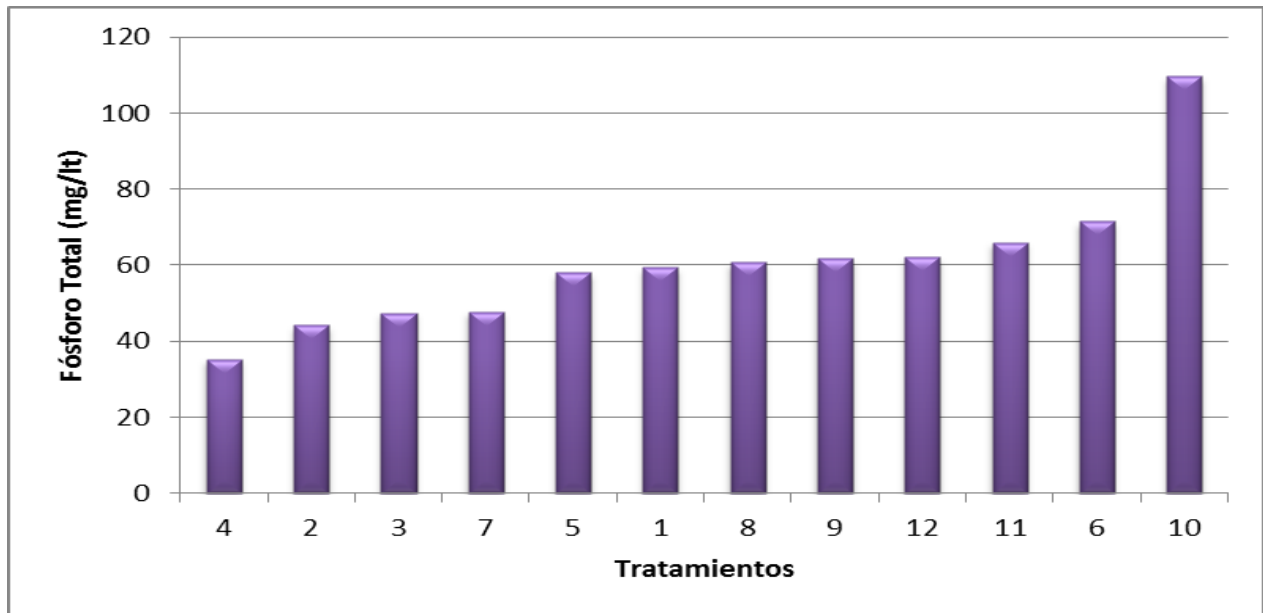


Figura 9. Comportamiento de los tratamientos en la variable fósforo total

Elaboración propia

Cuadro 21. Resumen de significancias

Variable	Factor	F calculada	Significancia	F tabulada		Coeficiente de variación
				0.05	0.01	
pH	A	10.12947	**	2.8	4.22	4.11%
	B	1.7745656	NS	3.19	5.08	
	AXB	1.5594667	NS	2.29	3.21	
Sólidos Totales	A	2.5485632	NS	2.8	4.22	20.87%
	B	0.4812344	NS	3.19	5.08	
	AXB	0.3820122	NS	2.29	3.21	
Sólidos Totales en Suspensión	A	4.1957812	**	2.8	4.22	56.08%
	B	2.548081	NS	3.19	5.08	
	AXB	2.0551937	NS	2.29	3.21	
Sólidos Totales Disueltos	A	0.2803332	NS	2.8	4.22	22.81%
	B	1.4630638	NS	3.19	5.08	
	AXB	1.2666396	NS	2.29	3.21	
Demanda Química de Oxígeno	A	14.63881	**	2.8	4.22	18.76%
	B	2.6523028	NS	3.19	5.08	
	AXB	3.9246057	**	2.29	3.21	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	A	5.8912229	**	2.8	4.22	22.19%
	B	4.478794	*	3.19	5.08	
	AXB	1.3962702	NS	2.29	3.21	
Nitrógeno total	A	0.3377625	NS	2.8	4.22	22.75%
	B	0.7356797	NS	3.19	5.08	
	AXB	2.6426218	*	2.29	3.21	
Fósforo total	A	5.5382454	**	2.8	4.22	31.54%
	B	0.371245	NS	3.19	5.08	
	AXB	4.1561946	**	2.29	3.21	

