



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL**

Unidad de Postgrado

**MAESTRÍA EN SISTEMAS INTEGRADOS
DE GESTIÓN DE LA CALIDAD, AMBIENTE
Y SEGURIDAD**

**Tesis de grado previa a la obtención del título de
Magíster en Sistemas Integrados de Gestión de la Calidad,
Ambiente y Seguridad**

Tesis:

**“Biodegradación anaeróbica de vinaza generada en la destilería
Soderal y aprovechamiento energético del biogás como medio para
bajar el impacto de gases de efecto invernadero”**

**Autores: ING. CAMILO MOLINA BETANCOURT
 ING. WILFRIDO QUIÑÓNEZ BECERRA**

Director: ING. GUSTAVO HIDALGO, M.Sc.

Guayaquil - 2012

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados y las conclusiones del presente trabajo, son de exclusiva responsabilidad de los autores.

CAMILO MOLINA BETANCOURT con C.I. No. 0907596019

WILFRIDO QUIÑÓNEZ BECERRA con C.I. No. 0911938769

Guayaquil, 7 de mayo de 2012

Ing. Camilo Molina Betancourt

Ing. Wilfrido Quiñónez Becerra

DEDICATORIA

Dedicado al apoyo incondicional de mi esposa y mis hijos: Katherine, Camilo y Diego.

Camilo

DEDICATORIA

A mis padres, las personas que me enseñaron buenos principios, que se sacrificaron por darnos los estudios dejando de comer, de vestirse, no tengo palabras para agradecerle todo lo que hicieron por sus hijos, se que desde cielo han de estar muy felices.

*Para los mejores padres.
Gracias*

Wilfrido

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios en el nombre de Nuestro Señor Jesucristo.

Agradezco a mis padres por el apoyo y guía que se transformaron en buenos principios y valores.

Agradezco a mis hermanos por demostrar el trabajo equipo familiar.

Agradezco a Soderal, empresa que me ha abierto las puertas para crecer profesionalmente.

Camilo Molina

AGRADECIMIENTO

A Dios: por protegerme, por darme la vida, la inteligencia y sabiduría para comprender y entender el conocimiento de todo lo que he aprendido en esta vida y darme esa paciencia en todo momento.

A mi esposa: la persona que más amo en esta vida por haber impulsado a seguir esta maestría y apoyarme en todo momento la Ing. Judith Flores Rivera, M.Sc.

A mi familia: Principalmente a mis hermanos y hermanas que siempre han estado dándome su respaldo y amor y también a todos mis familiares que han estado de cerca aconsejándome, gracias a todos.

A Soderal por darme su respaldo para estructurar este estudio.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por darme una excelente enseñanza.

Ing. Wilfrido Quiñonez Becerra

ÍNDICE GENERAL

	Página
CARÁTULA.....	I
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	II
DEDICATORIAS.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE CUADROS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XIV
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	XV
RESUMEN.....	XVI

INTRODUCCIÓN

i. Presentación.....	1
ii. Antecedentes.....	2
iii. Planteamiento del problema.....	2
iv. Justificación.....	3
v. Objetivos.....	4
vi. Hipótesis.....	4
vii. Marco metodológico.....	4

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. La caña de azúcar para la producción de alcohol.....	6
1.2. Melaza para la obtención de alcohol.....	7
1.2.1. Vinaza de la caña de azúcar.....	12

1.2.1.1.	Composición físico-química de la vinaza.....	13
1.2.2.	Impacto ambiental causado por la vinaza.....	15
1.2.3.	Alternativas de uso de la vinaza.....	16
1.3.	Fermentación anaeróbica para producir biogás.....	16
1.3.1.	Composición y características del biogás.....	20
1.3.2.	Principios de la fermentación anaeróbica.....	20
1.3.3.	Fases que intervienen en la biodigestión anaeróbica.....	21
1.3.3.1.	Fase de hidrólisis.....	21
1.3.3.2.	Fase de acidificación.....	22
1.3.3.3.	Fase metanogénicas.....	22
1.3.4.	Factores que afectan a la producción de biogás.....	22
1.3.5.	Tipos de materias primas utilizadas para producir biogás.....	23
1.3.6.	Velocidad de carga volumétrica para el biodigestor.....	24
1.3.7.	Tiempo de retención hidráulico en el biodigestor.....	25
1.3.8.	Valor de acidez en el biodigestor.....	25
1.3.9.	Diferentes aplicaciones del biogás.....	26
1.4.	Efecto invernadero y el calentamiento global.....	31
1.4.1.	Protocolo de Kyoto.....	35
1.4.1.1.	Objetivos de monitoreos de emisiones.....	36
1.4.1.2.	Gases de efecto invernadero.....	37
1.4.2.	Mecanismo de desarrollo limpio (MDL).....	40
1.4.2.1.	Autoridad Nacional (AN).....	41
1.4.2.2.	Importancia de la AN-MDL.....	42
1.4.2.3.	Funciones de la AN-MDL.....	42
1.4.2.4.	Procedimientos Nacionales.....	42
1.4.3.	Detalles del funcionamiento del MDL.....	43
1.4.3.1.	Línea base.....	44
1.4.3.2.	Metodología de la Línea base.....	47
1.4.3.3.	Adicionalidad.....	45
1.4.3.4.	Tipo de proyectos para Mecanismo de Desarrollo Limpio.....	47
1.4.4.	Ciclos para un proyecto MDL.....	50

1.4.4.1	Diseño del proyecto.....	50
1.4.4.2.	Validación del proyecto.....	50
1.4.4.3.	Registro del proyecto.....	51
1.4.4.4.	Implementación del diseño.....	51
1.4.4.5.	Monitoreo y vigilancia.....	51
1.4.4.6.	Verificación y certificación.....	51
1.4.4.7.	Expedición de las reducciones certificadas de emisiones.....	51

CAPÍTULO II

INVESTIGACIÓN, MÉTODOS Y CÁLCULOS

2.1.	Descripción del área de estudio y fuente de obtención de vinaza...	52
2.2.	Localización y duración del experimento.....	53
2.3.	Unidades experimentales.....	56
2.4.	Materiales equipos e instalaciones necesarias para el estudio.....	56
2.4.1.	Tanque ecualizador.....	57
2.4.2.	Tanque enfriador de vinaza.....	60
2.4.3.	Torre piloto de enfriamiento.....	61
2.4.4.	Tanque biodigestor.....	61
2.4.5.	Separador de agua y gasómetro.....	62
2.4.6.	Quemado flare.....	65
2.5.	Tratamiento y diseño experimental.....	66
2.6.	Esquema y Diseño del experimento.....	69
2.7.	Mediciones experimentales y caracterización.....	70
2.7.1.	Caracterización de la vinaza de la destilería.....	70
2.7.2.	Métodos analíticos para los monitoreos experimentales.....	71
2.7.2.1.	Método analítico para alcalinidad y ácidos grasos volátiles.....	71
2.7.2.2.	Método analítico para la determinación del DQOt y DQOs.....	72
2.7.2.3.	Método analítico para sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV).....	73
2.8.	Fórmulas utilizadas para el cálculo de rendimientos.....	73

2.8.1.	Remoción (%) de la Demanda Química de Oxígeno total y soluble	73
2.8.2.	Demanda Química de oxígeno removido (kilos /día).....	74
2.8.3.	Contenido de metano en el biogás.....	74
2.8.4.	Rendimiento de metano.....	74
2.8.5.	Resumen de de datos obtenidos en el experimento.....	75
2.8.5.1.	Resumen de datos calculados del aprovechamiento del biogás.....	76
2.8.5.2.	Cálculos para el aprovechamiento del biogás.....	77
2.8.6.	Línea base para la captura de metano de vinaza.....	78
2.8.6.1.	Cálculos para las emisiones de la línea base.....	79
2.8.6.2.	Cálculos para las emisiones del proyecto.....	80
2.9.	Procedimiento experimental.....	84
2.10.	Metodología de evaluación.....	85
2.11.	Identificación y caracterización de los impactos potenciales para un proyecto de biodigestión de vinaza en proceso de operación...	85
2.11.1.	Metodología para la identificación de los impactos ambientales potenciales y su naturaleza.....	87
2.11.2.	Parámetros de evaluaciones de impactos ambientales.....	93

CAPÍTULO III

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO

3.1.	Resultados experimentales.....	93
3.1.1.	Caracterización de vinaza que ingresa al biodigestor.....	93
3.1.2.	Comportamiento del pH en la prueba.....	96
3.1.3.	Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno.....	97
3.1.4.	Sólidos totales y volátiles en la prueba.....	99
3.1.5.	Niveles de sulfatos en la vinaza.....	99
3.1.6.	Relación de ácidos grasos volátiles y alcalinidad.....	100
3.1.7.	Temperatura del biodigestor.....	101
3.1.8.	Flujo de vinaza alimentado al biodigestor.....	102
3.1.8.1.	Carga orgánica alimentada al biodigestor.....	102

3.1.9.	Caracterización del biogás obtenido en el estudio.....	103
3.2.	Resultados económico por aprovechamiento del biogás.....	103
3.3.	Resultados de los rendimientos obtenidos en el estudio.....	104

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

4.1.	Evaluación y discusión de resultados experimentales.....	106
4.1.1.	Comparación de resultados de la vinaza cruda y la vinaza que sale del biodigestor.....	109
4.2.	Evaluación y discusión de resultados financieros.....	109
4.3.	Evaluación y discusión de resultados ambientales.....	110
4.4.	Evaluación y discusión de resultados para proyecto MDL.....	110

	CONCLUSIONES..	111
--	-----------------------------	-----

	RECOMENDACIONES	113
--	------------------------------	-----

	BIBLIOGRAFÍA	114
--	---------------------------	-----

	GLOSARIO	117
--	-----------------------	-----

	ANEXOS	122
--	---------------------	-----

Anexo 1	Metodología IC, Versión 13 para la línea base para proyectos de pequeña escala.....	123
Anexo 2	Metodología IIIH, Versión 09 para la línea base para proyectos de pequeña escala.....	136
Anexo 3	Contenido de la Carta de Aprobación Por el Ministerio del Ambiente del Ecuador.....	156
Anexo 4	Acuerdo Específico entre el Proponente y la Autoridad Nacional – MDL.....	180

Anexo 5	Formato de recopilación de datos experimentales.....	187
Anexo 6	Certificado de acreditación del laboratorio “Grupo Químico Marcos”, GQM.....	189
Anexo 7	Herramienta de cálculo para gases que contienen metano en flare.....	195
Anexo 8	Sistema de detección de gas, GASTEC NF EN 1231.....	210
Anexo 9	Formato de frecuencia de análisis y monitoreos.....	215

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Parámetros de producción obtenidos durante la zafra 2010 en los ingenios San Carlos, Valdez y ECUDOS.....	7
Cuadro 2.	Composición general de la melaza de caña.....	9
Cuadro 3.	Compuestos orgánicos de la vinaza.....	14
Cuadro 4.	Diferentes aplicaciones del biogás.....	30
Cuadro 5.	Equivalencia de gases de efecto invernadero.....	40
Cuadro 6.	Variables para control de la operación.....	70
Cuadro 7.	Resumen de datos obtenidos en el experimento.....	75
Cuadro 8.	Resumen de datos calculados para el aprovechamiento del biogás.....	76
Cuadro 9.	Emisiones reducidas para 10 años.....	84
Cuadro 10.	Parámetros de evaluaciones para potenciales impactos ambientales.....	88
Cuadro 11.	Evaluación y valoración de impactos ambientales potenciales en etapa de operación para una planta de tratamiento.....	91
Cuadro 12.	Composición fisico-química de la vinaza.....	94
Cuadro 13.	Comparación de análisis de vinaza de destilerías ecuatorianas.....	95
Cuadro 14.	Resultados del biogás obtenido en la prueba.....	103
Cuadro 15.	Estimaciones económicas por aprovechamiento del biogás....	103
Cuadro 16.	Rendimiento obtenido en $m^3 CH_4/Kg DQO_s$ removido.....	105
Cuadro 17.	Resultados de análisis a la vinaza cruda.....	107
Cuadro 18.	Resumen de resultados para la vinaza tratada.....	108
Cuadro 19.	Comparación de resultados de análisis de vinaza que entra y sale del biodigestor.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Diferentes usos del biogás.....	28
Figura 2.	Efecto Invernadero.....	33
Figura 3.	Temperaturas histórica reconstituidas.....	34
Figura 4.	Gases de Efecto Invernadero.....	38
Figura 5.	Concepto de adicionalidad.....	46
Figura 6.	Reducción de emisiones por alcance sectorial en Ecuador.....	47
Figura 7.	Etapas de Ciclo de un proyecto MDL.....	50
Figura 8.	Diagrama de proceso de producción de alcohol etílico.....	53
Figura 9.	Diagrama del proceso de digestión anaeróbica.....	67
Figura 10.	Condiciones actuales y con proyecto para el tratamiento de vinaza.....	78

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.	Curva de neutralización de vinaza con soda caústica.....	68
Gráfico 2.	pH de la vinaza cruda y tratada.....	97
Gráfico 3.	Demanda Química de Oxígeno total.....	97
Gráfico 4.	Demanda Química total y soluble de la vinaza cruda.....	98
Gráfico 5.	Demanda Química de oxígeno de la vinaza tratada.....	98
Gráfico 6.	Sólidos en la vinaza alimentada al biodigestor.....	99
Gráfico 7.	Niveles de sulfato en la vinaza cruda.....	100
Gráfico 8.	Relación de acidez y alcalinidad en el biodigestor.....	101
Gráfico 9.	Temperatura del Biodigestor (°C).....	101
Gráfico 10.	Alimentación de vinaza al biodigestor.....	102
Gráfico 11.	Carga orgánica alimentada al biodigestor.....	102
Gráfico 12.	Rendimientos obtenidos.....	105

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.	Muestras de melaza y vinaza	13
Imagen 2.	Planta piloto de tratamiento de vinaza.....	55
Imagen 3.	Ecualizador.....	57
Imagen 4.	Vinaza en el ecualizador.....	58
Imagen 5.	Nivel del Ecualizador.....	58
Imagen 6.	Transporte de vinaza.....	59
Imagen 7.	Tanque de 10000 litros para recepción de vinaza.....	59
Imagen 8.	Enfriador de vinaza.....	60
Imagen 9.	Torre piloto de enfriamiento.....	61
Imagen 10.	Biodigestor de 22.5 m ³	62
Imagen 11.	Separador de agua del biogás	63
Imagen 12.	Gasómetro.....	63
Imagen 13.	Manómetro salida biogás.....	64
Imagen 14.	Bombas de recirculación del biodigestor.....	64
Imagen 15.	Flare.....	65
Imagen 16.	Panel de control.....	65
Imagen 17.	Sistema de bombeo de vinaza al ecualizador.....	66
Imagen 18.	Equipo para análisis de Ácidos Grasos Volátiles y Nitrógeno total.....	72
Imagen 19.	Reactor HACH para DQO.....	72
Imagen 20.	Espectrofotómetro HACH.....	73

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
UNIDAD DE POSGRADOS SEDE GUAYAQUIL**

“Biodegradación anaeróbica de vinaza generada en la destilería Soderal y aprovechamiento energético del biogás como medio para bajar el impacto de gases invernadero”

*Camilo Molina, camilomolina63@hotmail.com
Wilfrido Quiñónez, wquinonez@hotmail.com*

*Roberto Hidalgo, gustavo.hidalgo.flores@hotmail.com
Maestría en Sistemas Integrados de Calidad, Ambiente y Seguridad
2012*

Investigación en el área industrial

Palabras clave: Destilería, aprovechamiento de vinaza, energía alternativa.

Resumen

Se realizó un estudio a nivel piloto, para biodegradar la vinaza proveniente de la destilación del vino fermentado de melaza de caña de la destilería SODERAL S.A utilizando un biodigestor tipo DAF (Downflow Anaerobic Filter, Filtro Anaeróbico de Flujo Descendente) de 22.5 m³. El lodo utilizado como inóculo fue tomado del mismo reactor anaeróbico alimentado con vinaza de melaza de caña de la destilería de la empresa CODANA S.A. Se trabajó con vinazas que oscilaron entre 53500 mg/L y 75670 mg/L con un flujo máximo alimentado al biodigestor de 2.8 m³/d y un tiempo de retención hidráulica (TRH) de entre 8 y 29 días, lo que admitió obtener una remoción promedio del DQO_t del 72% y 77.5% del DQO_s y una producción de biogás con 53.1% de concentración de metano y un rendimiento máximo obtenido de 0.28 m³CH₄/kg DQO_s. Los niveles de sulfato de la vinaza alimentada al biodigestor generaron, en el biogás obtenido en la prueba, rangos de H₂S de entre 1.8 y 3.2%. La vinaza sin diluir fue alimentada directamente al biodigestor con una relación de ácido grasos volátiles y alcalinidad que, en el estudio varió entre 0.15 y 0.47. Con los datos experimentales obtenidos en el estudio se estima el valor agregado que la destilería puede utilizar reemplazando el combustible fósil para generación de vapor o energía eléctrica según lo requiera.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
UNIDAD DE POSGRADOS SEDE GUAYAQUIL

“Anaerobic biodegradation of stillage by Soderal distillery and the energetic exploitation of biogas for decrease the greenhouse gasses impact”.

*Camilo Molina, camilomolina63@hotmail.com
Wilfrido Quiñónez, wquinonez@hotmail.com*

*Roberto Hidalgo, gustavo.hidalgo.flores@hotmail.com
Master in Integrated Quality System, Environment and Safety*

2012

*Research in the industrial area
Keywords: Distillery, use of stillage, alternative energy.*

Summary

Was performed a pilot test, to biodegrade the stillage from wine fermented of molasses from cane of the distillery SODERAL S.A. using a DAF (Downflow Anaerobic Filter) biodigester of 22, 5 m³. The mud use as inoculums it is take of the same anaerobic reactor and it is powered with VINAZA of molasses from cane of distillery CODANA S.A. it worked with VINAZAS between 53500 (mg/L and 75670 mg/L that was powered with a maximum flow of 2.8 m³/d with a hydraulics retention time between 8 and 29 days, this allowed has a remotion range of DQOt between 72% and 77.5% from DQOs and a BIOGAS production of 53.1% from methane concentration and a maximum performance of 0.28 m³CH₄/kg DQOs. The sulfate level of stillage powered to biodigester generated, in biogas obtained in this test, ranges of H₂S between 1.8 y 3.2%. The undiluted stillage was powered to biodigester with a relation of volatile fatty acid (VFA) but the alkalinity various between 0.15 and 0.47. From this data obtained, we estimated the aggregated value of distillery can be used to replace the fossil fuel to generated steam or electric power as required.

INTRODUCCIÓN

i. Presentación

Durante el proceso de producción del alcohol en las destilerías, que utilizan como materia prima melaza de caña, abastecida por los ingenios azucareros, se genera un subproducto conocido como vinaza, el cual contiene una gran variedad de componentes que en conjunto le confieren características especiales y su descarga indiscriminada puede ocasionar daños al medio ambiente.

Con la finalidad de encontrar una alternativa de solución y aprovechamiento de la vinaza, este estudio presenta una alternativa de beneficio energético que la destilería puede aplicar utilizando los conceptos de ecoeficiencia bajando los impactos de efecto invernadero por el metano que va a la atmósfera y que se forma, por la descomposición natural de la materia orgánica, en el almacenamiento de la vinaza generada en las destilerías.

Este trabajo experimental está estructurado en 4 capítulos. El capítulo 1 explica sobre la caña de azúcar y melaza para la obtención de alcohol, la vinaza como residuo de la destilería y el aprovechamiento del biogás. El capítulo 2 hace referencia de la investigación, los cálculos y métodos utilizados en el estudio que sigue con el capítulo 3 que presenta los resultados y, el capítulo 4 hace una discusión y análisis de los datos obtenidos.

ii. Antecedentes

El ingenio azucarero dentro de su proceso obtienen como residuo de la fabricación de azúcar un líquido espeso rico en azúcares llamado melaza que es utilizado como materia prima para la fabricación de alcohol etílico en la destilería. Esta melaza es diluida con agua y fermentada por la acción de las levadura para transformar el mayor contenido en azúcares en alcohol y CO₂¹. Luego este vino fermentado pasa por la columna de destilación para separar el alcohol por la parte superior de la columna y por la parte inferior sale un líquido color café llamado VINAZA.

La destilería genera altos volúmenes de vinaza con carga orgánica elevadas lo que hace que se convierta en un residual de alta agresividad para el ambiente si no se lo maneja con precaución.

iii. Planteamiento del Problema

La generación de vinaza en la destilería es directamente proporcional a la producción de alcohol, el volumen generado dentro de la destilería oscila entre 11 y 15 litros de vinaza por cada litro de alcohol producido. La carga orgánica de la vinaza depende de la materia prima utilizada en la producción (DQO² de 50000 a 115000 mg/L). El contenido de potasio de la vinaza es aprovechada en la plantaciones de caña como fertirriego y para ello hay que almacenarla en piscinas que por degradación anaeróbica forma metano y es emitido a la atmósfera como un gas de efecto invernadero.

Afortunadamente la materia orgánica puede ser aprovechada en un sistema controlado con biodegradación anaeróbica y captar el metano que puede ser aprovechado por la destilería como energía alternativa.

Los niveles de sulfato en la vinaza dependen del proceso utilizado en la producción de azúcar de los ingenios que vienen en la melaza utilizada como materia prima de las destilerías, estos sulfatos (3285 mg/L como promedio en SODERAL) pueden

¹ Dióxido de Carbono, CO₂

²Demanda Química de Oxígeno, DQO.

convertirse en un inconveniente de los sistemas anaeróbicos para generar metano ocasionado bajos rendimientos en la biodigestión.

Para mejorar las condiciones del fertirriego con vinaza, se la diluye con agua para mejorar el pH (Entre 4 y 5) y para lograr niveles neutros de pH es necesario largos tiempos de almacenamiento en las piscinas.

El proceso anaeróbico estudiado en la planta piloto presenta la opción de obtener un mejor efluente con pH mas amigables para el suelo con remoción del DQO que pueden ser mejor manejado para el fertirriego de la caña.

iv. Justificación

A través de este estudio de la biodegradación anaeróbica de la vinaza generada en la destilería se presenta una oportunidad para que otras empresas agroindustriales que generan residuos con alta carga orgánica se incursionen en el estudio del aprovechamiento de estos como medio para bajar los impactos ambientales y utilizar los conceptos de ecoeficiencia implantando en sus empresas el uso de energía alternativa.

La degradación anaeróbica de los efluentes es una tecnología que ayuda a la remoción de la carga orgánica y mejora las condiciones que se transforman en oportunidad para:

- Disminuir las emisiones de metano a la atmósfera en piscinas de almacenamiento de efluentes con alta carga orgánica.
- Las empresas que se incursiones en estos sistemas pueden participar con este tipo de proyectos para Mecanismo de Desarrollo Limpio y Certificados verdes.
- La captura del gas producido contribuye a reducir los impactos de olores emitidos en las lagunas abiertas para el almacenamiento de vinaza u otros residuos con materia orgánica.

v. Objetivos

Objetivo General

Bajar la carga orgánica de las aguas residuales (vinaza) generada en la producción de alcohol evaluando la eficiencia óptima de producción de biogás para ser aprovechada como energía alternativa en la destilería.

Objetivos Específicos

- Determinar las variables de operación para la biodegradación anaeróbica de la vinaza generada en la destilería de alcohol.
- Determinar la eficiencia de la producción de biogás en el biodigestor piloto.
- Analizar el comportamiento en la biodegradación de los sulfatos contenidos en la vinaza.
- Determinar las condiciones del efluente obtenido en la biodegradación para aprovechamiento como abono.
- Determinar la remoción de la carga orgánica de la vinaza.

vi. Hipótesis

La vinaza constituye un sustrato adecuado para producir biogás para disminuir el consumo de combustibles fósiles y reduce la emisión del metano a la atmósfera.

vii. Marco Metodológico

Para la realización del estudio, se realiza durante todo el tiempo de operación del sistema, un seguimiento de la evolución de los parámetros en la fase líquida y en la fase gaseosa. Se considera que las bacterias son el ingrediente esencial del proceso y

es necesario mantenerlas en condiciones que permitan asegurar y obtener los mejores resultados del ciclo biológico dentro del biodigestor.

Los análisis diarios, para vinaza cruda y tratada en el biodigestor, fueron realizados en el laboratorio de la destilería con procedimientos analíticos recomendados en el manual de operación y mantenimiento de la empresa BIOTHANE³ (*Biothane Corporation, 2500 Broadway, Drawer 5 Camden, New Jersey 08104, USA*), y para tener una referencia, se analizó la vinaza que sale de la destilería, en el laboratorio GQO (Grupo Químico Marcos), acreditado a la OAE⁴.

La toma de datos fue planificada para controlar todos los parámetros implicados en la biodigestión. Luego se construye una matriz de recopilación diaria de datos. La verificación de los datos recopilados en los tres turnos, fue supervisada diariamente y se actuó según el comportamiento, tomando las acciones correctivas necesarias.

³www.biothane.com

⁴ El Organismo de Acreditación Ecuatoriano – OAE, es el órgano oficial en materia de acreditación a laboratorios a nivel nacional www.oae.gov.com.ec

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. La caña de azúcar para la producción de alcohol

El Ecuador presenta condiciones climáticas apropiadas para los sembríos de caña, de la misma que puede obtenerse varios subproductos. El cultivo de la caña de azúcar en el Ecuador toma su importancia por los años sesenta, con un notable mejoramiento en los rendimientos por cada hectárea. La producción estaba destinada principalmente a la producción de azúcar, panela y aguardiente.

El cultivo de la caña se lo realiza principalmente en la Región Costa y parte en la Sierra. Los totales de producción de caña en el informe correspondiente al año 2010, emitido por el Centro de Investigación de La Caña de Azúcar en el Ecuador (CINCAE)⁵, para los Ingenios San Carlos, ECUDOS y Valdez, que representan el mayor porcentaje de producción de azúcar y sus derivados en Ecuador, clasificándose esta información entre lo correspondiente a cada ingenio y sus respectivos cañicultores o proveedores de caña.

El total de hectáreas cosechadas para el año 2010 fue 63,041.8 ha, dando una producción total de azúcar de 447,815.8 TM⁶. El promedio general de producción de caña por hectárea fue 74.1 TM, el mismo que sigue siendo bajo a pesar del potencial de variedades y suelos que se usan para el cultivo de caña. El rendimiento promedio de azúcar fue de 9.6% (95.5 KATC⁷), el que ha mejorado con respecto a los años anteriores.

⁵www.cincae.com

⁶ Toneladas Métricas, TM

⁷Kilos de azúcar por tonelada de caña, KATC

**Cuadro 1: Parámetros de producción obtenidos durante la zafra 2010 en los ingenios
San Carlos, Valdez y ECUDOS**

Zafra 2010			
PARAMETRO DE PRODUCCIÓN	INGENIOS	CAÑICULTORES	TOTALES/ PROMEDIO
Hectáreas cosechadas	36,165.50	26,876.30	63,041.80
Toneladas de caña molida	2,738,862.30	1,929,431.80	4,668,294.10
Toneladas de azúcar	263,738.70	184,077.10	447,815.80
TCH	76.80	71.80	74.10
LbATC	215.70	206.80	211.20
THC = Toneladas de caña por ha			
LbATC = Libras de azúcar por tonelada de caña			
Informe Anual 2010 CINCAE			

Fuente: www.cincae.com

El azúcar que se produce en Ecuador es básicamente para consumo nacional. A partir del 2005, los tres ingenios más grandes han iniciado programas de co-generación de energía eléctrica, para usar los residuos de bagazo de las fábricas. De la misma forma, se han establecido plantas de procesamiento de alcohol, para la industria farmacéutica y de bebidas alcohólicas, así como con miras al procesamiento de etanol, para carburante, que estaría próximo a ser usado a nivel general en automotores a gasolina.

1.2. Melaza para la obtención de alcohol

La miel también llamada melaza, es un líquido denso y viscoso de color oscuro, es producto de la fabricación o refinación de la sacarosa de la caña de de azúcar. Este subproducto es utilizado para la fabricación de alcohol y para alimento balanceado para animales y como suplemento alimenticio para el hombre⁸.

⁸ Lesson y Summers, 2000

Las melazas o mieles finales, suelen ser definidas por muchos autores como el residuo de la cristalización final del azúcar (sacarosa) de los cuales no se pueden obtener más azúcar por métodos físicos.

La Norma ICONTEC⁹, define como miel final o melaza (no cristalizable) al jarabe o líquido denso y viscoso, separado de la misma masa cocida final y de la cual no es posible cristalizar más azúcar por métodos usuales. (Norma Técnica 587 de 1994 para industria alimenticia y bebidas):

La denominación melaza se aplica al efluente final obtenido en la obtención de azúcar mediante cristalizaciones repetidas. El proceso de evaporación y cristalización es usualmente repetido varias veces hasta el punto en el cual el azúcar invertido y la alta viscosidad de las melazas ya no permitan una cristalización adicional de la sacarosa¹⁰.

La melaza es una mezcla compleja (véase Cuadro 2) que contiene sacarosa, azúcar invertido, sales y otros compuestos solubles en álcali que normalmente están presentes en el jugo de caña, así como los formados durante el proceso de obtención del azúcar. Además de la sacarosa, glucosa, fluctuosa y rafinosa los cuales son fermentables, las melazas también contienen sustancias reductoras no fermentables.

Los compuestos no fermentables reductores del cobre, son principalmente caramelos libres de nitrógeno producidos por el calentamiento requerido por el proceso y las melanoidinas que si contienen nitrógeno derivadas a partir de productos de condensación de azúcar y aminocompuestos¹¹.

⁹ Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC.

¹⁰ Swan, 1990

¹¹ Honig, 1974

Cuadro 2: Composición general de la melaza de caña

CONSTITUYENTES	CONTENIDOS
Materia seca	78%
Proteínas	3%
Sacarosa	60 - 63%
Azúcares reductores	3-5%
Sustancias disueltas	4-8%
Agua	16%
Grasas	0,40%
Cenizas	9%
Calcio	0,74%
Magnesio	0,35%
Fósforo	0,08%
Potasio	3,67%

Fuente: Escuela de Bacteriología y Laboratorio Clínico, 2004, Cali, Colombia, 79p

La composición de las melazas es muy heterogénea y puede variar considerablemente dependiendo de la variedad de caña de azúcar, suelo, clima, períodos de cultivo, eficiencia de la operación de la fábrica, sistemas de ebullición del jugo, tipo y capacidad de los evaporadores, entre otros. Por otro lado, la melaza de caña se caracteriza por tener grados Brix o sólidos disueltos 68-75% y un pH de 5.0-6.1¹².

Los principales azúcares en la melaza son la sacarosa (60%-63% en peso), la glucosa o dextrosa (6-9% en peso), y la fluctuosa o levulosa (5-10% en peso); estas dos últimas constituyen la porción de azúcares reductores encontrados en los análisis. La fluctuosa puede sufrir transformaciones al igual que la glucosa, debido a reacciones dependientes de la temperatura. El contenido de glucosa y fluctuosa en las melazas puede variar a causa de la hidrólisis de la sacarosa, a valores de pH ácido y a temperaturas altas.

Los no azúcares están compuesto por 33% de sustancias inorgánicas (Fe, K, Na, Ca, Mg, Zn, As, Cd, Hg, Pb, Cl, NO₃, SO₄); el 42% corresponde a sustancia nitrogenadas (aminoácidos, péptidos, colorantes); y el 25% a sustancias libres de nitrógeno (ácidos carboxílicos, alcoholes, fenoles, ésteres, vitaminas, gomas, y dextranas).

¹² Castro, 1993

Las materias primas vegetales que pueden potencialmente emplearse para producir alcohol es muy diverso, aunque genéricamente se incluye preferencialmente aquellas ricas en hidratos de carbono, las cuales pueden agruparse en dos categorías desde el punto de vista de la fermentación:

- a) Directamente fermentables
- b) Indirectamente fermentables

De acuerdo con esas categorías, las primeras (directamente fermentables) no requieren de transformación previa en hidratos de carbono, como acontece con la Sacarosa, la glucosa y la fructuosa. En el caso de las fuentes indirectamente fermentables si es necesario realizar la conversión previa en carbohidratos, para someterlas luego a fermentación con el objeto de que puedan ser asimiladas por la levadura alcohólica, tal es el caso de los almidones y la celulosa.

Las principales fuentes de carbohidratos de acuerdo con esos criterios son:

Directamente fermentables:

- Glucosa y fructuosa (pulpas de frutas)
- Sacarosa: Caña de azúcar, remolacha azucarera, sorgo sacarino (tallos).

Indirectamente Fermentables:

- Almidón: yuca, maíz, camote, papa, granos de cereales, tubérculos, bananos
- Celulosa: madera, bagazo y paja de caña, cáscaras de maní, tusa de maíz, paja de arroz, palma.

Aunque todas esas fuentes de carbohidratos puedan ser fermentadas, deben considerarse inicialmente aquellas que presentan alta concentración de ese componente en la materia prima, para lo cual debe a su vez presentar alta productividad agrícola (t/ha), rendimientos de Alcohol y rentabilidad (dólares/litro).

Tanto el Almidón como la celulosa deben en primera instancia ser convertidos (desdoblados) en azúcares fermentables, antes de ser sometidos a la fermentación alcohólica; la transformación de la celulosa es en este caso un proceso químico mucho más difícil y compleja.

La conversión de las sustancias Amiláceas se conoce como sacarificación, la cual se puede realizar por medio de procesos ácidos (Sulfúrico y Clorhídrico) o preferentemente biológicos (Enzimas Amilolíticas). El proceso de Desdoblamiento del almidón envuelve la hidrólisis de los puntos de unión (enlaces) de las moléculas de glucosa.

En las destilerías la sacarificación el proceso es desarrollado en el sacarificador, que es un tanque dotado de dispositivos que favorecen el calentamiento, enfriamiento y agitación de la materia prima tratada.

El alcohol se fabrica a partir de la fermentación de los carbohidratos (Azúcares o Almidón), cuya materia prima originaria dependerá de los recursos y facilidades particulares que disponga cada país.

El rendimiento que se obtenga en alcohol resulta determinante como criterio selectivo algunos índices reportados a nivel internacional, los cuales sin embargo, han sido ampliamente mejorados en muchos casos en los últimos años.

La melaza es un producto derivado de la caña de azúcar, extraído del proceso de refinación de ésta. La melaza es utilizada en la industria alcoholera para la elaboración de alcohol etílico, en la industria ganadera para la producción de alimento para ganado y en otras industrias como la acuicultura (cultivo de camarón), obtención de levaduras para panificación, entre otros¹³.

La fermentación es un proceso metabólico energético que comprende la descomposición de moléculas, tales como carbohidratos, de manera anaerobia. La fermentación ha sido utilizada desde tiempos antiguos en la preparación de alimentos

¹³<http://www.alcoholetilico.com.mx>

y bebidas. El desarrollo químico ha revelado la naturaleza biológica del proceso de fermentación. El producto de la fermentación es el alcohol etílico, pequeñas cantidades de propanol, butanol, ácido acético, y ácido láctico; los alcoholes de alta concentración también se pueden formar¹⁴.

El alcohol etílico está familiarizado con las bebidas alcohólicas. En su forma no natural es usado como un solvente industrial y como materia prima para la manufactura de acetaldehído, acetato etílico, ácido acético, dibromito de etileno, glicol y muchos otros químicos orgánicos. El alcohol puro también puede ser utilizado para propósitos medicinales, farmacéuticos y saborizantes.

El etanol es un líquido incoloro y volátil que está presente en diversas bebidas fermentadas. Desde la antigüedad se obtenía el etanol por fermentación anaeróbica de una disolución con contenido en azúcares con levadura y posterior destilación.

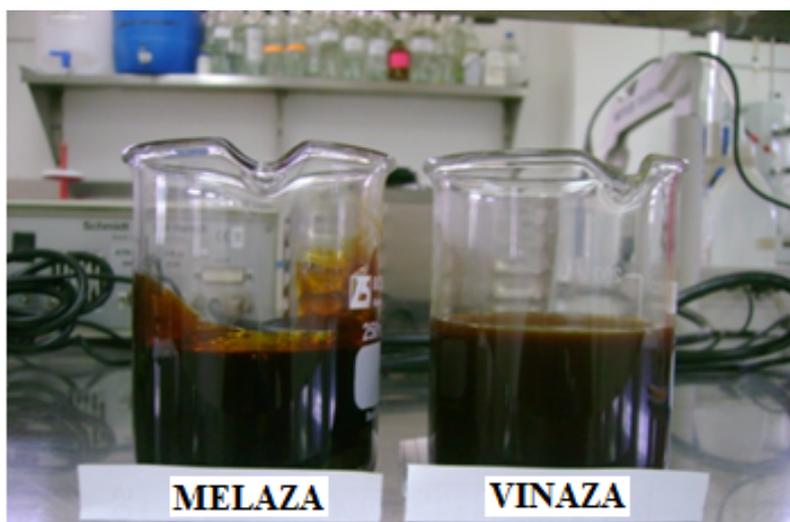
Dependiendo del género de bebida alcohólica que lo contenga, el etanol aparece acompañado de distintos elementos químicos que lo dotan de color, olor, sabor, entre otras características.

1.2.1. Vinaza de la caña de azúcar

La vinaza es un material líquido resultante de la producción de alcohol etílico, ya sea por destilación de la melaza fermentada o de la fermentación directa de los jugos de caña. Su origen son entonces, las plantas de caña de azúcar por lo que su composición elemental debe reflejar la del material de procedencia. Se trata de un material orgánico líquido que puede contener como impurezas sustancias procedentes del proceso de extracción de los jugos y de la fermentación. En ningún caso elementos extraños, tóxicos o metales pesados.

¹⁴<http://nubiavalcarcel.files.wordpress.com/2009/06/fermentacion.jpg>

Imagen 1: Muestras de melaza y vinaza



Fuente: Los autores.

Puesto que su origen es la planta de caña, la vinaza está compuesta por materiales orgánicos y nutrientes minerales que hacen de compuestos y constituyentes vegetales como aminoácidos, proteínas, lípidos, ácidos diversos, enzimas, bases, ácidos nucleicos, clorofila, lignina, quinonas, ceras, azúcares, hormonas, etc. La naturaleza en forma normal descompone estos materiales en procesos microbiológicos y recicla los elementos minerales, lo que hace lógico pensar que el destino final de la vinaza deba ser su regreso al suelo (XI Congreso Ecuatoriano de la ciencia del Suelo, Octubre 2008).

1.2.1.1. Composición físico-química de la vinaza

La composición de la vinaza depende de las características de la materia prima usada en la producción de alcohol, ya sea de melaza, jugo de caña o de la combinación de melaza y jugo, del sustrato empleado en la fermentación, del tipo y eficiencia de la fermentación y destilación y de las variedades y maduración de la caña. La vinaza, resultante de la destilación de melaza fermentada, tiene una composición elemental interesante y contiene todos los componentes del vino que han sido arrastrados por el vapor de agua así como cantidades de azúcar residual y componentes volátiles. De manera general, los constituyentes son los siguientes:

- Sustancias inorgánicas solubles en las cuales predominan los iones K, Ca y SO₄.
- Células muertas de levadura.
- Sustancias orgánicas resultantes de los procesos metabólicos de levaduras y microorganismos contaminantes.
- Alcohol y azúcar residual
- Sustancias orgánicas insolubles.
- Sustancias orgánicas solubles.

El Cuadro 3, se presenta algunos compuestos orgánicos de la vinaza. Es importante recordar que la composición de la vinaza depende de las características de la materia prima usada en la producción de alcohol, melaza, jugos o miel, del sustrato empleado en la fermentación, del tipo y eficiencia de la fermentación y destilación y de las variedades y maduración de la caña.

Cuadro 3: Compuestos orgánicos de la vinaza

Compuesto	Concentración (% m/m)
2,3 butanodiol	0.01
2-metil -1,3 butanodiol	0.20
Glicerol	2.70
Sorbitol	1.40
Acido láctico	1.30
Acido succínico	0.70
Acido málico	0.23
Acido aspártico	0.05
Acido aconítico	1.80
Acido cítrico	0.80
Acido quínico	0.70
fructofuranosa	0.50
glucopiranososa	0.30
Sacarosa	0.20
Trehalosa	0.30

Fuente: Nota Técnica, usos alternativos de la vinaza¹⁵.