FACTOR

A	PROPORCIÓN
B	TIEMPO
AxB	INTERACCIÓN

** Existe diferencia estadística altamente significativa

* Existe diferencia estadística significativa

NS No existe significancia

Elaboración propia

En el cuadro 21 se muestra un resumen de los resultados en cuanto a la obtención de significancia en las diferentes variables, observándose diferencia estadística altamente significativa para las variables pH, sólidos totales en suspensión, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno y fósforo total, en todos estos casos la

diferencia estadística altamente significativa se obtuvo para el factor A, que corresponde a las proporciones de mezcla en base a volumen, de pulpa y agua miel; a excepción de la demanda química de oxígeno y de fósforo total, que además de obtener diferencia estadística altamente significativa para el factor A, también se obtuvo en la interacción de los factores (AxB). La reducción de concentración en los parámetros de sólidos totales en suspensión, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, fósforo total y el incremento del potencial de hidrógeno, está estrechamente relacionada con las proporciones de mezcla en base a volumen, de pulpa y agua miel de café.

Se obtuvo diferencia estadística significativa para el factor B que corresponde al tiempo de retención hídrica, en la variable demanda bioquímica de oxígeno y para la interacción de factores AxB, en la variable nitrógeno total. En el resto de variables y factores no se encontró significancia.

Cuadro 22. Resumen de concentraciones obtenidas antes y después del tratamiento

Proporción	Tratamiento	pH	S.T.	S.T.S.	S.T.D.	DQO	DBO	N TOTAL	P TOTAL
40/60	Sin tratamiento	4.49	32,518.00	28,234.00	4,284.00	44,400.00	24,000.00	980.00	61.20
50/50	Sin tratamiento	4.4	81,824.00	79,810.00	2,014.00	35,520.00	28,000.00	1,925.00	95.20
75/25	Sin tratamiento	4.49	83,678.00	81,048.00	2,630.00	34,440.00	29,000.00	1,120.00	93.80
60/40	Sin tratamiento	4.55	76,912.00	74,860.00	2,052.00	57,750.00	17,000.00	1,365.00	92.40
40/60	T1	4.78	6,362.50	1,838.50	4,524.00	8,522.50	7,577.50	220.50	59.29
50/50	T2	4.83	6,029.00	1,609.50	4,419.50	6,627.50	6,507.50	175.00	44.17
75/25	T3	4.80	6,340.00	1,745.50	4,594.50	7,645.00	7,015.00	220.50	47.42
60/40	T4	4.80	7,117.50	1,516.00	5,601.50	6,960.00	7,270.00	184.63	35.22
40/60	T5	5.18	8,373.00	4,857.50	3,515.50	4,051.25	3,985.00	194.25	58.06
50/50	T6	5.08	7,312.00	3,483.00	3,829.00	5,688.75	4,992.50	241.50	71.48
75/25	T7	5.15	6,048.00	1,266.00	4,782.00	4,950.00	4,657.50	224.00	47.71
60/40	T8	5.03	6,961.50	2,555.00	4,406.50	4,938.75	4,655.00	255.50	60.69
40/60	T9	5.20	6,314.50	1,889.50	4,873.50	6,472.50	5,447.50	168.88	61.77
50/50	T10	5.18	6,560.50	2,149.00	4,411.50	8,538.75	6,557.50	200.38	109.70
75/25	T11	5.43	6,343.50	1,678.00	4,665.50	9,303.75	5,427.50	199.50	65.98
60/40	T12	5.15	6,027.00	1,787.50	4,239.50	6,636.25	6,045.00	267.75	62.03
20 días	30 días	40 días							

Elaboración propia

En el cuadro 22, se observa un resumen de las concentraciones obtenidas antes y después del tratamiento, en cada una de las variables; las concentraciones con color rojo son las que reportaron menor concentración después del tratamiento, sin embargo no por eso fueron los mejores tratamientos, ya que se realizó un análisis en base a la eficiencia en reducción de la concentración, para lo cual se tomó de base la concentración de cada mezcla de proporciones de pulpa y agua miel, sin tratamiento y se comparó contra cada mezcla de proporciones de pulpa y agua miel a los 20, 30 y 40 días de retención hídrica.