¹⁵ Estudio realizado por el Ing. Quim. Gonzalo Berón Medina. TECNICAÑA

De acuerdo con el Cuadro 3, en la vinaza, se encuentra una gama amplia de compuestos orgánicos: alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres, ácidos azúcares. La presencia de estos compuestos en la vinaza tienen diferentes orígenes: provienen de la melaza, del proceso de fermentación del alcohol, se producen por degradación térmica en el proceso de destilación del vino obtenido en la etapa de fermentación alcohólica. Entre los compuestos identificados, los de mayor concentración fueron el glicerol, el ácido láctico y el sorbitol.

1.2.2. Impacto ambiental ocasionado por la vinaza

Durante el proceso industrial de la caña se origina gran cantidad de residuos o subproductos, técnica y económicamente factibles de emplearse para el fertirriego, producción de energía alternativa, alimento para balanceado animal. Durante la transformación de las melazas en alcohol, se obtiene vinaza, desecho altamente contaminante del medio ambiente por su alta carga orgánica y contenido de potasio.

Debido a su elevado contenido de materia orgánica, la vinaza se constituye en un material altamente contaminante, si se dispone directamente a un cuerpo de agua, ya que los valores de DQOs¹⁶ y DBO¹⁷ para un contenido aproximado de 10% de sólidos m/m son 116000 y 41200 mg/L respectivamente, lo cual hace necesario su tratamiento antes de ser eliminado.

La vinaza es uno de los contaminantes más problemáticos del curso de agua por:

- Alto DBO por lo que requiere alta cantidad de oxígeno para oxidarse.
- Volumen de producción elevados en las destilería 11-15 lt vinaza /lt alcohol.
- Alta acidez y corrosividad.
- Alto riesgo para la vida y reproducción de fauna y microflora acuática.
- Su almacenamiento en grandes reservorio emite gases de efecto invernadero.

¹⁶ Demanda Química de Oxígeno, soluble. DQO_s

¹⁷ Demanda Biológica de Oxígeno, DBO.

- Impacto de olores ofensivos al ambiente.

1.2.3. Alternativas de uso de la vinaza

La vinaza es un residuo de la fermentación y destilación del alcohol, cuya composición varía ampliamente con el proceso de destilación empleado, la materia prima utilizada, el sistema de preparación del medio, la conducción de la fermentación y el tipo de levaduras empleadas en el proceso, etc. El tema vinculado con el tratamiento, reducción de la carga poluente y posible uso de la vinaza reviste gran interés ambiental y económico, y constituye uno de los elementos que posibilita o inhabilita en un alto grado el desarrollo de un plan para producir alcohol.

Genéricamente las opciones de manejo técnico de las vinazas pueden resumirse en las siguientes acciones:

- Aplicación al suelo como fertilizante.
- Concentración por evaporación
- Fermentación anaeróbica para la producción de Metano.
- Bioconversión para la producción de Biomasa
- Incineración de Vinaza concentrada
- Otros tratamientos que reducen su carga poluente se basan en principios de índole: químico, microbiológico, incorporación en Medios de Cultivo, proceso de dilución y adición de bacterias amoniacales, etc.

1.3. Fermentación anaeróbica para producir biogás

La fermentación anaeróbica es un proceso natural que ocurre en forma espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico¹⁸. De esta forma podemos encontrar el denominado "gas de los pantanos" que brota en aguas estancadas, el gas natural metano de los yacimientos petrolíferos así como el gas producido en el tracto digestivo de los rumiantes como los bovinos. En todos estos procesos intervienen las denominadas bacterias metanogénicas.

¹⁸<http://www.manuales.com/manual-de/fermentacion-anaerobica>

Las primeras menciones sobre biogás se remontan al 1.600 identificados por varios científicos como un gas proveniente de la descomposición de la materia orgánica. En el año 1890 se construye el primer biodigestor a escala real en la India y ya en 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad.

Tras las guerras mundiales comienza a difundirse en Europa las llamadas fábricas productoras de biogás cuyo producto se empleaba en tractores y automóviles de la época.

En todo el mundo se difunden los denominados tanques Inhof para el tratamiento de aguas cloacales colectivas. El gas producido se lo utilizó para el funcionamiento de las propias plantas, en vehículos municipales y en algunas ciudades se lo llegó a inyectar en la red de gas comunal.

Durante los años de la segunda guerra mundial comienza la difusión de los biodigestores a nivel rural tanto en Europa como en China e India que se transforman en líderes en la materia.

Esta difusión se ve interrumpida por el fácil acceso a los combustibles fósiles y recién en la crisis energética de la década del 70 se reinicia con gran ímpetu la investigación y extensión en todo el mundo incluyendo la mayoría de los países latinoamericanos.

Los últimos 20 años han sido fructíferos en cuanto a descubrimientos sobre el funcionamiento del proceso microbiológico y bioquímico gracias al nuevo material de laboratorio que permitió el estudio de los microorganismos intervinientes en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno).

Estos progresos en la comprensión del proceso microbiológico han estado acompañados por importantes logros de la investigación aplicada obteniéndose grandes avances en el campo tecnológico.

Los países generadores de tecnología más importantes en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EE.UU., Filipinas y Alemania.

Las plantas de tratamiento de desechos industriales, han tenido una importante evolución en los últimos años y habiendo superado una primera etapa a nivel piloto, en Europa y China se encuentran actualmente siendo difundidas para determinados fines en combinación con tratamientos aeróbicos convencionales.

Estos reactores anaeróbicos son de enormes dimensiones (más de 1.000 m³ de capacidad), trabajan a temperaturas mesolíticas (20°C a 40°C), o termofílicas (más de 40°C) poseen sofisticados sistemas de control y están generalmente conectados a equipos de cogeneración que brindan como productos finales; calor, electricidad y un efluente sólido de alto contenido proteico, para usarse como fertilizante o alimento de animales.

A nivel latinoamericano, se ha desarrollado tecnología propia en la Argentina para el tratamiento de vinazas, residuo de la industrialización de la caña de azúcar. En Brasil y Colombia se encuentran utilizando sistemas europeos bajo licencia.

El número de reactores de este tipo aún no es importante en el pero los continuos descubrimientos, reducciones de costos y mejoramiento de la confiabilidad hacen suponer un amplio campo de desarrollo en el futuro.

La aplicación del biogás en el área rural ha sido muy importante dentro de ella se pueden diferenciar dos campos claramente distintos. En el primero, el objetivo buscado es dar energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los agricultores de zonas marginales o al productor medio de los países con sectores rurales de muy bajos ingresos y difícil acceso a las fuentes convencionales de energía.

En este caso la tecnología desarrollada ha buscado lograr digestores de mínimo costo y por último, mantenimiento fáciles de operar pero con eficiencias pobres y bajos niveles de producción de energía.

El segundo tipo de tecnología está dirigido al sector agrícola y agroindustrial de ingresos medios y altos. El objetivo buscado en este caso es brindar energía y solucionar graves problemas de contaminación. Los digestores de alta eficiencia desarrollados para esta aplicación tienen un mayor costo inicial y poseen sistemas que hacen más complejo su manejo y mantenimiento.

Ambos tipos de digestores se encuentran hoy día en continua difusión. Los reactores sencillos han tenido una amplia aceptación en China, India, Filipinas y Brasil; debido a que en estos países se ejecutaron importantes planes gubernamentales que impulsaron y apoyaron con asistencia técnica y financiera su empleo. En el resto de los países del mundo la difusión alcanzada por este tipo de digestores no ha sido significativa

Con respecto a los digestores de alta eficiencia la mayoría se encuentran instalados en Europa (se estima un total de 500 digestores en los países de la C.E.E.); en el resto del mundo no se ha superado aún la etapa de unidades demostrativas o emprendimientos particulares aislados.

El tratamiento de líquidos cloacales mediante sistemas anaeróbicos solos o combinados con tratamientos aeróbicos es una técnica muy difundida en todo el mundo desde hace más de 40 años. Para tener una idea de su importancia el gas generado por esta técnica en Europa alcanzaba en el año 1975 un total de casi 240 millones de m³ anuales de biogás.

Recientes progresos en equipos de cogeneración han permitido una más eficiente utilización del gas generado y los continuos avances en las técnicas de fermentación aseguran un sostenido desarrollo en este campo.

Debe tenerse en cuenta que la incorporación de esta tecnología obliga a una estricta regulación en cuanto a tipo de productos que se vierten en los sistemas cloacales urbanos; por este motivo en algunos países donde los desechos industriales son vertidos sin tratar en las cloacas los reactores anaeróbicos han tenido graves problemas de funcionamiento y en muchos casos han sido abandonados.

El relleno sanitario, práctica muy difundida en el mundo para eliminar las enormes cantidades de desperdicios generados en las grandes ciudades han evolucionado incluyendo hoy en día modernas técnicas de extracción y purificación del gas metano generado el cual en décadas pasadas generaba graves problemas, entre los cuales figuraba el ambiental, por muerte de la vegetación que se encontraba en las zonas cercanas, malos olores que molestaban a los residentes y explosivas mezclas de gases que se acumulaban en los sótanos de la vecindad.

El avance de esta técnica ha permitido que importantes ciudades del mundo, como es el caso de Santiago de Chile en América Latina, incluya un importante porcentaje de gas procedente de esta fuente en la red de distribución urbana de gas natural.

Todos los campos de aplicación analizados muestran que la tecnología bajo estudio se encuentra en una franca etapa de perfeccionamiento y difusión.

Las causas que motivarán y regularán su futura expansión se encuentran centradas en dos aspectos críticos del futuro como son la energía y la contaminación.

1.3.1. Composición y características del biogás

Se llama biogás a la mezcla constituida por metano CH_4 en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno.

1.3.2. Principios de la fermentación anaeróbica

La generación de biogás, mezcla constituida fundamentalmente por metano (CH_4) dióxido de carbono (CO_2), y pequeñas cantidades de hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno (SH_2) y nitrógeno (N) constituye un proceso vital dentro del ciclo de la materia orgánica en la naturaleza.

Las bacterias metanogénicas en efecto constituyen el último eslabón de la cadena de microorganismos encargados de digerir la materia orgánica y devolver al medio los elementos básicos para reiniciar el ciclo. Se estima que anualmente la actividad

microbiológica libera a la atmósfera entre 590 y 880 millones de toneladas de metano.

La fermentación anaeróbica involucra a un complejo número de microorganismos de distinto tipo los cuales pueden ser divididos en tres grandes grupos principales. La real producción de metano es la última parte del proceso y no ocurre si no han actuado los primeros dos grupos de microorganismos.

Las bacterias productoras del biogás son estrictamente anaeróbicas y por lo tanto sólo podrán sobrevivir en ausencia total de oxígeno atmosférico.

Otra característica que las identifica es la sensibilidad a los cambios ambientales debido a lo cual será necesario un mantenimiento casi constante de los parámetros básicos como la temperatura.

Las dificultades en el manejo de estas delicadas bacterias explican que la investigación sistemática tanto de su morfología como de la bioquímica fisiológica sólo se halla iniciado hace cincuenta años.

Hoy en día gracias a estudios muy recientes podemos conocer mejor el mecanismo y funcionamiento de este complejo sistema microbiológico involucrado en la descomposición de la materia orgánica que la reduce a sus componentes básicos CH_4 ¹⁹ y CO_2 .

1.3.3. Fases que intervienen en la biodigestión anaeróbica

Las diferentes etapas intervinientes y sus principales características:

1.3.3.1. Fase de hidrólisis: Las bacterias de esta primera etapa toman la materia orgánica virgen con sus largas cadenas de estructuras carbonadas y las van rompiendo y transformando en cadenas más cortas y simples (ácidos orgánicos) liberando hidrógeno y dióxido de carbono. Este trabajo es llevado a cabo por un

¹⁹ Gas metano, CH_4

complejo de microorganismos de distinto tipo que son en su gran mayoría anaerobios facultativos.

1.3.3.2. Fase de acidificación: Esta etapa la llevan a cabo las bacterias acetogénicas y realizan la degradación de los ácidos orgánicos llevándolos al grupo acético ($\text{CH}_3\text{-COOH}$) y liberando como productos Hidrógeno y Dióxido de carbono.

Esta reacción es endoenergética pues demanda energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que substraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de estas bacterias, haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético.

1.3.3.3. Fase metanogénicas: Las bacterias intervinientes en esta etapa pertenecen al grupo de las achibacterias y poseen características únicas que las diferencian de todo el resto de las bacterias por lo cual se cree que pertenecen a uno de los géneros más primitivos de vida colonizadoras de la superficie terrestre.

1.3.4. Factores que afectan a la producción de biogás

La actividad metabólica involucrada en el proceso metanogénico se ve afectada por diversos factores. Debido a que cada grupo de bacterias intervinientes en las distintas etapas del proceso responde en forma diferencial a esos cambios no es posible dar valores cualitativos sobre el grado que afecta cada uno de ellos a la producción de gas en forma precisa.

Entre los factores más importantes a tenerse en cuenta se desarrollarán los siguientes: el tipo de sustrato (nutrientes disponibles); la temperatura del sustrato; la carga volumétrica; el tiempo de retención hidráulico; el nivel de acidez (pH); la relación Carbono/Nitrógeno; la concentración del sustrato; el agregado de inoculantes; el grado de mezclado; y la presencia de compuestos inhibidores del proceso.

1.3.5. Tipos de materias primas utilizadas para producción de biogás

Las materias primas fermentables incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, alimenticias en general), restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas.

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Normalmente las sustancias orgánicas como los estiércoles y lodos cloacales presentan estos elementos en proporciones adecuadas. Sin embargo en la digestión de ciertos desechos industriales puede presentarse el caso de ser necesaria la adición de los compuestos enumerados o bien un post tratamiento aeróbico.

Las sustancias con alto contenido de lignina no son directamente aprovechables y por lo tanto deben someterse a tratamientos previos (cortado, macerado, compostado) a fin de liberar las sustancias factibles de ser transformadas de las incrustaciones de lignina.

En lo atinente a estiércoles animales la degradación de cada uno de ellos dependerá fundamentalmente del tipo de animal y la alimentación que hayan recibido los mismos.

Los valores tanto de producción como de rendimiento en gas de los estiércoles presentan grandes diferencias entre distintos autores.

Como norma se deberá tomar en cuenta que a raíz de estar trabajando en un medio biológico sólo los promedios estadísticos de una serie prolongada de mediciones serán confiables siempre y cuando figuren las condiciones en las cuales fueron realizadas las pruebas.

En cuanto al volumen de estiércol producido por las distintas especies animales son variables de acuerdo fundamentalmente al peso y al tipo de alimentación y manejo de los mismos. Cuando se encare un proyecto específico se recomienda realizar una serie de mediciones en el lugar donde se instalará el digestor.

1.3.6. Velocidad de carga volumétrica para digestores

Con este término se designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención.

Existen diferentes formas de expresar este parámetro siendo los más usuales los siguientes: kg de material/día; kg de materia seca/día; kg de sólidos volátiles/día todos expresados por metro cúbico de digestor.

Las cantidades de sólidos y sólidos volátiles se extraen afectando a las cantidades en kg de material cargado con los porcentajes de sólidos o sólidos volátiles que se obtiene por análisis. (Porcentaje de sólidos sometiendo al sustrato a desecación, 105°C hasta peso constante y extrayendo el siguiente coeficiente: (peso húmedo - peso seco)/peso húmedo.

El porcentaje de sólidos volátiles se obtiene sometiendo la muestra seca a la mufla, 560°C durante tres horas y extrayendo el siguiente coeficiente:

$$1 - ((\text{peso seco} - \text{peso ceniza}) / \text{peso seco}).$$

Un factor importante a tener en cuenta en este parámetro es la dilución utilizada, debido a que una misma cantidad de material degradable podrá ser cargado con diferentes volúmenes de agua.

1.3.7. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Este parámetro sólo puede ser claramente definido en los “sistemas discontinuos o batch” donde el TRH coincide con el tiempo de permanencia del sustrato dentro del digestor. En los digestores continuos y semicontinuos, el tiempo de retención se define como el valor en días del cociente entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria.

De acuerdo al diseño del reactor, el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir variables diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos debido a lo cual suelen determinarse ambos valores.

El TRH está íntimamente ligado con dos factores: el tipo de sustrato y la temperatura del mismo.

La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y consecuentemente serán menores los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material.

La relación costo beneficio es el factor que finalmente determinará la optimización entre la temperatura y el T.R., ya varían los volúmenes, los sistemas paralelos de control, la calefacción y la eficiencia.

Con relación al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa demandarán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos.

1.3.8. Valor de acidez en el biodigestor

Una vez estabilizado el proceso fermentativo el pH se mantiene en valores que oscilan entre 7 y 8,5. Debido a los efectos buffer que producen los compuestos bicarbonato-dióxido de carbono ($\text{CO}_2\text{-HCO}_3$) y Amonio -Amoníaco ($\text{NH}_4\text{-NH}_3$) el proceso en sí mismo tiene capacidad de regular diferencias en el pH del material de entrada.

Las desviaciones de los valores normales es indicativo de un fuerte deterioro del equilibrio entre las bacterias de la fase ácida y la fase metanogénicas provocado por severas fluctuaciones en alguno de los parámetros que gobiernan el proceso.

1.3.9. Diferentes aplicaciones del biogás²⁰

Las cocinas y calentadores son fácilmente modificables, agrandando el paso del gas de los quemadores. La amplia disponibilidad de este tipo de equipos hace promisorio e interesante su utilización a gran escala.

Las lámparas a gas tienen una muy baja eficiencia y el ambiente donde se las utilice debe estar adecuadamente ventilado para disipar el calor que generan.

Las heladeras domésticas constituyen un interesante campo de aplicación directo del biogás debido a que tienen un consumo parejo y distribuido a lo largo de las 24 horas del día lo cual minimiza la necesidad de almacenaje del gas. Estos equipos funcionan bajo el principio de la absorción (generalmente de ciclo amoníaco refrigerante - agua absorbente). Recientemente se han desarrollado equipos para el enfriamiento de leche y/u otros productos agrícolas lo que abre un importante campo de aplicación directa y rentable del mismo.

Los quemadores infrarrojos comúnmente utilizados en la calefacción de ambientes (especialmente en criaderos y parideras) presentan como ventaja su alta eficiencia lo cual minimiza el consumo de gas para un determinado requerimiento térmico.

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto nafteros como diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado una desventaja es su baja velocidad de encendido.

En los motores de Ciclo Otto el carburador convencional es reemplazado por un mezclador de gases. Estos motores son arrancados con nafta y luego siguen

²⁰<http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/usos>

funcionando con un 100% de biogás con una merma de la potencia máxima del 20% al 30%.

A los motores de Ciclo Diesel se les agrega un mezclador de gases con un sistema de control manteniendo el sistema de inyección convencional. De esta manera estos motores pueden funcionar con distintas proporciones de biogás diesel y pueden convertirse fácil y rápidamente de un combustible a otro lo cual los hace muy confiables.

El gasoil no puede ser reemplazado en los motores funcionando a campo del 85% al 90%, debido a que la autonomía conseguida menor comparada con la original.