Cuadro 23. Resumen de eficiencias obtenidas después del tratamiento

Proporción	Tratamiento			pH	S.T.	S.T.S.	S.T.D.	DQO	DBO	N TOTAL	P TOTAL
	20 días	30 días	40 días								
40/60	T1			6.35%	80.43%	93.49%	-5.60%	80.81%	68.43%	77.50%	3.13%
50/50	T2			9.66%	92.63%	97.98%	-119.44%	81.34%	76.76%	90.91%	53.60%
75/25	T3			6.90%	92.42%	97.85%	-74.70%	77.80%	75.81%	80.31%	49.45%
60/40	T4			5.49%	90.75%	97.97%	-172.98%	87.95%	57.24%	86.47%	61.89%
40/60	T5			15.26%	74.25%	82.80%	17.94%	90.88%	83.40%	80.18%	5.14%
50/50	T6			15.34%	91.06%	95.64%	-90.12%	83.98%	82.17%	87.45%	24.92%
75/25	T7			14.70%	92.77%	98.44%	-81.83%	85.63%	83.94%	80.00%	49.14%
60/40	T8			10.44%	90.95%	96.59%	-114.74%	91.45%	72.62%	81.28%	34.32%
40/60	T9			15.81%	80.58%	93.31%	-13.76%	85.42%	77.30%	82.77%	-0.92%
50/50	T10			17.61%	91.98%	97.31%	-119.04%	75.96%	76.58%	89.59%	-15.23%
75/25	T11			20.82%	92.42%	97.93%	-77.40%	72.99%	81.28%	82.19%	29.66%
60/40	T12			13.19%	92.16%	97.61%	-106.60%	88.51%	64.44%	80.38%	32.87%
20 días	30 días	40 días									

En el cuadro 23, se encuentra el resumen de las eficiencias obtenidas después del tratamiento, las eficiencias escritas con color rojo son las mejores obtenidas en los distintos tratamientos, en general se observan las mejores eficiencias en reducción de nutrientes en los tratamientos sometidos a 20 días, mientras que para las variables sólidos totales, sólidos totales en suspensión, sólidos totales disueltos, demanda química de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno, las mejores eficiencias se obtuvieron en los tratamientos sometidos a 30 días de retención hídrica y únicamente el pH obtuvo la mejor eficiencia a los 40 días de retención hídrica.

VIII. CONCLUSIONES

1. Los tratamientos sometidos a una retención hídrica de 20 días, obtuvieron las mejores eficiencias en reducción de la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo). La mayor eficiencia en reducción de concentración del nitrógeno (N) se obtuvo con el tratamiento 2 (50% pulpa + 50% agua miel, con 20 días de retención hídrica), obteniendo una concentración de 175 miligramos por litro, que representa una eficiencia en reducción de 90.91%.

En el caso del fósforo (P), la mejor eficiencia en reducción se obtuvo en el tratamiento 4 (60% pulpa + 40% agua miel, con 20 días de retención hídrica), con un valor de 61.89% y una concentración de 35.22 miligramos por litro.

2. En los tratamientos sometidos a 30 días de retención hídrica, en el tratamiento 7 (75% pulpa + 25% agua miel, con 30 días de retención hídrica) se obtuvieron las mejores eficiencias en las variables de sólidos totales (S.T.) y sólidos totales en suspensión (S.T.S.), reportando la mejor eficiencia en reducción de sólidos totales (S.T.) con un valor de 92.77% y una concentración de 6,048 miligramos por litro; mientras que para la variable sólidos totales en suspensión (S.T.S.) la mejor eficiencia obtenida fue de 98.44%, con una concentración de 1,266 miligramos por litro.

En cuanto a los sólidos totales disueltos (S.T.D.), la mejor eficiencia se obtuvo en el tratamiento 5 (40% pulpa + 60% agua miel, con 30 días de retención hídrica), con un valor de 17.94% y una concentración de 3,515.50 miligramos por litro, mientras que el resto de tratamientos en esta misma variable, dio una baja eficiencia e incluso negativas, por lo que se infiere que la digestión anaeróbica no contribuyó a la degradación de los sólidos totales disueltos (S.T.D.) y que el incremento de dichos sólidos con el paso del tiempo, pudo deberse a los efectos del proceso de hidrólisis en la pulpa.

Para la demanda química de oxígeno (D.Q.O.) la mejor eficiencia obtenida fue de 91.45%, con una concentración de 4,051.25 miligramos por litro, en el tratamiento 8 (60 % pulpa + 40% agua miel, con 30 días de retención hídrica).

La variable demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.₅) obtuvo la mejor eficiencia en reducción en el tratamiento 7 (75% pulpa + 25% agua miel, con 30 días de retención hídrica) con un 83.94% y una concentración de 4,657.50 miligramos por litro.

3. Los resultados de las muestras sometidas a 40 días de retención hídrica indican que únicamente la variable potencial de hidrógeno (pH), obtuvo el mejor resultado a través del tratamiento 11 (75% pulpa + 25% agua miel, con 40 días de retención hídrica), con un valor de 5.43, incrementando un 20.82% en relación del valor inicial.

IX. RECOMENDACIONES

1. Se sugiere que los beneficios húmedos de café potencialmente ecológicos, con usos de agua entre 80 a 350 litros por cada quintal de café pergamino resultante del proceso agroindustrial, sometan los sub productos (pulpa y agua miel) provenientes de dicho proceso, a tratamiento anaeróbico durante un tiempo de retención hídrica de 30 días.
2. Se sugiere que la disposición final de los efluentes (líquidos y lodos), en los procesos de digestión anaeróbica, se aprovechen como fuente de nutrientes en diversos cultivos.
3. Con el fin de mejorar la eficiencia del tratamiento anaeróbico, se sugiere reposar el inóculo de bacterias por un período de 60 días, previo a iniciar la alimentación de los digestores.
4. Después de regular el pH en las distintas proporciones de mezcla de pulpa y agua miel de café con hidróxido de calcio (cal hidratada), debe realizarse la alimentación a los digestores en un lapso no mayor a 18 horas, ya que a mayor tiempo el hidróxido de calcio empieza a precipitarse y vuelven a acidificarse los fluidos.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albino, R. (1997). *Programa de tratamiento para las aguas residuales del beneficiado de café*. Costa Rica: CICAFFE-ICAFFE. Extraído el 19 de abril de 2010 desde <http://www.infoagro.go.cr/Agricola/tecnologia/cafe97/cafe17.htm>

Asociación Nacional del Café –ANACAFÉ-. (2005). *Manual de Beneficiado Húmedo del Café*. Guatemala.

Bermudez, J.J., Canovas, M., Manjon, A., Iborra, J.L., & Howell, J.A. (1988). *La digestión anaerobia*, 4, 13-16. Extraído el 12 de Julio de 2010 desde http://books.google.com.gt/books?id=dLR2fQTu9fMC&pg=PA13&dq=etapas+de+la+digestion+anaerobia&hl=es&ei=siE7TJ3bCoSBIAeqqbTTBw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2&ved=0CCwQ6AEwAQ#v=onepage&q=etapas%20de%20la%20digestion%20anaerobia&f=false

Castillo, R. (2008). *Usos de la pulpa de café*. Cuba: Universidad de Pinar del Río. Extraído el 22 de Enero de 2010 desde <http://www.monografias.com/trabajos68/usos-pulpa-cafe/usos-pulpa-cafe2.shtml>

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza –CATIE-. (1974). *Primera reunión sobre la utilización de los sub productos del café en la alimentación animal otras aplicaciones agrícolas e industriales*. Costa Rica, CATIE. Extraído el 01 de mayo de 2010 desde <http://books.google.com.gt/books?id=B4PAQAAIAAJ&pg=PA54&dq=tratamiento+de+sub+productos+del+cafe&cd=1#v=onepage&q&f=false>