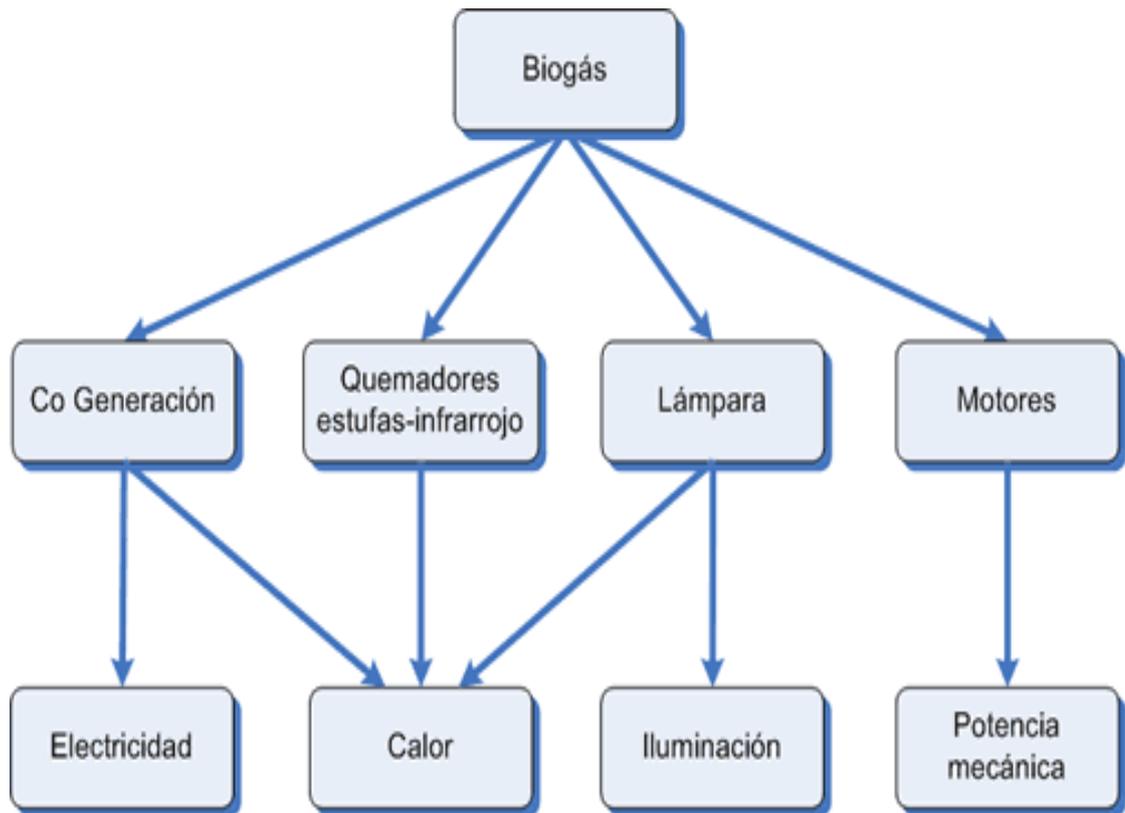
La proporción de H_2S ²¹ en el biogás causa deterioros en las válvulas de admisión y de escape de determinados motores obligando a un cambio más frecuente de los aceites lubricantes.

Los motores a biogás tienen amplio espectro de aplicación siendo los más usuales el bombeo de agua, el picado de raciones y el funcionamiento de ordeñadoras en el área rural. El otro uso muy generalizado es su empleo para activar generadores de electricidad.

En principio el biogás puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural. La Figura 1 resume las posibles aplicaciones.

²¹Gas Sulfhídrico, H_2S

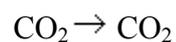
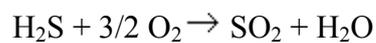
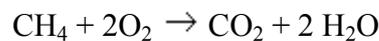
Figura 1: Diferentes usos del biogás



Fuente: <http://www.textoscientificos.com/energia>

El biogás mezclado con aire puede ser quemado en un amplio espectro de artefactos descomponiéndose principalmente en dióxido de carbono y agua (CO₂ y H₂O).

La combustión completa sin el exceso de aire y con oxígeno puro, puede ser representada por las siguientes ecuaciones químicas:



El requerimiento de aire mínimo sería del 21% pero esta cifra debe ser aumentada para lograr una buena combustión.

La relación aire-gas puede ser ajustada aumentando la presión del aire, incrementando la apertura de la válvula dosificadora de gas (el biogás requiere de una apertura 2 a 3 veces mayor a la utilizada por el metano puro y modificando la geometría del paso de aire desde el exterior).

Debido al contenido de dióxido de carbono, el biogás tiene una velocidad de propagación de la llama lenta, 43 cm/seg y por lo tanto la llama tiende a escaparse de los quemadores.

La presión para un correcto uso del gas oscila entre los 7 y los 20 mbar. Se debe tener especial cuidado en este aspecto debido a que se deberán calcular las pérdidas de presión de salida del gasómetro (adicionándole contrapesos en el caso de gasómetros flotantes).

El biogás puede ser utilizado en motores de combustión interna tanto a gasolina como diesel. El gas obtenido por fermentación tiene un octanaje que oscila entre 100 y 110 lo cual lo hace muy adecuado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, por otro lado una desventaja es su baja velocidad de encendido.

En el Cuadro 4 se han listado los principales artefactos que utilizan biogás juntamente a su consumo medio y su eficiencia.

Cuadro 4: Diferentes aplicaciones del biogás

ARTEFACTO	CONSUMO	RENDIMIENTO (%)
Quemador de cocina	300 - 600 l/h	50 - 60
Lámpara a mantilla (60W)	120 - 170 l/h	30 - 50
Heladera de 100 L	30 - 75 l/h	20 - 30
Motor a gas	0,5 m ³ /kWh o Hph	25 - 30
Quemador de 10 kW	2 m ³ /h	80 - 90
Infrarrojo de 200 W	30 l/h	95 - 99
Cogenerador	1 kW electricidad.	hasta 90
	0,5 m ³ /kwh	
	2kW térmica	

Fuente: <http://www.textoscientificos.com/energia>

1.4. Efecto invernadero y el calentamiento global²²

El efecto invernadero es el fenómeno natural causado por gases presentes en la atmósfera que retienen el calor del sol en la tierra, proporcionando la temperatura adecuada para la vida en el planeta. A estos gases se les llama Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Los GEI se producen de dos formas: a) de manera natural, y b) a partir de las actividades humanas: quema de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) para transporte o generación de energía eléctrica; agricultura; generación de desechos sólidos y líquidos; incendios forestales; actividad industrial; entre otras.

El calentamiento global o cambio climático sucede cuando el fenómeno de efecto invernadero es alterado por la actividad humana, la cual incrementa la cantidad de GEI retenidos en la atmósfera, ocasionando un incremento a largo plazo en la temperatura terrestre. En la Figura 2 se ilustran los dos fenómenos: El efecto invernadero y el calentamiento global.

A largo plazo la Tierra debe liberar al espacio la misma cantidad de energía que absorbe del sol. La energía solar llega en forma de radiación de onda corta, parte de la cual es reflejada por la superficie terrestre y la atmósfera.

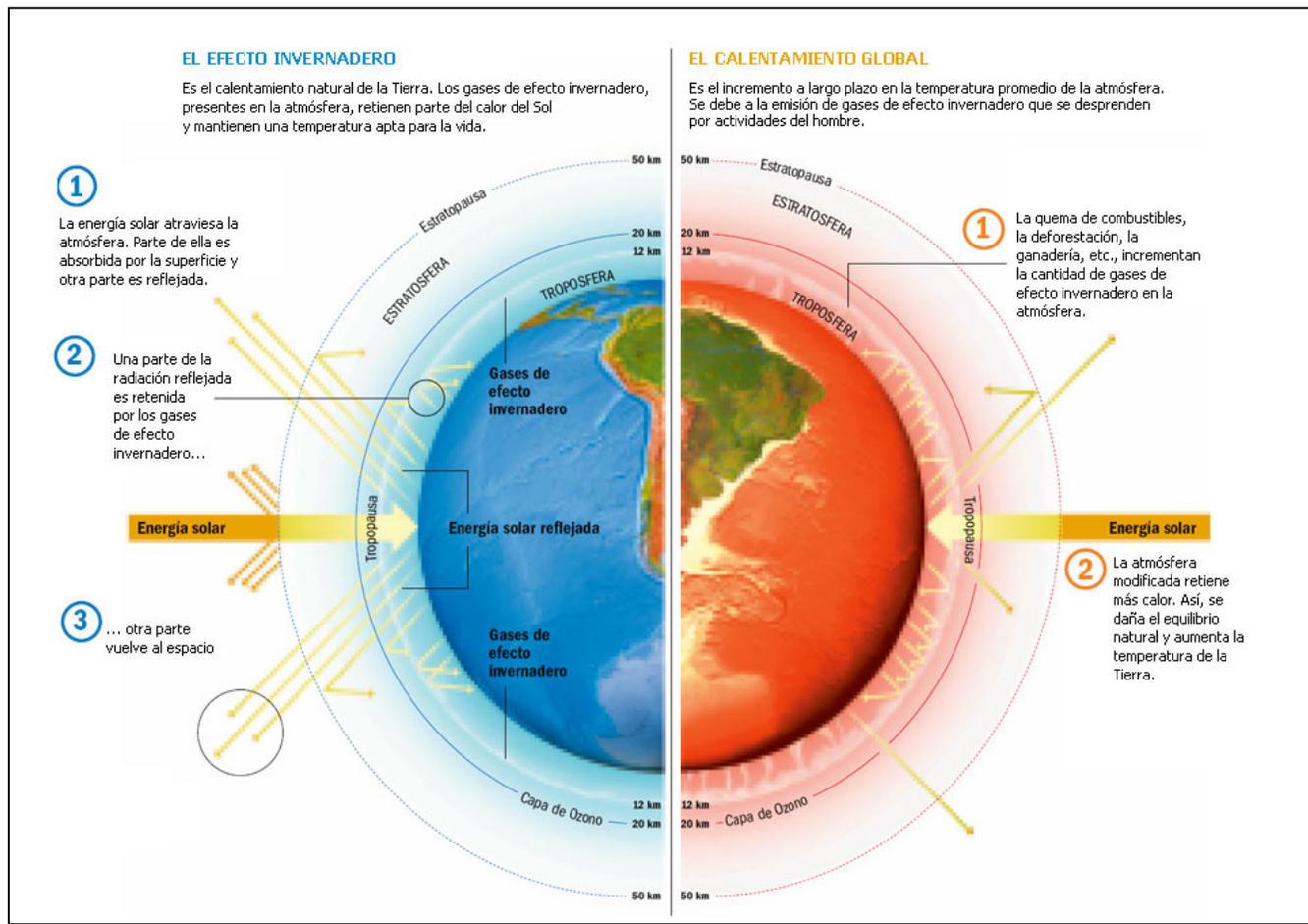
Sin embargo, la mayor parte pasa directamente a través de la atmósfera para calentar la superficie de la Tierra. Esta se desprende de dicha energía enviándola nuevamente al espacio en forma de radiación infrarroja de onda larga.

El vapor de agua, el dióxido de carbono y otros "gases de efecto invernadero (*GEI*)" que existen en forma natural en la atmósfera absorben gran parte de la radiación infrarroja ascendente que emite la Tierra, impidiendo que la energía pase directamente de la superficie terrestre al espacio.

²²Información tomada de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Programa para la Naciones Unidas para El Medio Ambiente PNUMA. (http://unfccc.int/portal_español/items/3093.php).

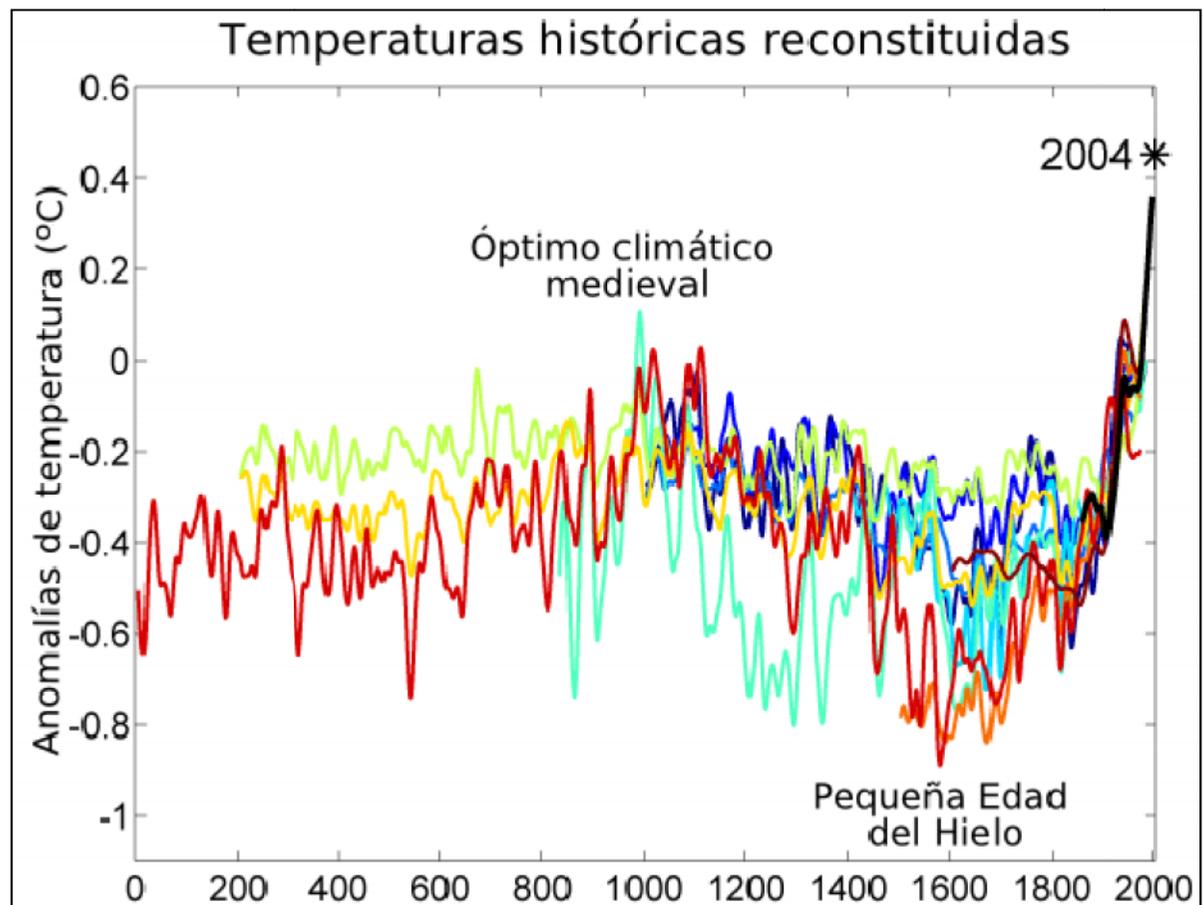
A su vez, procesos de acción recíproca (como la radiación, las corrientes de aire, la evaporación, la formación de nubes y las lluvias) transportan dicha energía a altas esferas de la atmósfera y de ahí se libera al espacio. (Figura 3).

Figura 2: Efecto Invernadero



Fuente: IPCC, Climate Change 2001: The Scientific, Technical Summary.

Figura 3: Temperaturas histórica reconstituidas.



Fuente: IPCC 2007. Dos mil años de temperaturas medias de acuerdo a varias reconstrucciones, se muestra tres picos importantes, el Periodo cálido medieval, luego la Pequeña Edad de Hielo y por último el año 2004.

1.4.1. Protocolo de Kyoto²³

El Protocolo de Kyoto es un acuerdo internacional vinculado a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. La principal característica del Protocolo de Kyoto es que establece objetivos vinculantes para 37 países industrializados y la Comunidad Europea para la reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Estos ascienden a un promedio de cinco por ciento en relación con los niveles de 1990 durante el periodo de cinco años de 2008 - 2012.

La principal diferencia entre el Protocolo y la Convención es que mientras la Convención alentó a los países industrializados para estabilizar las emisiones de GEI, el Protocolo compromete a hacerlo.

Reconociendo que los países desarrollados son los principales responsables de los altos niveles actuales de emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera como resultado de más de 150 años de actividad industrial, el Protocolo impone una carga más pesada en las naciones desarrolladas bajo el principio de “responsabilidades comunes pero diferenciadas”.

El Protocolo de Kyoto fue adoptado en Kyoto, Japón, el 11 de diciembre de 1997 y entró en vigor el 16 de febrero de 2005. Las disposiciones de aplicación del Protocolo fueron adoptados en la COP7²⁴ en Marrakech en 2001, y se llaman los "Acuerdos de Marrakech”.

En virtud del tratado, los países deben cumplir sus objetivos principalmente a través de medidas nacionales. Sin embargo, el Protocolo de Kyoto les ofrece un medio adicional de cumplimiento de sus objetivos por medio de tres basados en el mercado mecanismos.

Los mecanismos de Kyoto son los siguientes:

²³ Este protocolo compromete a los países industrializados a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero. <http://unfccc.int>

²⁴ Séptima reunión de las conferencias de las Partes (COP7) del Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB).

- El comercio de emisiones- “conocido como el mercado de carbono”.
- Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).
- La aplicación conjunta (AC).

Los mecanismos deben ayudar a estimular la inversión verde y ayudar a las partes a cumplir sus objetivos de emisiones de una manera costo-efectiva.

1.4.1.1. Objetivos de monitoreo de emisiones

En el marco del Protocolo, las emisiones de los países tienen que ser monitoreados y los registros precisos tienen que ser mantenidos de las operaciones realizadas.

Sistemas de Registros de seguimiento y registrar las transacciones por las Partes en virtud de los mecanismos. La Secretaría de Cambio Climático de la ONU, con sede en Bonn, Alemania, mantiene un registro internacional de transacciones para verificar que las transacciones sean compatibles con las normas del Protocolo.

Informes de las Partes se realiza por medio de la presentación de los inventarios anuales de emisiones y los informes nacionales en virtud del Protocolo, a intervalos regulares.

Un cumplimiento del sistema se asegura de que las Partes están cumpliendo con sus compromisos y les ayuda a cumplir con sus compromisos si tienen problemas para hacerlo así.

Adaptación: El Protocolo de Kyoto, al igual que la Convención, también está diseñado para ayudar a los países a adaptarse a los efectos adversos del cambio climático. El “Fondo de Adaptación” fue establecido para financiar proyectos y programas de adaptación en países en desarrollo que son Partes en el Protocolo de Kyoto. El Fondo se financia principalmente con una participación de los ingresos de las actividades de proyectos del MDL.

El Protocolo de Kyoto es generalmente visto como un primer paso importante hacia un régimen de reducción de emisiones verdaderamente global que estabilizar las

emisiones de gases de efecto invernadero, y proporciona la arquitectura fundamental para cualquier futuro acuerdo internacional sobre cambio climático.

Al final del primer período de compromiso del Protocolo de Kyoto en 2012, un nuevo marco internacional debe de haber sido negociado y ratificado que puede ofrecer la reducción de emisiones estrictas del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha indicado claramente se necesitan.

1.4.1.2. Gases de efecto invernadero

En el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)²⁵ todas las partes que suscribieron y la ratificaron deben preparar y presentar su comunicación nacional, documento que presenta toda la información sistematizada de las iniciativas de mitigación y adaptación que realizan en sus países, y el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, el cual incluye los niveles de emisiones nacionales de aquellos gases controlados por el Protocolo de Kyoto utilizando las metodologías comparables que fueron acordadas por la Conferencia de las partes (COP).

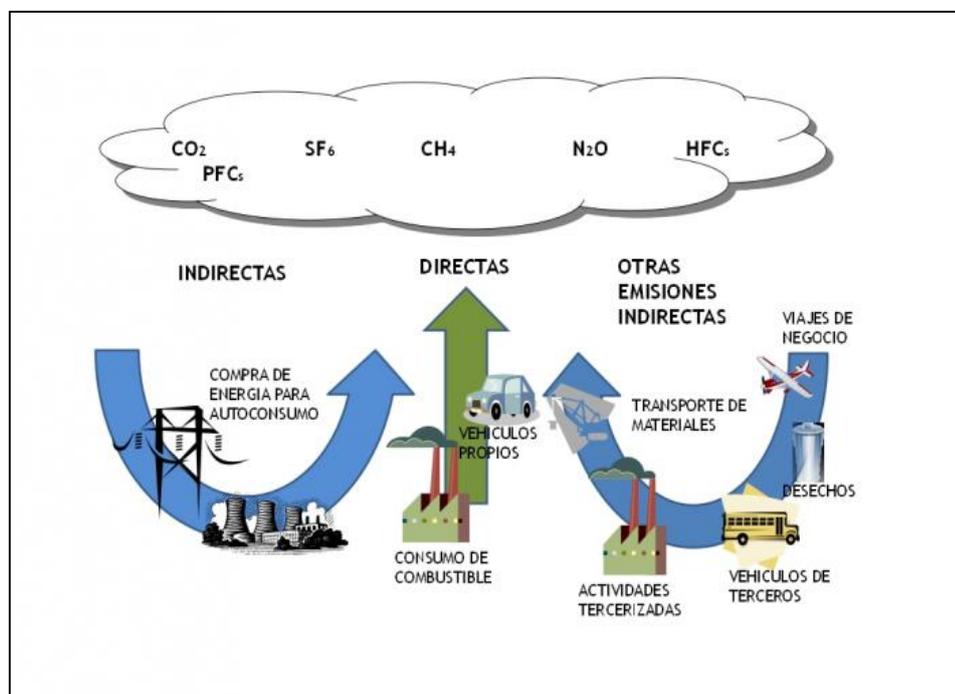
Los gases regulados bajo éste incluyen los 6 gases de efecto invernadero que no están siendo regulados por el Protocolo de Montreal. Los objetivos cubren las emisiones de los seis principales gases de efecto invernadero, a saber:

- El dióxido de carbono (CO₂): Gas natural liberado como producto de la combustión de combustibles fósiles, algunos procesos industriales y cambios en el manejo de uso del suelo.
- El metano (CH₄): Gas emitido en la minería del carbón, rellenos sanitarios, ganadería, agricultura y extracción de gas y petróleo.