Chávez, R., Cartolin, R., Villa Nueva, R., & Cervantes W. (2007). *Biodigestores y el protocolo de Kyoto*, 5, 22-26. Extraído el 12 de Julio de 2010 desde

<http://books.google.com.gt/books?id=fonShsklaNEC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Erick, S. (1996). *Valoración económica de la contaminación de las fuentes de agua por los desechos de la industria del beneficiado húmedo del café: El uso de concepto de costo defensivo*. Tesis de Posgrado, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Escuela de Posgrado de Costa Rica. Extraído el 31 de marzo de 2010 desde <http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=GREYLIT.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=010266>

Gobierno de la República de Guatemala. (2006). Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. (Acuerdo Gubernativo No. 236-2006). Guatemala.

Guardia Puebla, Yans. (2012). *Estudio de la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficiado húmedo del café*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura –IICA-. (2010). Guía Técnica para el Beneficiado de Café Protegido Bajo una Indicación Geográfica ó Denominación de Origen. Guatemala.

Lapeña, M. (1990). *Tratamiento de aguas residuales: Aguas de proceso y residuales*. Colombia, MARCOMBO, S.A. Revisado el 03 de Mayo de 2010 desde internet.

http://books.google.com.gt/books?id=fQcXUq9WFC8C&pg=PA32&dq=solidos+totales+en+suspensi%C3%B3n&ei=rnffS_6gKJ-4zASJxKHAcQ&cd=1#v=onepage&q&f=false

Orozco, P. (2003). *Arranque y puesta en marcha de un reactor metanogénico tipo UAF para el tratamiento de las aguas residuales del lavado del café*. Colombia, Universidad Nacional De Colombia.

PROMECAFE, (1992). *Seminario – Taller El tratamiento anaeróbico de los residuos del café: Una alternativa energética para la disminución del impacto ambiental en el sector*. Guatemala, Orton IICA / CATIE. Revisado el 01 de Mayo de 2010 desde Internet. <http://books.google.com.gt/books?id=--YNAQAAlAAJ&pg=PA26&dq=tratamiento+de+residuos+solidos+del+cafe&cd=2#v=onepage&q&f=false>

Ramalho R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. España, Editorial Reverté, S.A. Revisado el 03 de Mayo de 2010 desde internet. <http://books.google.com.gt/books?id=30etGjzPXyWC&pg=PA274&dq=DQO,+DBO&ei=9WrfS9C8CozlyAT87OHbCQ&cd=3#v=onepage&q=DQO%2C%20DBO&f=false>

Romero M. (1985). *Cultivo de café en la costa meridional de Chiapas*. México. BiblioBazaar, LLC. Revisado el 10 de Julio de 2010 desde internet. http://books.google.com.gt/books?id=rIxnFWAV3gAC&pg=RA1-PA149&dq=cosecha+del+fruto+de+cafe+maduro&hl=es&ei=uel4TMKRloKKlwf7xpjVBw&sa=X&oi=book_result&ct=book-thumbnail&resnum=2&ved=0CCwQ6wEwATgK#v=onepage&q&f=false

Salazar, L., Quiroga, R., Castillo, L. & Vega, H. (2013). Diagnóstico del tratamiento de aguas residuales mediante los sistemas Cenicafé y Majavita del beneficio ecológico del café con módulo Becolsub en la Hacienda Majavita. *Revista Innovando en la U.* 5(4), 1-12. Colombia.

Sánchez L. (2012). UTZ Certified desarrolla proyecto de tratamiento de aguas y generación de energía limpia. *Revista el Cascajal. Edición ecológica*. 3-2012, 8-9. Guatemala.

Solares M. (2006). *Certificación de la norma ISO 14000 para una planta de tratamiento de aguas negras*. Guatemala. Revisado el 01 de Julio de 2010 desde internet.
<http://www.docstoc.com/docs/22177373/CERTIFICACION-DE-LA-NORMA-ISO-14000-PARA-UNA-PLANTA>

XI. ANEXOS



Figura 10. Envío de muestras a laboratorio



Figura 11. Alimentación de biodigestores con mezcla de pulpa y agua miel

Orden: 19 - 1142
 Investigador: Roberto Soto PTAR/2011-2012
 Finca: Sin Identificación
 Localización: Patuluj, SUCHITEPÉQUEZ



No.	Identificación	pH		T (°C)		mg/L					ml/l		mg/L	
				T	S.T.	S.T.S.	S.T.D.	D.Q.O.	D.B.O. ₅	S.S.	N total	P total		
6,703	1 Proporción pulpaagua miel 40/60	4.49	32,518.00	14.90	28,234.00	4,284.00	44,400.00	24,000.00	Muestra reapropiada	960.00	61.20			
6,704	4 Proporción pulpaagua miel 75/25	4.55	76,912.00	15.60	74,860.00	2,052.00	57,750.00	17,000.00	Muestra reapropiada	1,925.00	95.20			
6,705	2 Proporción pulpaagua miel 50/50	4.40	81,824.00	15.50	79,810.00	2,014.00	35,520.00	28,000.00	Muestra reapropiada	1,120.00	93.80			
6,706	3 Proporción pulpaagua miel 60/40	4.49	83,678.00	17.20	81,048.00	2,630.00	34,440.00	29,000.00	Muestra reapropiada	1,365.00	92.40			

pH: Potencial de Hidrogeno
 S.T.: Sólidos Totales
 S.T.D.: Sólidos Totales Disueltos
 S.S.: Sólidos Sedimentables
 D.Q.O.: Demanda Química de Oxígeno
 D.B.O.₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno
 S.T.S.: Sólidos Totales en Suspensión
 N total: Nitrogeno Total
 P total: Fostoro Total
 T: Temperatura
 mg/L: Miligramo/Litro
 mL: Mililitro/Litro
 °C: Grados Celsius

Fecha de Ingreso: miércoles 08 de febrero de 2012
 Fecha de Reporte: Miércoles 22 de febrero de 2012

Ing. Humberto Jiménez
 Coordinador ANALAB

Los resultados de este informe son válidos únicamente para la muestra como fue recibida en el Laboratorio y en su impresión ORIGINAL.
 El Laboratorio ANALAB no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le da a este informe.
 La reproducción parcial o total de este informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.

5ta. calle 0-50, Zona 14, Guatemala, Guatemala, C.A.
 19/04/2012 04:33 p.m.

E-mail: analab@anacafe.org

www.laboratorioanalab.com
 Teléfono: 2311 - 1969 Ext. 1132, 1133 y 1135
 Página 1/1

Figura 12. Resultados de análisis de muestras sin tratamiento

Orden: 19 - 1720
 Investigador: Roberto Soto PTAR/2011-2012
 Finca: La Voz que clama en el desierto
 Localización: San Juan la Laguna, SOLOLÁ