²⁵Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Fue adoptada en New York, el 9 de mayo de 1992.

- El óxido nitroso (N₂O): Gas emitido durante la elaboración de fertilizantes y combustión de combustibles fósiles donde el sector transporte es usualmente el contribuyente más significativo.
- Los hidrofluorocarbonos (HFC): Se emite en algunos procesos industriales y es frecuentemente usado en refrigeración y equipos de aire acondicionado.
- Los perfluorocarbonos (PFC): Similar a los HFCs, PFCs fueron desarrollados e introducidos como una alternativa para los gases CFCs y HCFCs que destruían la capa de ozono. Estos gases son emitidos en una variedad de procesos industriales.
- Hexafluoruro de azufre (SF₆): Aunque este gas es emitido en muy pocos procesos industriales representa el más potente de los Gases de Efecto Invernadero (GEIs). Se emite durante la producción de magnesio y se aplica en algunos equipos eléctricos.

Figura 4: Gases de Efecto Invernadero



Fuente: <http://www.ambiente.gob.ec/?q=node/1664>

El 9 de junio de 1992, el Ecuador suscribió²⁶ la CMNUCC, ratificando sus objetivos, la aprobó mediante Resolución Legislativa el 22 de agosto de 1994 publicada en el Registro Oficial No. 532 del 22 de septiembre de 1994 y ratificó mediante Decreto Ejecutivo No. 2148 del 27 de septiembre de 1994 publicado en el Registro Oficial No. 549 del 4 de octubre de 1994.

El desarrollo de la Comunicación Nacional es un compromiso internacional que tiene el Ecuador, al haber ratificado la CMNUCC. El Artículo 12 de la CMNUCC indica que:

Cada una de las partes transmitirá a la Conferencia CMNUCC de las partes, por conducto de la secretaría, los siguientes elementos de información:

- a)** Un inventario nacional, en la medida que lo permitan sus posibilidades, de las emisiones antropogénicas por las fuentes y la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, utilizando metodologías comparables que promoverá y aprobará la Conferencia de las Partes;
- b)** Una descripción general de las medidas que ha adoptado o prevé adoptar para aplicar la Convención; y
- c)** Cualquier otra información que la Parte considere pertinente para el logro del objetivo de la Convención y apta para ser incluida en su comunicación, con inclusión de, si fuese factible, datos pertinentes para el cálculo de las tendencias de las emisiones mundiales.

Más recientemente, en la COP 16²⁷ dentro de los Acuerdos de Cancún, se decidió “que los países en desarrollo, consistentemente con sus capacidades, y el nivel de apoyo que se provea para el reporte, deberán remitir reportes de actualización bianuales que contengan reportes del inventario nacional de gases de efecto

²⁶ Ministerio del ambiente ecuatoriano: <http://www.ambiente.gob.ec>

²⁷COP 16 es la 16ª edición de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio Climático.

invernadero, incluyendo un reporte del inventario e información sobre las acciones de mitigación, necesidades y apoyo recibido”.

El Plan Nacional para el Buen Vivir en su política, estipula la necesidad de “Prevenir, controlar y mitigar la contaminación ambiental como aporte para el mejoramiento de la calidad de vida”.

Los gases de efecto invernadero tratado en el Protocolo de Kyoto, se indica seis gases a reducir, ver Cuadro 5, y cada uno de ellos tiene un potencial diferente a saber:

Cuadro 5: Equivalencia de gases de efecto invernadero

Gases de Efecto Invernadero	Fórmula condensada	Equivalencia en CO2 de una medida de gas (CO2e)
Dióxido de Carbono.	CO ₂	1
Metano.	CH ₄	21
Óxido Nitroso.	N ₂ O	310
Hidrofluorocarbonos.	HFC	740
Perfluorocarbonos.	PFC	1300
Hexafluoruro de azufre.	SF ₆	23900

Fuente: Protocolo de Kyoto

1.4.2. Mecanismo de Desarrollo Limpio²⁸

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que se define en el artículo 12 del Protocolo, permite a un país con un compromiso de reducción de emisiones o la emisión de limitación del Protocolo de Kyoto (anexo B) para implementar un proyecto de reducción de emisiones en países en desarrollo. Estos proyectos pueden ser vendibles de reducciones certificadas de las emisiones (RCE), cada uno

²⁸ MDL: Clean Development Mechanism (CDM, por sus siglas en inglés). La página web oficial es: <http://unfccc.int/cdm>.

equivalente a una tonelada de CO₂, que se puede contar en el cumplimiento de los objetivos de Kyoto.

El mecanismo es visto por muchos como un pionero. Es la primera inversión global, ambiental y plan de crédito de su clase, proporcionando un desplazamiento de las emisiones estandarizadas de instrumentos, RCE.

1.4.2.1 Autoridad Nacional (AN)²⁹

De acuerdo a la normativa del MDL, a la Autoridad Nacional MDL (AN-MDL) le compete, entre otros puntos, emitir cartas de aprobación de proyectos MDL en el Ecuador. Para el efecto, la AN-MDL adopta los respectivos procedimientos.

La estructura básica de la AN-MDL contempla un Presidente, el Coordinador y el Grupo de Evaluación. La Presidencia la ejerce el/a Ministro/a del Ambiente, quien nombra al Coordinador. El Grupo de Evaluación, se conforma de acuerdo a las particularidades de cada proyecto presentado.

El Ministerio del Ambiente es la Autoridad Nacional Designada por el país ante el Protocolo de Kyoto, para revisar y otorgar la Carta de Aprobación Nacional a los proyectos propuestos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio y Cartas de Respaldo a la Nota Idea del Proyecto dentro del MDL.

Se creó la AN-MDL mediante Resolución Ministerial 015, publicada en el Registro Oficial N° 86 de mayo del 2003, la Ministra de Ambiente Ab. Marcela Aguiñaga es la Presidenta de la AN-MDL y la Ing. Alexandra Buri es la Coordinadora de la AN-MDL.

Para que un proyecto participe en el Mecanismo para un Desarrollo Limpio debe cumplir con las siguientes condiciones siguientes:

²⁹<http://www.ambiente.gob.ec/?q=node/718>

1.4.2.2.Importancia de la AN-MDL

Para calificar como MDL, los proyectos deben contar con la aprobación del país anfitrión, entendido como aquel en el que se desarrollará el proyecto. El país anfitrión tiene la responsabilidad de confirmar si el proyecto propuesto contribuye al desarrollo sostenible del país. La aprobación del país anfitrión está a cargo de la AN-MDL y el proponente deberá acoger los procedimientos nacionales emitidos.

1.4.2.3. Funciones de la AN-MDL

- Representación Nacional e Internacional.
- Adopción de procedimientos nacional para la gestión de propuestas de proyectos dentro del Mecanismo para un Desarrollo Limpio, conforme a sus Reglas y Modalidades del MDL establecida en la decisión 17CP7³⁰ del Protocolo de Kyoto y los Acuerdos de Marrakech.
- Atender requerimientos de proponentes.
- Establecer vínculos nacionales e internacionales necesarios.
- Designar al Coordinador de la AN-MDL.

1.4.2.4. Procedimientos Nacionales

El presente procedimiento rige para las actividades de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto de invernadero y secuestro de carbono.

- Actividades de proyectos de pequeña escala de energía renovable con una capacidad de producción máxima de hasta 15 megavatios (o un equivalente apropiado).
- Actividades de proyectos de gran escala de energía renovable con una capacidad de producción desde 15 megavatios (o un equivalente apropiado).

³⁰Modalidades y procedimientos de un mecanismo para un desarrollo limpio, definido en el artículo 12 del Protocolo de Kyoto. Decisión 17CP7

- Actividades de proyectos de pequeña escala de mejoramiento de la eficiencia energética que reduzcan el consumo de energía por el lado de la oferta y/o demanda, en hasta el equivalente de 60 gigavatios-hora por año.
- Actividades de proyectos de gran escala de mejoramiento de la eficiencia energética que reduzcan el consumo de energía por el lado de la oferta desde 60 gigavatios-hora por año.
- Otras actividades de proyectos de pequeña escala que reduzcan emisiones antropogénicas por las fuentes y emitan directamente menos de 60 kilotoneladas de dióxido de carbono equivalentes por año.
- Otras actividades de proyectos de gran escala que reduzcan emisiones antropogénicas por las fuentes y emitan directamente más de 60 kilotoneladas de dióxido de carbono equivalentes por año.
- El cobro de tasas de evaluación preliminar y final de proyectos MDL se rige en el Acuerdo Ministerial 105.
- Acuerdo específico entre la Autoridad Nacional MDL y el Proponente del Proyecto.

1.4.3. Detalles del funcionamiento MDL

Un proyecto MDL debe proporcionar reducciones de emisiones que sean adicionales o lo que hubiera ocurrido. Los proyectos deben clasificarse a través de un registro riguroso y público y el proceso de emisión. La autorización se concede por las autoridades designadas. La financiación pública para actividades de proyectos MDL no debe conducir a la desviación de la asistencia oficial para el desarrollo.

El mecanismo es supervisado por la junta Ejecutiva del MDL, responsable en última instancia a los países que han ratificado el Protocolo de Kyoto.

Desde principios del año 2006, el mecanismo ya ha registrado más de 1.650 proyectos y se prevé que producirá RCE por valor de más de 2,9 millones de toneladas de CO2 equivalente en el primer período de compromiso del Protocolo de Kyoto, 2008-2012.

Una actividad de proyecto MDL podría implicar, por ejemplo, un proyecto de electrificación rural con paneles solares o la instalación de más calderas de alto rendimiento.

El mecanismo estimula el desarrollo sostenible y la reducción de emisiones, al tiempo que los países industrializados cierta flexibilidad en la forma de cumplir con sus objetivos de reducción de emisiones o de limitación.

1.4.3.1. Línea base

La línea base de una actividad de proyecto MDL es el escenario que represente las emisiones antropogénicas por las fuentes de gases de efecto invernadero (GEI) que se producirían de no realizarse la actividad de proyecto propuesta. El criterio de la línea base es el fundamento de la metodología de línea base. La Junta Ejecutiva (JE) convino en que los tres criterios eran los únicos aplicables a las actividades de proyecto del MDL. Estos criterios son:

- Las emisiones efectivas del momento o del pasado, según se aplique;
- Las emisiones con una tecnología que represente una línea de acción económicamente atractiva, teniendo en cuenta los obstáculos a las inversiones.
- Las tasas promedios de emisiones de actividades de proyecto análogas realizadas en los cinco años anteriores en circunstancias sociales, económicas, ambientales y tecnológicas parecidas y con resultados que la sitúen dentro del 20% superior de su categoría.

1.4.3.2. Metodología de la Línea Base

Una metodología es una aplicación de uno de los criterios enunciados en el párrafo 48³¹ de las modalidades y procedimientos del MDL a una actividad de proyecto concreta, teniendo en cuenta aspectos como el sector y la región. No se incluye a priori ninguna metodología para que los participantes en los proyectos puedan proponer las que estimen oportunas.

Los participantes en el proyecto pueden proponer una nueva metodología de línea base. En primer lugar se determinará cuál es el criterio más adecuado a la actividad de proyecto y, posteriormente, la metodología que debe aplicarse.

1.4.3.3. Adicionalidad

La condición de Adicionalidad de un proyecto se fundamenta en que la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero lograda por la actividad del proyecto sea mayor a la que se alcanzaría en el escenario de la base.

La JE del MDL³² elaboró una herramienta (“Tool for demonstration and assesment of adicinality”)³³ que permite evaluar y demostrar si un proyecto cumple con los requerimiento de adicionalidad.

La adicionalidad es un concepto estrechamente relacionado con la línea base, y es un tema importante a tener en cuenta cuando se determina dicha línea o cuando se elabora una metodología.

La definición de los Acuerdos de Marrakech establece que: “si las emisiones a través de la implementación del proyecto registrado son menores a las emisiones que se hubiesen producido de no realizarse el proyecto, entonces este proyecto MDL es adicional”.

³¹<http://unfccc.int/cdm>.

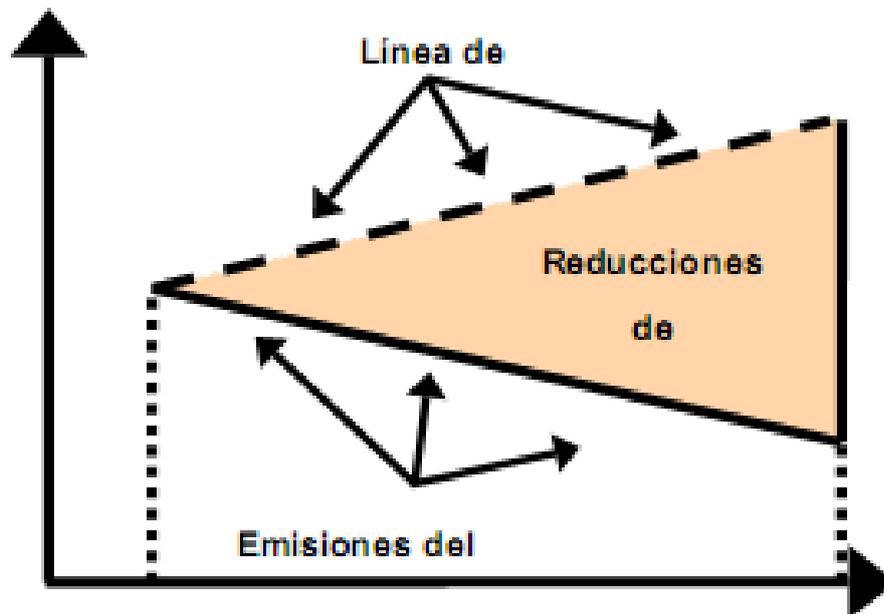
³² JE, Junta ejecutiva del mecanismo de desarrollo limpio, MDL

³³<http://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html>

Se debe demostrar que la reducción de emisiones que se logra a través de la implementación del proyecto no hubiera ocurrido en ausencia del mismo.

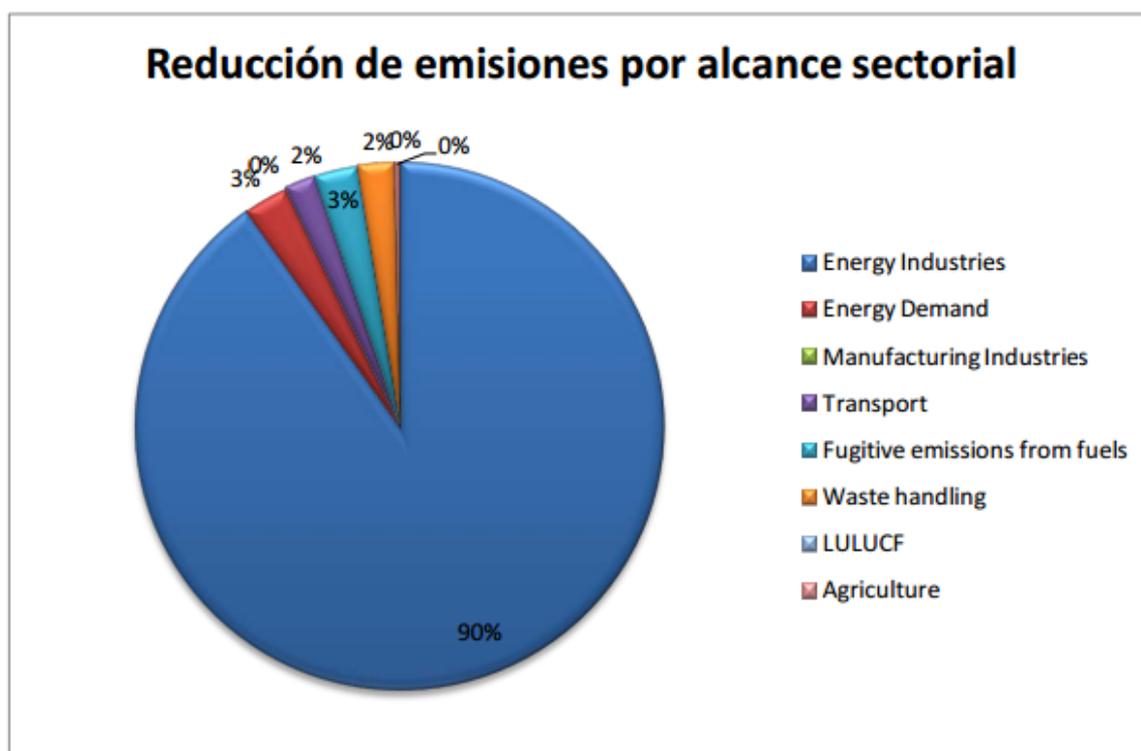
No existe una metodología generalizada y acordada para demostrar la adicionalidad.

Figura 5: Concepto de adicionalidad



Fuente: Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA)

Figura 6: Reducción de emisiones por alcance sectorial en Ecuador.



Fuente: Autoridad Nacional (Ecuador) Comisión de Mercado de Carbono, Septiembre 2011

1.4.3.4. Tipos de Proyectos para Mecanismo de Desarrollo Limpio³⁴

Existe 4 tipos de proyectos MDL para pequeña escala, que se fundamenta en la determinación de la línea base, la realización del monitoreo y los procesos de operación del proyecto.

Tipo I: Proyecto de energías con una capacidad de producción máxima de hasta 15 MW (megavatios). Los proyectos clasificados en esta categoría son:

- A. Generación de Energía eléctrica por el usuario.
- B. Energía mecánica para el usuario.

³⁴<http://cdm.unfccc.int/methodologies/SSCmethodologies/approved.html>

C. Energía térmica para el usuario.

D. Generación de electricidad por energía renovable para la red.

Tipo II: Proyectos de mejora de la eficiencia energética que reduzca el consumo de energía, del lado de la oferta y/o demanda, hasta el equivalente de 60 GWh/año. Los proyectos clasificados son:

A. Proyectos de mejora de la eficiencia energética por el lado de la oferta – transmisión y distribución.

B. Proyectos de mejora de la eficiencia energética por el lado de la oferta – generación eléctrica.

C. Proyectos de mejora de la eficiencia energética con aplicación de una tecnología específica por el lado de la demanda – programa de tecnología específica.

D. Proyectos de mejora de la eficiencia energética y sustitución de combustible en establecimientos e industrias.

E. Proyectos de mejora de la eficiencia energética y sustitución de combustibles en edificios.

F. Proyectos de mejora de la eficiencia energética y sustitución de combustibles aplicada a instalaciones agrícolas y sus actividades.