No.	Identificación	pH	mg/L				ml/l		mg/L	
			S.T.	S.T.D.	S.T.S.	D.Q.O.	D.B.O. ₅	S.S.	N total	P total
10,571	Proporción pulpa-agua miel 60%-40% Rep. I	4.80	5,372.00	3,790.00	1,582.00	4,760.00	4,320.00	8.50	217.00	46.06
10,572	Proporción pulpa-agua miel 60%-40% Rep. II	4.80	6,658.00	5,098.00	1,560.00	7,660.00	75,000.00	8.00	206.50	46.53
10,573	Proporción pulpa-agua miel 60%-40% Rep. III	4.80	6,590.00	4,108.00	2,482.00	11,050.00	9,240.00	10.00	231.00	45.67
10,574	Proporción pulpa-agua miel 60%-40% Rep. IV	4.80	6,740.00	5,382.00	1,358.00	7,110.00	7,000.00	15.00	227.50	51.42
10,575	Proporción pulpa-agua miel 75%-25% Rep. I	4.90	5,690.00	4,564.00	1,126.00	4,250.00	6,240.00	3.00	185.50	46.32
10,576	Proporción pulpa-agua miel 75%-25% Rep. II	4.80	5,576.00	4,296.00	1,280.00	5,430.00	5,000.00	6.00	143.50	23.62
10,577	Proporción pulpa-agua miel 75%-25% Rep. III	4.80	7,335.00	5,386.00	1,950.00	8,190.00	7,840.00	5.00	199.50	8.75
10,578	Proporción pulpa-agua miel 75%-25% Rep. IV	4.70	9,868.00	8,160.00	1,708.00	9,970.00	10,000.00	4.50	210.00	62.18
10,579	Proporción pulpa-agua miel 50%-50% Rep. I	4.80	6,248.00	4,478.00	1,770.00	6,210.00	7,310.00	13.00	210.00	61.49
10,580	Proporción pulpa-agua miel 50%-50% Rep. II	4.80	6,496.00	4,438.00	2,058.00	6,760.00	6,500.00	9.00	220.50	53.99
10,581	Proporción pulpa-agua miel 50%-50% Rep. III	4.70	4,826.00	4,188.00	640.00	6,700.00	6,370.00	1.50	126.00	19.84
10,582	Proporción pulpa-agua miel 50%-50% Rep. IV	5.00	6,546.00	4,576.00	1,970.00	6,840.00	5,850.00	4.00	143.50	41.37
10,583	Proporción pulpa-agua miel 40%-60% Rep. I	4.80	4,186.00	3,618.00	568.00	6,540.00	5,340.00	8.00	150.50	41.71
10,584	Proporción pulpa-agua miel 40%-60% Rep. II	4.70	6,278.00	5,206.00	1,072.00	7,900.00	7,840.00	6.00	217.00	70.33
10,585	Proporción pulpa-agua miel 40%-60% Rep. III	4.80	8,274.00	4,980.00	3,294.00	10,600.00	8,800.00	9.00	262.50	64.06
10,586	Proporción pulpa-agua miel 40%-60% Rep. IV	4.80	6,712.00	4,292.00	2,420.00	9,050.00	8,280.00	10.00	252.00	61.04

pH: Potencial de Hidrogeno
 S.T.: Sólidos Totales
 S.T.D.: Sólidos Totales Disueltos
 S.S.: Sólidos Sedimentables
 D.Q.O.: Demanda Química de Oxígeno
 D.B.O.₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno
 S.T.S.: Sólidos Totales en Suspensión
 N total: Nitrogeno Total
 P total: Fósforo Total
 mg/L: Miligramo/Litro
 ml/L: Mililitro/Litro

Fecha de Ingreso: Marías, 2 de marzo de 2012
 Fecha de Reporte: Marías, 23 de abril de 2012



Ing. Humberto Almaraz
 Coordinador ANALAB

Los resultados de este informe son válidos únicamente para la muestra como fue recibida en el Laboratorio y en su impresión ORIGINAL.
 El Laboratorio ANALAB, no se responsabiliza por el uso inadecuado que se le da a este informe.
 La reproducción parcial o total de este informe deberá ser autorizada por escrito por ANALAB.

5ta. calle 0-50, Zona 14, Guatemala, Guatemala, C.A. E-mail: analab@anacafe.org www.laboratorioanab.com
 Teléfono: 2311 - 1989 Ext. 1132, 1133 y 1135
 28/05/2012 11:46 a.m. Página 1/2

Figura 13. Resultados de análisis de muestras con 20 días de retención hídrica



Orden: 19 - 2133
 Investigador: Roberto Soto PTAR/2011-2012
 Finca: La Voz que clama en el desierto
 Localización: San Juan la Laguna, SOLOLÁ