Tipo III: Otros proyectos que reduzcan las emisiones antropogénicas y además, emitan menos de 60 kilo toneladas (kt) de CO₂ / año. Los proyectos de este tipo son:

A. Agricultura.

B. Sustitución de combustible fósiles.

- C. Reducción de emisiones por vehículos adaptados para las emisiones reducidas de gases de efecto invernadero (GEI).
- D. Recuperación de metano.
- E. Evitación de emisiones de metano por descomposición de biomasa mediante la quema.
- F. Evitación de emisiones de metano por compostaje.
- G. Recuperación de gas de relleno sanitario.
- H. Recuperación de metano de tratamiento de desagües.
- I. Evitación de emisiones de metano mediante sustitución del tratamiento anaeróbico de desaguas por el tratamiento aeróbico.
- J. Evitación de la quema de combustibles fósiles para la producción de dióxido de carbono para ser usado como materia prima en procesos industriales.
- K. Evitación de la liberación de metano debido a la producción de carbón cambiando el método de quema en foso por el proceso de carbonización mecanizado.
- L. Evitación de la liberación de metano por descomposición de biomasa mediante e uso de pirolisis controlada.
- M. Reducción del consumo de electricidad mediante la recuperación de soda cáustica proveniente del proceso de fabricación de papel.

Proyectos MDL de pequeña escala: Proyectos de forestación y reforestación que secuestran menos de 8 kilotoneladas de CO₂ /año.

1.4.4. Ciclos para un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio

En un proyecto MDL se distinguen siete etapas representada en la Figura 7. “Etapas de Ciclo de Proyecto”:

Figura 7: Etapas de Ciclo de un proyecto MDL



Fuente: Los Autores.

1.4.4.1. Diseño del proyecto

Los participantes deberán evaluar la actividad de proyecto propuesta y los requisitos exigidos. A continuación deberán desarrollar el Documento de Diseño de Proyecto (PDD).

1.4.4.2. Validación

Evaluación independiente del diseño por un Entidad Operacional Designada (DOE), en relación con los requisitos del Mecanismo para un Desarrollo Limpio.

1.4.4.3. Registro

Aceptación oficial por la junta ejecutiva (JE) de un proyecto validado como proyecto MDL.

1.4.4.4. Implementación del diseño

Puesta en marcha del proyecto.

1.4.4.5. Monitoreo y vigilancia

Esta etapa incluye recopilación y archivo de todos los datos necesarios para medir o estimar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del proyecto MDL, de la base de referencia y cálculo de las reducciones de emisiones debidas al proyecto.

1.4.4.6. Verificación y certificación

Consiste en un examen independiente y periódico por un DOE de las reducciones de emisiones registradas; unida a la certificación escrita de la DOE confirmando las reducciones de emisiones durante un tiempo determinado.

1.4.4.7. Expedición de las reducciones certificadas de emisiones (CER) por la junta ejecutiva

Es la etapa final del ciclo del proyecto. El informe de certificación constituirá una solicitud a la junta ejecutiva de expedición de RCE³⁵ equivalentes a las reducciones de las emisiones antropógenas por las fuentes de gases de efecto invernadero que se hayan verificado.

³⁵ RCE, Reducción Certificadas de Emisiones.

CAPÍTULO II

INVESTIGACIÓN, MÉTODOS Y CÁLCULOS

2.1. Descripción del área de estudio y fuente de obtención de vinaza

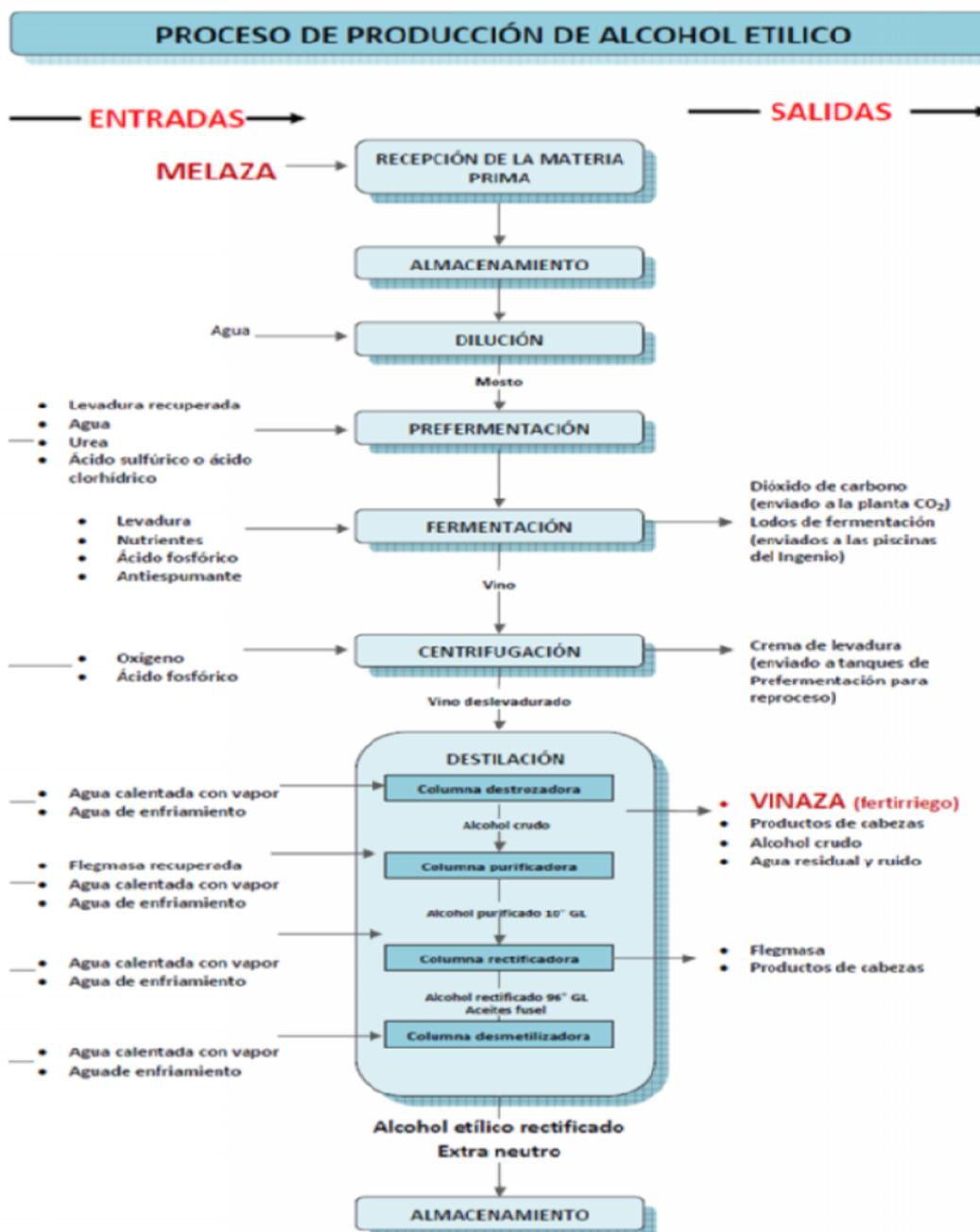
La Sociedad Agrícola e Industrial San Carlos S.A, uno de los mayores ingenios azucareros del Ecuador, crea en 1993 la Sociedad de Destilación de Alcoholes S.A (SODERAL S.A), la cual tiene como principal actividad, la producción de alcohol etílico, alcohol anhidro, alcohol crudo y recuperación de CO₂ de la fermentación de melaza y/o jugo de caña. Esta actividad industrial pertenece al código CIU³⁶ D1551.02 “Producción de Alcoholes etílicos y alcoholes neutros de cualquier graduación, desnaturalizados o sin desnaturalizar”.

Durante el proceso de producción de alcohol, las destilerías que utilizan como materia prima la melaza y/o jugo de caña de azúcar, generan un subproducto conocido como vinaza, que es descargada por la base de la primera columna de destilación. La vinaza es un líquido color café oscuro con densidad ligeramente superior al agua, de carácter ácido y con alta carga de DQO (Demanda Química de Oxígeno) y DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) la cual contiene una gran variedad de componentes que en conjunto le confieren características especiales, y su descarga indiscriminada e incontrolada puede generar impactos al ambiente.

Actualmente esta vinaza es almacenada en piscinas que están ubicadas estratégicamente para poderla utilizar para el fertirriego de las plantaciones de caña de azúcar. En el almacenamiento de la vinaza y por la descomposición natural de la materia orgánica se genera metano a la atmósfera (Figura 8)

³⁶Código Internacional Industrial Único, CIU

Figura 8: Diagrama de proceso de producción de alcohol etílico.



Fuente: Los Autores

2.2. Localización y duración del experimento

El trabajo experimental se desarrolló utilizando la vinaza de la destilería SODERAL S.A. perteneciente al Grupo Agroindustrial San Carlos de la provincia del Guayas. Esta planta produce, dependiendo de la materia prima que abastece el Ingenio San Carlos, entre 70 y 115 m³ diario de alcohol etílico para la época de Zafra (Julio a Diciembre) y 40 m³ para la época de no- zafra (Enero-Junio).

Las muestras fueron tomadas, en época de zafra, desde la tubería de salida de la columna de destilación durante el tiempo que duró la prueba.

Para el proceso de digestión anaeróbica se utiliza un reactor piloto tipo DAF (Downflow Anaerobic Filter, Filtro Anaeróbico de flujo Ascendente). Tecnología por la cual se hace ingresar el residual líquido (vinaza cruda) por la parte superior del tanque reactor anaeróbico en cuyo interior, las bacterias, están adherida a un medio inerte. Ver Imagen 2.

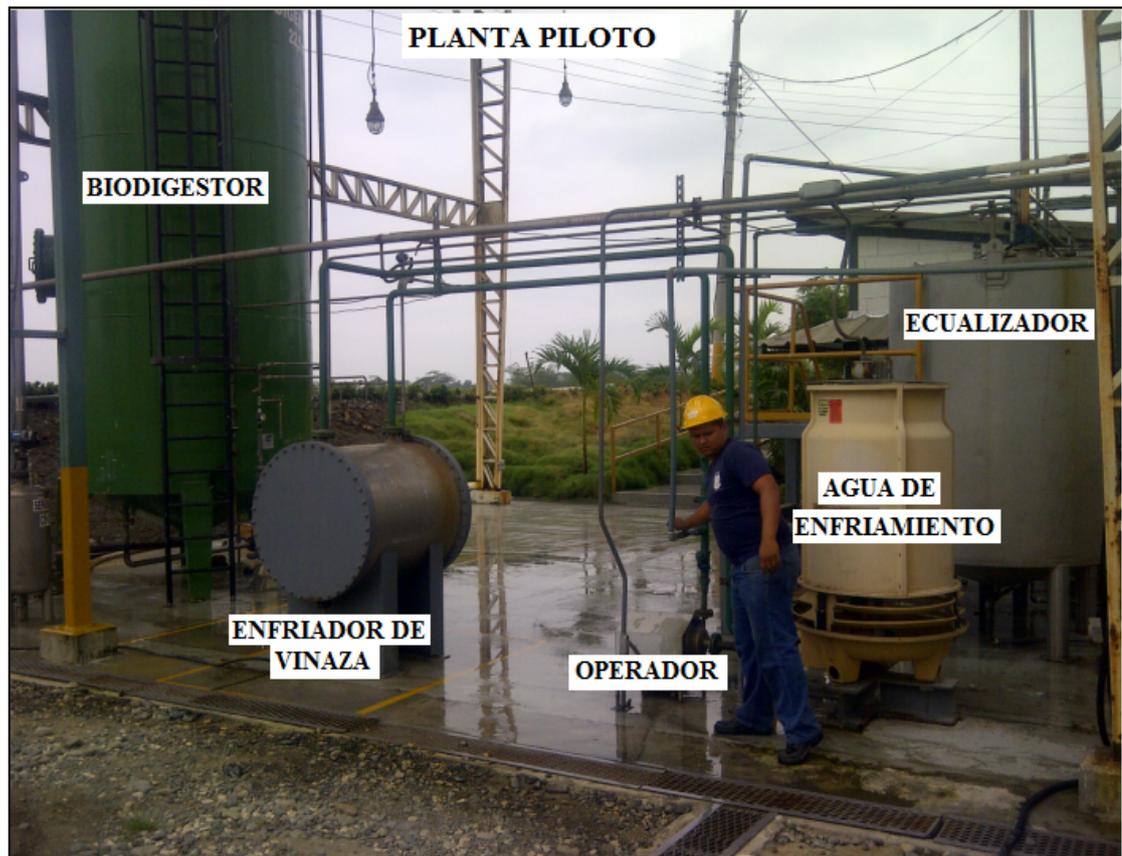
La elección de este tipo de reactor se basó en la disponibilidad del equipo que fue instalado para la investigación de la vinaza con el propósito de instalar un proyecto de biodigestión anaeróbica a escala real y manejar la vinaza de la destilería.

La planta piloto tiene para manejar una capacidad de 22.5 m³ de líquido en el biodigestor y manejar la alimentación, dependiendo de la carga orgánica que soporte. El equipo trabajó las 24 horas del día y fue controlado por 4 operadores en 3 turnos diarios, quienes recopilaron los datos diariamente y las muestras necesarias para los análisis realizados por un analista de que trabajó en el primer turno. Los datos fueron tabulados y supervisados por los autores de este estudio.

En el sistema, la vinaza influente, es alimentada por la parte superior del biodigestor a través de un sistema de bombeo desde el ecualizador que sirve par homogenizar la vinaza, el biogás producido fue quemado en un flare (mechero).

En el biodigestor se utilizó como inóculo, la vinaza tratada de la destilería CODANA S.A, esta decisión fue tomada atendiendo los buenos resultados obtenidos en la destilería y cantidad suficiente disponibles de estos lodos. La alimentación fue incrementada paulatinamente al biodigestor y, el tiempo transcurrido desde la carga hasta la etapa final del estudio fue de aproximadamente 97 días.

Imagen 2: Planta piloto de tratamiento de vinaza



Fuente: Los autores

Los indicadores de operación fueron:

- Régimen de trabajo: Alimentación continua.
- Carga orgánica de la vinaza aplicada.
- Velocidad de la carga orgánica volumétrica.
- Demanda Química de oxígeno total y soluble.
- Flujo de alimentación.
- Tiempo de retención hidráulica.
- pH de la vinaza influente (Vinaza cruda).
- Remoción de la carga orgánica.
- Producción de biogás.
- Contenido de metano en el biogás.
- Relación de ácidos grasos volátiles y alcalinidad.

2.3. Unidades experimentales

La unidad experimental se conformó de acuerdo a la producción de vinaza generada en la época de Zafra (Julio a Diciembre), en donde la melaza utilizada para la producción de alcohol no tiene un almacenamiento prolongado en los tanques.

La planta piloto está diseñada para tratar hasta 150 litros de vinaza por hora y manejar un tiempo de retención hidráulica de entre 10 y 14 días dependiendo del comportamiento del biodigestor y del DQO de la vinaza alimentada.

La vinaza en estudio es almacenada en un tanque de 10 mil litros antes del ecualizador. Se utilizaron equipos de laboratorio para medición del DQO, acidez volátil, Alcalinidad, % metano, % gas sulfhídrico, % bióxido de carbono, nitrógeno, fosfatos, sulfatos, pH, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV).

2.4. Materiales equipos e instalaciones necesarias para el estudio

Los materiales y equipos utilizados para la experimentación fueron los siguientes:

2.4.1. Tanque ecualizador (Capacidad 3000 litros).

ACCESORIOS:

Motor agitador de 0.65 KW.

Termómetro.

Motor de alimentación de 1 HP.

Tanque de recirculación de agua caliente.

Imagen 3: Ecuallizador



Fuente: Los autores.

Nota: Tanque ecualizador se lo utilizó para homogenizar la vinaza antes de ingresar al Biodigestor.

Imagen 4: Vinaza en el ecualizador



Fuente: Los autores.

Nota: La imagen nos muestra el tanque ecualizador lleno de vinaza.

Imagen 5: Nivel del Ecualizador



Fuente: Los autores.

Nota: En la imagen se muestra la adaptación de la manguera del nivel de llenado del ecualizador.

Imagen 6: Transporte de vinaza



Fuente: Los autores.

Nota: Traspaso de la vinaza al tanque de recepción

Imagen 7: Tanque de 10000 litros para recepción de vinaza



Fuente: Los autores.

Nota: Tanque de recepción de la vinaza antes del ecalizador.

2.4.2. Tanque enfriador de vinaza

Accesorios:

Transmisor de temperatura en la línea de salida.

Imagen 8: Enfriador de vinaza



Fuente: Los autores.

Nota: Enfriador de vinaza, utiliza agua para intercambio de calor

2.4.3 Torre piloto de enfriamiento

Accesorios:

Motor Ventilador de 1 HP.

Motor Bomba de 2 HP.

Termómetro.

Manómetro.

Imagen 9: Torre piloto de enfriamiento



Fuente: Los Autores.

Nota: El agua de la torre de enfriamiento es bombeada al enfriador

2.4.4. Tanque biodigestor (Capacidad: 22.5 metros cúbicos)

Accesorios:

Dos motores para recirculación de ½ HP.

Manómetro en la línea de descarga.

Transmisor de temperatura

Medidor de flujo de alimentación.

Válvula de seguridad.

Transmisor de presión.

Transmisor de nivel.

Imagen 10: Biodigestor de 22.5 m³



Fuente: Los autores.

Nota: El biodigestor contiene dentro un plástico inerte para mayor interacción de las bacterias.

2.4.5. Separador de agua

Accesorios:

Manómetro.

Válvula de purga.

Contador de gas ubicado a la salida del separador.

Imagen 11: Separador de agua del biogás



Fuente: Los autores.

Nota: Separa el agua que arrastra el biogás.

Imagen 12: Gasómetro



Fuente: Los autores

Imagen 13: Manómetro salida biogás



Fuente: Los autores.

Imagen 14: Bombas de recirculación del biodigestor.



Fuente: Los autores.

Nota: Sistema de recirculación del biodigestor para mejor interacción de las bacterias

2.4.6. Quemador flare

Accesorios:

Válvula automática.

Plato Solar para encendido de llama.

Imagen 15: Flare



Fuente: Los autores.

Nota: Flare para quema del biogás

2.4.7. Herramientas

Display, UPS, PLC, transformador de distribución.

Imagen 16: Panel de control



Fuente: Los autores.

2.5 Tratamiento y diseño experimental

La totalidad de los equipos y accesorios utilizado en la planta piloto están diseñados de tal manera que permita las condiciones anaeróbicas, mantener los parámetros en sus rangos óptimos. El equipo piloto, en sus partes principales consta de un tanque de abastecimiento, equalizador, tanque de calentamiento para el equalizador, torre de enfriamiento, biodigestor, y flare para la quema de biogás.

La operación del sistema para el tratamiento anaeróbico de la vinaza inician en la transportación diaria de vinaza desde las instalaciones de la planta de SODERAL, vinaza que es recogida desde la línea de descarga de las bases de la columna destrozadora de la destilería y transportada hasta donde está ubicada la planta piloto, la cual era depositada en un tanque de 10000 litros que sirve como abastecimiento del equalizador.

Imagen 17: Sistema de bombeo de vinaza al equalizador

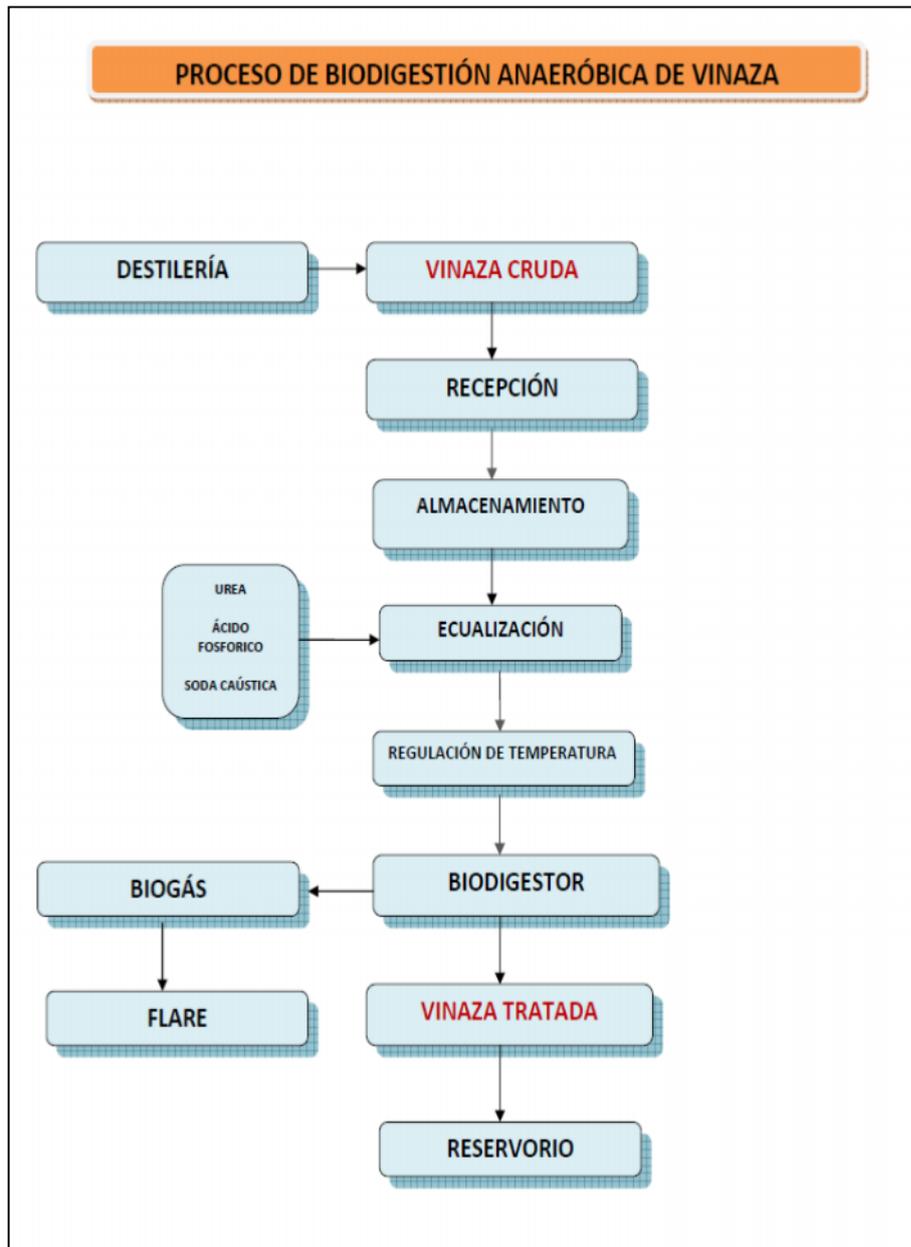


Fuente: Los autores.

La Figura 9 presenta de manera esquemática las etapas del proceso anaeróbico utilizado en el estudio.

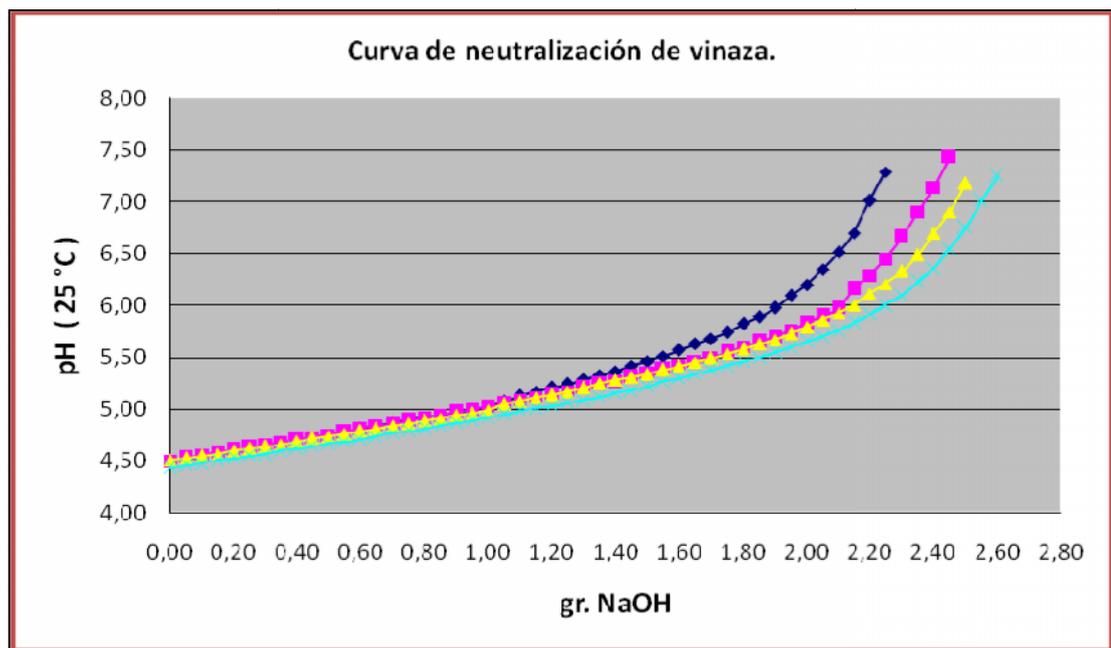
La vinaza es bombeada desde el tanque de 10 mil litros hacia el tanque ecualizador, en donde a la vinaza se le regula el pH hasta un rango de 7.0 a 7.5 al inicio de la prueba. Se preparó en el laboratorio una curva de neutralización de la vinaza cruda con soda cáustica (Gráfico 1).

Figura 9: Diagrama del proceso de digestión anaeróbica.



Fuente: Los autores.

Gráfico 1: Curva de neutralización de vinaza con soda cáustica



Fuente: Los autores

Nota: Esta curva experimental, relaciona el consumo de soda cáustica para neutralizar la vinaza

Para ajustar los niveles de nitrógeno y de fosfatos se le agrega urea o ácido fosfórico hasta llegar a niveles de necesitados por las bacterias en el biodigestor. En este estudio no fue necesario agregar con frecuencia estos nutrientes porque la vinaza es rica en estos compuestos, y provienen de la fermentación de la melaza en el proceso de la producción de alcohol.

Cuando la vinaza llega a más de 60°C, es necesario hacerla pasar por el enfriador para bajarle la temperatura hasta 37-40°C antes de ingresar al biodigestor, pero si la vinaza se enfría por condiciones naturales a menos de 35°C, por dosificación y de alimentación al biodigestor, este es calentado con agua caliente que pasa por el serpentín instalado dentro del eculizador. En toda la etapa del estudio fue necesario mantener calentando la vinaza en el eculizar para mantenerla por encima de 38°C antes de ser alimentada al tanque biodigestor.

Luego desde el eculizador se alimento vinaza en los rangos desde 60 a 100 litros por hora. Se controlaron el DQO total, DQO soluble, pH, alcalinidad, acidez volátil, SST, SSV, niveles de nitrógeno, y fosfatos en la vinaza cruda y en la vinaza saliente del biodigestor, se cuantificó diariamente el flujo de biogás y la concentración de

metano, bióxido de carbono (CO₂) y ácido sulfhídrico en el biogás producido. Se reportó diariamente la permanencia del flare encendido.

Diariamente con todos los datos reportados, se calcularon los rendimientos de remoción del DQO soluble y se reportó el índice diario de metros cúbicos de metano por kilo de DQO soluble removido.

2.6. Esquema y Diseño del experimento

El sistema de la degradación de vinaza tuvo un régimen de operación de alrededor de 3 meses, en que se incluye la etapa del periodo de marcha hasta equilibrar el proceso en todas las variables. Se elabora un cuadro de reporte diario, que se recopilan los datos de análisis y control, en esta tabla se presenta el esquema del experimento empleado, en donde incluye, los datos de la vinaza cruda (afluente), vinaza tratada (efluente), los flujos medidos de vinaza alimentada y biogás producido, los rendimiento calculados y los consumos de nutrientes utilizados en la experimentación.

Esta hoja de recopilación de datos diarios, nos ayuda a interpretar las tendencias del comportamiento del biodigestor y el estudio de las variables para obtener los rendimientos deseados.

En toda la etapa del estudio, se determinó la cantidad de biogás producido, medido en un gasómetro marca KEUK DONG, la cuantificación de metano fue obtenida midiendo primero la concentración de CO₂ y H₂S con tubos GASTEC específico para los rangos de concentración de estos gases en el biogás, el metano se lo cuantifica por diferencia.

También se determinaron, los sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles, Demanda química de Oxígeno total para la vinaza cruda y vinaza tratada efluente. El Cuadro 6 muestra cada uno de los parámetros analizados durante el estudio.

2.7. Mediciones experimentales y caracterización

2.7.1. Caracterización de la vinaza

Para los propósitos de la experimentación, El Cuadro 7 se presenta la caracterización realizada a la vinaza y la frecuencia de mediciones que se realizaron para el estudio:

Cuadro 6: Variables para control de la operación

VARIABLES
Ácidos Grasos Volátiles (AGV).
Alcalinidad (ALK).
Demanda Química de Oxígeno total (DQOt).
Demanda Química de Oxígeno soluble (DQOs).
Potencial de Hidrógeno (pH).
Sólidos Suspendidos totales (SST).
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV).
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK).
Niveles de Sulfatos (SO₄).
Niveles de fosfatos (orto-P).
Porcentaje de metano en el biogás (%CH₄).
Porcentaje de bióxido de carbono el biogás (%CO₂).
Porcentaje de gas sulfhídrico en el biogás (%H₂S).
Temperatura del biodigestor

Fuente: Los autores.

2.7.2. Métodos analíticos para los monitoreos experimentales

Durante la operación del sistema, se realizó un seguimiento de la evolución de los parámetros en la fase líquida y en la fase gaseosa. Se considera que las bacterias son el ingrediente esencial del proceso y es necesario mantenerlas en condiciones que permitan asegurar y obtener los mejores resultados del ciclo biológico dentro del biodigestor.

Para el análisis de la vinaza cruda y tratada en el biodigestor de la planta piloto se utilizaron procedimientos analíticos recomendados en el manual de operación y mantenimiento de la empresa BIOTHANE (Biothane Corporation, 2500 Broadway, Drawer 5 Camden, New Jersey 08104, USA, www.biothane.com) y para el análisis de la vinaza cruda, se contrató el laboratorio GQO (Grupo Químico Marcos), acreditado a la OAE.

2.7.2.1. Método analítico para alcalinidad y ácidos grasos volátiles

El objetivo es la determinación de la alcalinidad del bicarbonato y los ácidos grasos volátiles. El procedimiento establece la determinación cuantitativa de los ácidos grasos volátiles y la alcalinidad en la vinaza estudiada. (Imagen 18).

A la muestra filtrada (vinaza) se la acidifica con ácido clorhídrico 0.1 N (normal) hasta un pH de 3.

El Bicarbonato es convertido en CO₂ y el ácido graso volátil se convierte completamente en una forma no-disociada. Después se elimina el CO₂ hirviendo la muestra bajo reflujo para luego a la solución titularla con solución de hidróxido de sodio 0.1 N hasta pH = 6,5.

Los ácidos grasos volátiles y otros ácidos débiles presente son convertidos en formas disociadas. De las cantidades de ácido y álcali usadas, pueden calcularse la alcalinidad del bicarbonato y los ácidos grasos volátiles.

Imagen 18: Equipo para análisis de Ácidos Grasos Volátiles y Nitrógeno total



Foto: Los Autores.

2.7.2.2. Método analítico para la determinación del DQOt y DQOs

Este procedimiento establece el método para cuantificar la demanda química de oxígeno (DQO) que es el parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en mg O₂/litro.

El método utilizado para este análisis de DQO, es el método colorimétrico HACH, utilizando según la concentración de DQO, los reactivos: HACH, High Rango (0-1500 mg/l) COD Viales (HR) y HACH, High Rango (0-15000 mg/l) COD Viales (HR). Los equipos utilizados son el reactor HACH y el espectrofotómetro HACH.

Imagen 19: Reactor HACH para DQO



Fuente: Los autores.

Imagen 20: Espectrofotómetro HACH.



Fuente: Los autores.

2.7.2.3. Método analítico para sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV)

El contenido de sólidos en la vinaza con que se carga al biodigestor es un factor importante para lograr el buen funcionamiento del proceso. Trabajar con elevadas concentraciones de sólidos trae inconvenientes en el desenvolvimiento normal de las bacterias pudiendo bajar la producción de biogás y por ende la productividad.

El objetivo es la determinación de los sólidos totales y los sólidos suspendidos volátiles para la vinaza, utilizando como equipo estufa a 105°C y mufla a 550°C, papel filtro Whatman 934-AH secos en la estufa (9-15 centímetro), Los embudos de Buchner (9-15 centímetro) ,Frascos de filtración, Bomba de vacío, balanza y desecador.

2.8. Fórmulas utilizadas para el cálculo de rendimientos

2.8.1. Remoción (%) de la Demanda Química de Oxígeno total y soluble

La medición del DQO es la manera más eficaz para observar la variación en el consumo de carbono por parte de los microorganismos en el sistema. La medición del DQO a la entrada y la salida del sistema determina la remoción medida en

porcentaje para el DQO total y soluble y también si se desea para la Demanda Biológica de oxígeno (DBO):

Porcentaje de remoción DQOt, DQOs y DBO (%)

$$\text{DQOt rem} = (\text{DQOt in} - \text{DQOt out}) / \text{DQOt in} \times 100$$

2.8.2. Demanda Química de oxígeno removido (kilos /día)

Flujo tratado (litro por día, l/d) = Alimentación (l/h) x 24 h

DQOt y DQOs removido (kilos por día, kg/d)

$$\text{DQOt remv} = (\text{DQOt in} - \text{DQOt out}) / \text{DQOt in} \times \text{Flujo tratado (l/d)}$$

2.8.3. Contenido de metano en el biogás

Producción de biogás (m³/d)

Metros cúbicos (m³) por turno x 3 turnos

Contenido de metano en el biogás

Contenido de metano (%) = 100% - %CO₂ - %H₂S.

Producción de Metano (m³/d)

Producción de metano (m³/d) = Producción de biogás (m³/d) x % de CH₄

2.8.4. Rendimiento de metano

Rendimiento de Metano (m³ de CH₄ / kg DQOs_{rem})

Rendimiento de Metano = Producción de metano (m³/d) / DQOs_{rem} (kg/d)

2.8.5. Resumen de datos obtenidos en el experimento

Cuadro 7: Datos obtenido en la prueba, vinaza tratada

Operación de la planta piloto, vinaza tratada				
PARAMETRO	Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo
Ácidos Grasos Volátiles	mg/L	2849	1370	737
Alcalinidad	mg/L	6450	5366	4300
pH	s.u	7.53	7.35	6.97
Demanda Química Total de Oxígeno, DQOt	Kg/m3	28.71	18.39	11.00
Demanda Química Soluble de Oxígeno, DQOs	Kg/m3	25.20	13.87	5.62
Sólidos Suspendidos Totales, SST	mg/L	17569	5362	602
Sólidos Suspendidos Volátiles, SSV	mg/L	14640	3732	409
Sulfatos, SO ₄	mg/L	191	55	16
% de Remoción DQOt	%	81.2	72.0	59.0
% de Remoción DQOs	%	89.7	77.5	61.4
Tiempo de Retención Hidráulica, THR, Días	d	29	12	8
Temperatura del digestor	°C	36.0	32.6	26.2
Alimentación de vinaza al digestor	m3/d	2801	2122	480
Relación AGV/ALK en Digestor	s.u	0.47	0.25	0.15

Fuente: Los autores.

El Cuadro 7 nos presenta el resumen de los promedios, máximos y mínimos de los resultados obtenidos para las variables principales analizadas y controladas en el estudio.

2.8.5.1. Resumen de datos calculados del aprovechamiento del biogás

Cuadro 8: Datos calculados para el aprovechamiento del biogás

Nomenclatura	Unidad	Zafra
Producción de alcohol	Litros/año	17000000
Índice Vinaza	lt vinaza / lt de alcohol	14
Volumen de vinaza tratada	m ³ /año	238000
DQOs	Kg/m ³	80
DQOt	Kg/m ³	85
DQOs / DQOt	s.u	0,94
Remoción DQOt	%	77,50
Rendimiento Metano	m ³ CH ₄ / Kg DQOs	0,28
Pureza Metano	%	0,55
Producción de biogás/año	m ³ / año	7502755
Producción de metano/año	m ³ / año	4126515
Poder calorífico del biogás	Btu /m ³ biogás	18563
Bunker reemplazo por biogás	gal / año	994785
Energía eléctrica en turbogenerador	kwh/año	1740874
Toneladas de CO ₂ reducidas	tCO ₂	26975

Fuente: Los Autores.

El Cuadro 8, presenta un resumen de los datos del aprovechamiento del biogás, para producir vapor reemplazando al combustible fósil y con este vapor se puede producir energía eléctrica haciéndolo pasar por un turbogenerador. También podemos observar que para una destilería que produce 17 millones de litros de alcohol anuales, se genera alrededor de 238000 m³ de vinaza al año y, que pueden reemplazar 994785 galones de bunker # 6 y generar 1740874 kwh al año.

2.8.5.2. Cálculos para el aprovechamiento del biogás.

El estimado del biogás generado, es calculado en base a los datos experimentales obtenidos en el estudio. Este biogás está directamente relacionado con la vinaza generada, el índice de vinaza, la demanda química de oxígeno total, la demanda química de oxígeno soluble, el rendimiento de metano, la remoción del DQOs. Los datos calculados presentados en el cuadro 8 son:

- Volumen de vinaza generada anualmente en la destilería:

$$1700 \text{ m}^3 \text{ alcohol/año} \times 14 \text{ m}^3 \text{ vinaza /m}^3 \text{ alcohol} = 238000 \text{ m}^3 \text{ de vinaza.}$$

- Biogás estimado:

$$238000 \text{ m}^3 \text{ de vinaza} \times 85 \text{ kg/m}^3 \times 0.94 \times 77.5 \times 0.28 / 0.55 = 7502755 \text{ m}^3/\text{año.}$$

- Metano producido.

$$7502755 \text{ m}^3/\text{año} \times 55 \text{ m}^3 \text{ metano} / 100 \text{ m}^3 \text{ biogás} = 4126515 \text{ m}^3 \text{ metano.}$$

- Reemplazo de combustible fósil por biogás.

$$7502755 \text{ m}^3/\text{año} \times 33750 \text{ BTU /m}^3 \text{ Biogás} \times 0.55 \times 1 \text{ gal Bunker} / 140000 \text{ BTU} = 994785 \text{ galones de bunker/año.}$$

- Energía eléctrica en turbogenerador:

$$994785 \text{ galones de bunker/año} \times 105 \text{ libra de vapor/ gal bunker} \times 1 \text{ kwh} / 60 \text{ lb vapor} = 1740874 \text{ kwh /año.}$$

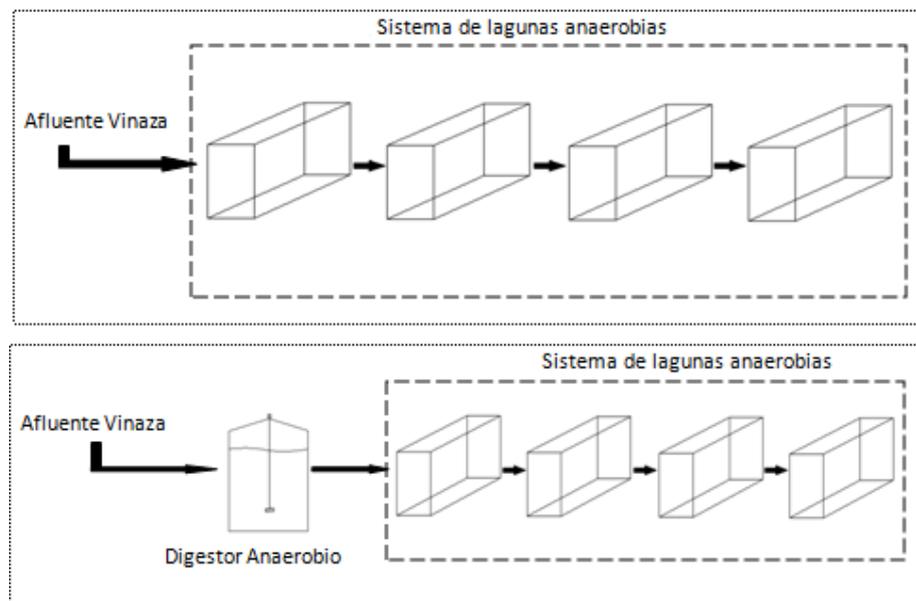
2.8.6. Línea base para la captura de metano de vinaza.