No.	Identificación	pH	mg/L										ml/l		P total		
			S.T.	S.T.D.	S.T.S.	D.O.O.	D.B.O. ₅	S.S.	N total	S.S.	N total	S.S.	N total				
13,195	Proporción pulpa-agua miel 60%-40% Rep. I R.H. 40 d.	5.20	6,002.00	4,250.00	1,752.00	9,430.00	5,280.00	2.00	192.50	66.49							
13,196	Proporción pulpa-agua miel 60%-40% Rep. II R.H. 40 d.	5.20	8,242.00	4,190.00	4,052.00	9,035.00	5,760.00	19.50	175.00	85.94							
13,197	Proporción pulpa-agua miel 60%-40% Rep. III R.H. 40 d.	5.00	6,495.00	5,948.00	548.00	9,865.00	6,080.00	0.70	241.50	78.20							
13,198	Proporción pulpa-agua miel 60%-40% Rep. IV R.H. 40 d.	6.30	4,634.00	4,274.00	360.00	8,885.00	4,590.00	4.00	189.00	33.29							
13,199	Proporción pulpa/agua miel 75/25 Rep. I R.H. 40 días	5.40	7,222.00	4,560.00	2,662.00	6,885.00	6,890.00	4.00	203.00	43.96							
13,200	Proporción pulpa/agua miel 75/25 Rep. II R.H. 40 días	5.20	5,578.00	4,264.00	1,314.00	5,960.00	5,280.00	0.10	262.50	78.84							
13,201	Proporción pulpa/agua miel 75/25 Rep. III R.H. 40 días	5.00	5,430.00	4,212.00	1,218.00	6,555.00	5,850.00	4.50	210.00	64.15							
13,202	Proporción pulpa/agua miel 75/25 Rep. IV R.H. 40 días	5.00	5,878.00	3,922.00	1,956.00	7,145.00	6,160.00	2.00	395.50	61.17							
13,203	Proporción pulpa/agua miel 50/50 Rep. I R.H. 40 días	5.10	7,302.00	4,580.00	2,722.00	8,645.00	7,310.00	4.50	252.00	140.32							
13,204	Proporción pulpa/agua miel 50/50 Rep. II R.H. 40 días	5.30	7,600.00	5,440.00	2,160.00	8,220.00	7,360.00	4.20	203.00	103.56							
13,205	Proporción pulpa/agua miel 50/50 Rep. III R.H. 40 días	5.00	5,198.00	3,386.00	1,812.00	8,790.00	6,120.00	6.50	192.50	96.07							
13,206	Proporción pulpa/agua miel 50/50 Rep. IV R.H. 40 días	5.30	6,142.00	4,240.00	1,902.00	8,500.00	5,440.00	0.30	154.00	98.84							
13,207	Proporción pulpa/agua miel 40/60 Rep. I R.H. 40 días	5.20	5,580.00	4,448.00	1,132.00	6,435.00	5,280.00	0.30	164.50	44.59							
13,208	Proporción pulpa/agua miel 40/60 Rep. II R.H. 40 días	5.20	7,388.00	5,228.00	2,160.00	6,430.00	5,460.00	0.50	133.00	83.39							
13,209	Proporción pulpa/agua miel 40/60 Rep. III R.H. 40 días	5.30	7,495.00	5,552.00	1,944.00	6,430.00	5,460.00	8.50	210.00	19.72							
13,210	Proporción pulpa/agua miel 40/60 Rep. III R.H. 40 días	5.10	7,062.00	4,740.00	2,322.00	6,595.00	5,590.00	0.50	168.00	99.36							
13,211	Prueba bioactivador - Dictamen por separado	4.90	5,434.00	3,974.00	1,460.00	8,900.00	8,500.00	27.00	136.50	51.46							

pH: Potencial de Hidrogeno
 S.T.: Sólidos Totales
 S.T.D.: Sólidos Totales Disueltos
 S.S.: Sólidos Sedimentables
 D.O.O.: Demanda Química de Oxígeno
 D.B.O.: Demanda Bioquímica de Oxígeno
 S.T.S.: Sólidos Totales en Suspensión
 N total: Nitrogeno Total
 P total: Fósforo Total
 mg/L: Miligramo/Litro
 ml/L: Mililitro/Litro

Fecha de Ingreso: Martes, 21 de marzo de 2012
 Fecha de Reporte: Martes, 23 de abril de 2012

ing. Humberto Jiménez
 Coordinador ANELAB

www.laboratorioanelab.com

E-mail: anelab@anacafe.org

5ta. calle 6-50, Zona 14, Guatemala, Guatemala, C.A.
 25/05/2012 04:41 p.m.

Teléfono: 2311 - 1969 Ext. 1132, 1133 y 1135
 Página 1/2

Figura 15. Resultados de análisis de muestras con 40 días de retención hídrica