La destilería almacena la vinaza en lagunas abiertas, previa irrigación, como fertilizante para las plantaciones de caña.

Un esquema representativo de este sistema de tratamiento actual, usado por la destilería y la proyección para el tratamiento de la vinaza en un biodigestor para aprovechar el biogás está dado en la figura 10, que nos presenta las condiciones actuales de almacenamiento de la vinaza generada desde la destilería y la condición con tratamiento previo en un sistema de tratamiento anaeróbico controlado.

El afluente de vinaza es bombeado desde la planta de producción a las lagunas. En este sistema, la vinaza sufre descomposición anaerobia y, como consecuencia, se producen emisiones de metano a la atmósfera.

Figura 10: Condiciones actuales y con proyecto para el tratamiento de vinaza.



Fuente: Los Autores.

La actividad del proyecto consiste en la construcción de un paso intermedio en el tratamiento existente, pasando por un biodigestor con sistema de recuperación de biogás. Eso coincide con uno de los criterios de aplicabilidad establecidos en la metodología AMS.III.H (Tipo III) de las Naciones Unidas.

La Reducción de emisión (ER_y) se calcula de acuerdo con la fórmula general:

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y^{37} \quad (1)$$

Donde:

ER_y : Reducción de emisión en tCO₂/año en el año y

BE_y : Emisiones de la línea base en TCO₂/año en el año y

PE_y : Emisiones de proyecto en tCO₂ en el año y

LE_y : Fugas en tCO₂/año en el año y

Los Cuadros 4 y 5 nos presentan un resumen de las fórmulas utilizada para el cálculo de la línea base.

2.8.6.1 Cálculos para las emisiones de la línea base. (BE_y)

De acuerdo con la metodología aplicable para una tecnología de biodigestión anaeróbica, las emisiones de la línea base corresponden a las emisiones resultantes con la fórmula 1. Y, para BE_y , se tiene:

$$BE_y = Q_{ww, i, y} * DQO_{removido, i, y} * MCF_{ww, treatment, BL, i} * B_{o, ww} * UF_{BL} * GWP_{CH_4 + HG_y} * EFCO_2 / n_{th} \quad (2)$$

- $Q_{ww, i, y}$: Volumen de vinaza tratada en el escenario de la línea base en el sistema i en el año y (m^3) = 238000 m^3 .
- $DQO_{removido, i, y}$: Demanda química de oxígeno eliminada en el sistema i en la línea base en el año y (toneladas / m^3) medido como la diferencia del DQO a la entrada y a la salida del sistema i . Considerando la DQOs de entrada en el

³⁷Fórmula general utilizada en la metodología AMS III. H para recuperación de metano en un sistema anaeróbico <http://cdm.unfccc.int/methodologies/SSCmethodologies/approved.html>

sistema de tratamiento (80000 mg/l) y una remoción del 77.5%, entonces la DQO eliminada es: 62000 mg/l.

- $^{38}MCF_{ww, treatment, BL,i}$: Este es el factor de corrección de metano en la línea base, en el sistema i en el año y. *Este valor es = 0.8 kgCO_{2e}/KWh.*
- $B_{o,ww}$:Capacidad de producción de metano del efluente = 0.21 kg CH₄ /kg DQO.
- UF_{BL} : Factor de corrección del modelo para incertidumbre = 0.94.
- GWP_{CH_4} : Potencial invernadero del metano = 21 tCO_{2e}/tCH₄.
- HG_y : Es la cantidad neta de vapor /calor desplazado por la actividad del proyecto durante el año y en tCO_{2e}.
- $EFCO_2$: Factor de emisión CO₂ por unidad de energía del combustible que habría sido utilizado por la planta línea base en tCO₂/ TJ, es valor es obtenido de información confiable disponible local o nacional, de otra forma se utilizaría los factores de emisión de la IPCC³⁹.
- n_{th} : Eficiencia de la planta que utiliza combustible fósil que habría sido utilizado en ausencia de la actividad del proyecto = 77.4

De acuerdo con la ecuación 2, las emisiones calculadas en el escenario de la línea base debido al tratamiento de la vinaza es: 52230.00 tCO₂/año.

³⁸ Tabla I.D.1 de las metodologías para proyectos a pequeña escala.

³⁹ IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, www.ipcc.ch

2.8.6.2. Cálculos para las emisiones del proyecto. (PE_y).

Las emisiones de proyecto se deben, según la metodología y las particularidades del proyecto, a las emisiones por fugas en el biodigestor, a las emisiones que se producen en la descarga del efluente y a los consumos de electricidad que se producen como consecuencia de la implementación del proyecto.

De conformidad con AMS III.H, las emisiones del proyecto consisten en:

- Emisiones de CO₂ por el consumo de la energía utilizada para el servicio de la actividad del proyecto.
- Emisiones de metano por la ineficiencia del tratamiento de la vinaza que se presenta como carbón disuelto en el efluente después del biodigestor.
- Emisiones fugitivas de metano en la captura y encendido del biogás.
- Emisiones que resulta por el metano disuelto en el efluente después del biodigestor.

La ecuación para las emisiones del proyecto es:

$$PE_y = PE_{y, \text{energía}} + PE_{y, \text{www, tratada}} + PE_{y, \text{fugitiva}} + PE_{y, \text{disuelta}}. \quad (3)$$

Donde:

PE_y = Emisiones de la actividad del proyecto en el año y en tCO_{2e};

$PE_{y, \text{energía}}$ = Emisiones por consumo de energía eléctrica en el año y .

$PE_{y, \text{www, tratada}}$ = Emisiones del carbón orgánico degradable en agua residual tratado en el año y .

$PE_{y, \text{fugitiva}}$ = Emisiones de metano liberado en los sistemas de captura y encendido en el año y .

$PE_{y, \text{disuelta}}$ = Emisiones de metano disuelto en agua residual tratada en el año y .

Para: $PE_{y, fugitiva}$ tenemos:

$$PE_{y, fugitiva} = (1 - CFE_{ww}) * MEP_{y, ww, treatment} * GWP_{CH4}$$

$$MEP_{y, ww, treatment} = Q_{y, ww} * DQO_{untreated, i, y} * B_{o, ww} * MCF_{ww, untreated} * UF$$

Donde:

CFE_{ww} : Eficiencia de captura del sistema de recuperación de biogás en los sistemas de tratamiento = 0.9.

$MEP_{y, ww, treatment}$: Potencial emisor de metano de los sistemas de tratamiento (Factor de corrección de Metano) = 1.

$Q_{y, ww}$: Volumen de vinaza tratada en el año y (metros cúbicos) = 238,000.

$MCF_{ww, untreated}$: Factor de Corrección de Metano.

$DQO_{untreated, i, y}$: Demanda química de oxígeno eliminada en el sistema de tratamiento en el año y (toneladas/m³) = 0.062.

Entonces tenemos:

$$PE_{y, fugitiva} = (1 - 0.9) * 238,000 * 0.062 * 0.21 * 1 * 21 = 6507.4 tCO_{2e}$$

Las emisiones que se producen como consecuencia de la descarga se calculan de acuerdo con:

$$PE_{tww, discharge, y} = Q_{WW, Y} * GWP_{CH4} * B_{o, ww} * UF_{PJ} * DQO_{ww, discharge, PJ, y} * MCF_{ww, PJ, discharge}$$

Donde:

$DQO_{ww,discharge,PJ,y}$: Demanda química de oxígeno efluente en la descarga en el mar, río, lago o el escenario de proyecto (toneladas/m³).

Las emisiones de proyecto por consumo de electricidad se calculan de acuerdo con:

$$PE_{power,y} = E_{consumed,y} * EF_{grid}$$

Donde $E_{consumed,y}$ es la electricidad que se consume en la situación de proyecto.

Se ha estimado, con objeto de dar un cálculo aproximado de las emisiones de proyecto, que se consumirán alrededor de 5,000 MWh al año (equipos conectados e instalados en los biodigestores, etc).

De acuerdo con la ecuación 3, las emisiones de proyecto son:

$$PE_{y, fugitiva} = 6507.4 \text{ tCO}_{2e}$$

$$PE_{y, energía} = EG_y \times EF_{red} = 5,000 * 0.6267 = 3133.5 \text{ tCO}_{2e}$$

$$PE_{y, disuelto} = 238,000 * 0.0001 * 21 = 499.8 \text{ tCO}_{2e}$$

$$PE_{y, ww, tratada} = 238,000 * 0.018 * 0.21 * 0.8 * 21 = 15113.9 \text{ tCO}_{2e}$$

Entonces. Sumando tenemos que:

$$PE_y = 6507.4 + 3133.5 + 499.8 + 15113.9 = 25,254.6 \text{ tCO}_{2e} / \text{año.}$$

Considerando que las fugas del proyecto (LE_y) son iguales a cero, y utilizando la ecuación 1, la reducción estimada de emisiones de proyecto son:

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y$$

$$ER_y = 52,230 - 25,254.6 - 0$$

$$ER_y = 26,975.4 \text{ tCO}_2 / \text{año}$$

Para un periodo de crédito de 10 años, la reducción de emisiones estimada según los datos calculados se presenta en el Cuadro 9:

Cuadro 9: Emisiones reducidas para 10 años.

Año	PE _y	BE _y	LE _y	ER _y
1	25,254.6	52,230	0	26,975.4
2	25,254.6	52,230	0	26,975.4
3	25,254.6	52,230	0	26,975.4
4	25,254.6	52,230	0	26,975.4
5	25,254.6	52,230	0	26,975.4
6	25,254.6	52,230	0	26,975.4
7	25,254.6	52,230	0	26,975.4
8	25,254.6	52,230	0	26,975.4
9	25,254.6	52,230	0	26,975.4
10	25,254.6	52,230	0	26,975.4
Total (toneladas)	252,546	522,300	0	269,754

Fuente: Los autores.

2.9. Procedimiento experimental

Para empezar con el arranque de la planta piloto se debió elaborar un procedimiento desde el arranque y verificar los siguientes parámetros:

- pH de biodigestor debe estar en rango neutro.
- Verificar la acidez volátil y alcalinidad del biodigestor.
- Empezar la alimentación con bajo flujo, 25 l/h
- Subir la temperatura del digestor hasta 37 °C.
- Abrir la válvula de biogás y cerrar el by pass.
- Controlar la temperatura de la vinaza en el ecualizador antes de la entrada al biodigestor.
- Observar el comportamiento del biodigestor por algunos días, en las variables de: pH, temperatura, acidez volátil y concentración de metano en el biogás.

- Se debe aumentar paulatinamente la alimentación de vinaza según se haya obtenido la estabilización de los parámetros de control.
- Se procede a monitorear los rendimientos cuando se tenga estabilidad en los parámetros de control.

2.10. Metodología de evaluación

La toma de datos fue planificada para controlar todos los parámetros implicados en la biodigestión. Luego se construye una matriz de recopilación diaria de datos.

La verificación de los datos recopilados en los tres turnos, fue supervisada diariamente y se actuó según el comportamiento, tomando las acciones correctivas necesarias.

También se elaboró una matriz que presenta la evaluación de los impactos potenciales para un proyecto de tratamiento de vinaza.

2.11. Identificación y caracterización de los impactos potenciales para un proyecto de biodigestión de vinaza en proceso de operación.

La identificación y caracterización para la predicción de los impactos ambientales, describe el tipo de impactos que pueden generarse durante la fase de operación de una planta de tratamiento de vinaza, para lo cual se consideraron los 3 componentes primordiales: medio físico, medio biótico y medio socioeconómico y cultural.

En la identificación de los impactos sobre el componente físico se considero los recursos:

Componentes Físicos:

- Atmósfera, que nos habla de la calidad del aire, los impactos de olores por degradación natural de la vinaza, el material particulado, y los ruidos y/o vibraciones ocasionados en el funcionamiento de la planta.

- Para el componente tierra se considero la potencial afectación del recurso suelo por el derrame de productos contaminados según la cantidad y el tipo de contaminante (agentes corrosivos, patógenos, explosivos, tóxicos, radioactivos, etc.)
- Agua, se consideraron las potenciales afectaciones de las aguas superficiales por agentes sólidos o líquidos y las aguas subterráneas.

Componentes Bióticos:

- Flora, se consideraron los aspectos ambientales que podrían verse afectados en la cobertura vegetal, relacionado con la pérdida o disminución de la capa vegetal, la vegetación terrestre asociado a la disminución de la densidad de especies vegetales, y la vegetación acuática asociada al deterioro de las condiciones naturales en las que se desarrollan especies vegetales acuáticas en ríos y esteros.
- Fauna, aquí se consideró la fauna terrestre relacionado con la emigración de especies, reducción de hábitad, muerte de especies nativas y la fauna acuática que está relacionada con la muerte de especies acuáticas en esteros y ríos.

Componente Socioeconómico y Cultural:

- Nivel Cultural, en este elemento se consideraron los aspectos ambientales que podrían verse modificados, como la salud y la seguridad, empleo, riesgos a la población y actividades comerciales.
- Servicio e infraestructura, aquí se considero los aspectos ambientales que podrían verse afectados en las etapas del proyecto, como son los servicios básicos, como el consumo de agua, energía eléctrica, alcantarillado pluvial, alcantarillado sanitario, telefonía, recolección de desechos sólidos.

- Factores estéticos, para esto se considero e aspecto ambiental que podría verse modificado durante las etapas del proyecto como el valor escénico, que influye directamente en el aspecto paisajístico de la zona.

2.11.1. Metodología para la identificación de los impactos ambientales potenciales y su naturaleza

Para determinar la identificación de los impactos ambientales de un proyecto de tratamiento de vinaza se utilizo la Matriz de Leopold, que es un método interactivo que constituye una matriz causa-efecto. Al utilizar la matriz de Leopold se debe considerar cada acción y su potencial impacto sobre cada elemento ambiental. Cuando se prevé un impacto, la matriz aparece marcada con una línea diagonal en la correspondiente casilla de esa interacción.

El segundo paso de la matriz es describir la interacción en términos de magnitud e importancia, proporcionando resultados cualitativos y cuantitativos, analizando la relación de causalidad entre la acción dada en la implementación de este nuevo proyecto productivo y su efecto sobre el medio ambiente.

Operativamente el eje horizontal (x) de la matriz de Leopold se colocan los elementos ambientales a ser identificados, agrupados en sus tres componentes esenciales (componente físico, componente biótico y componente socioeconómico y cultural); en el eje vertical (y) se representan las acciones o actividades que se desarrollan en el predio estudiado en todas sus fases. El análisis se realiza identificando los factores del ambiente que son afectados por cada acción o actividad que se desarrolla.

Para determinar la naturaleza del impacto ambiental tanto en la fase de construcción y funcionamiento de un proyecto de tratamiento de vinaza, sobre cada recuadro de la matriz de Leopold donde se interceptan las actividades o acciones del proyecto con los componentes ambientales, se procede a colocar la correspondiente identificación coloreada, a fin de determinar el grado de afectación que las actividades del proyecto generan sobre el medio ambiente.

La asignación de un valor numérico de la magnitud de una interacción debe basarse en una evaluación objetiva de los hechos relacionados con el impacto previsto.

La importancia de una interacción está relacionado con lo significativo que esta sea, o con una evaluación de las consecuencias probables del impacto previsto. Uno de los aspectos más atractivos de la matriz de Leopold es que puede extenderse o contraerse; es decir, el número de acciones puede aumentarse o disminuirse del total cerca de 100, y el número de factores ambientales puede aumentarse o disminuirse de cerca de 90 propuestas.

2.11.2. Parámetros de evaluaciones de impactos ambientales

Los parámetros y criterios de evaluación y valoración de los impactos ambientales identificados en las fases de operación de una planta de tratamiento de vinaza son mostrados en el cuadro 10.

Cuadro 10: Parámetros de evaluaciones para potenciales impactos ambientales

	Parámetro de evaluación		Criterio de valoración
	MAGNITUD	Influencia (INF)	Puntual
Local			3 – 6
Regional			7 – 10
Duración (D)		Momentáneo	1 – 3
		Temporal	3 – 6
		Permanente	7 – 10
Intensidad (INT)		Baja	1 – 3
		Media	3 – 6
		Alta	7 – 10
Importancia	Reversibilidad (REV)	Irreversible	1 – 3
		Poco reversible	3 – 6
		Reversible	7 – 10
	Recuperabilidad (REC)	Irrecuperable	1 – 3
		Poco recuperable	3 – 6
		Recuperable	7 – 10
	Carácter genérico	Positivo (beneficioso)	(+)
		Negativo (adverso)	(-)

Fuente: Estudio impacto ambiental SODERAL.

Influencia: Es el territorio que contiene el impacto ambiental y que no necesariamente coincide con la localización de la acción propuesta. Informa sobre la dilución de la intensidad del impacto, lo que no es lineal a la distancia de la fuente que lo provoca. Donde las características ambientales sean más proclives aumentará la gravedad del impacto. Puede ser puntual, local o regional.

Duración: Se refiere al tiempo que dura la afectación y que puede ser momentáneo, temporal o permanente; considerando, además las implicaciones futuras o indirectas.

Intensidad: Representa el grado de destrucción a la que ha sido sometida el entorno ambiental por efectos antropogénicos. Aquel cuyo efecto se manifiesta como una modificación de los recursos naturales o de sus procesos fundamentales de funcionamiento, que pueda o produzca repercusiones apreciables en los mismos. Puede ser de alta, media o baja intensidad.

Los criterios de ponderación para valorar la magnitud del impacto ambiental se las define de la siguiente manera:

Peso de ponderación de los parámetros de magnitud en la etapa de fase de operación del proyecto.

Peso de ponderación de la influencia	= winf	0.3
Peso de ponderación de la duración	= wd	0.4
Peso de ponderación de la intensidad	= wint	0.3

Se debe cumplir que $winf + wd + wint = 1$

Para el cálculo del valor de la magnitud de cada impacto ambiental en cada etapa del proyecto, se debe utilizar la ecuación:

$$\text{Mag.} = (\text{INF} * \text{winf}) + (\text{D} * \text{wd}) + (\text{INT} * \text{wint})$$

Las características consideradas para evaluar la importancia del impacto ambiental se las define de la manera siguiente:

Reversibilidad: La reversibilidad del impacto tiene en cuenta la posibilidad, dificultad o imposibilidad de retornar a la situación anterior a la acción. Se habla de impactos reversibles, de impactos poco reversibles o irreversibles.

Recuperabilidad: Aquel en que la alteración puede ser asimilada por el entorno de forma medible, a corto, medio o largo plazo, debido al funcionamiento de los procesos naturales de la sucesión ecológica y de los mecanismos de auto depuración del medio ambiente. Puede ser recuperable, poco recuperable e irrecuperable.

Carácter genérico: Se refiere a que el impacto ambiental evaluado puede ser beneficioso o adverso de la manera siguiente:

Peso de ponderación de los parámetros de importancia en la etapa de fase de operación del proyecto.

Peso de ponderación de la recuperabilidad	= wrec	0.5
Peso de ponderación de la reversibilidad	= wrev	0.5

Peso de ponderación de los parámetros de magnitud en la etapa de fase de operación del proyecto.

Peso de ponderación de la recuperabilidad	= wrec	0.5
Peso de ponderación de la reversibilidad	= wrev	0.5

Se debe cumplir que $wrec + wrev = 1$

Para el cálculo del valor de la importancia de cada impacto ambiental en cada etapa del proyecto, se debe utilizar la ecuación:

$$\text{Imp.} = (\text{REV} * wrec) + (\text{REC} * wrev)$$

El producto de las dos ecuaciones se lo denomina “valor del impacto ambiental” y se realiza en cada recuadro de la matriz, responde a la siguiente ecuación:

$$\text{Valor del impacto} = \pm (\text{Imp.} * \text{Mag.})$$

Cuadro 11: Matriz de evaluación y valoración de impactos ambientales en etapa de operación para una planta de tratamiento de vinaza.

Aspectos ambientales (Fase de operación)	COMPONENTES FISICOS									COMP. BIOTICOS				COMP. SOCIO-ECON Y CULTURAL						Afectaciones positivas	Afectaciones negativas	Agregación de impactos	
	Elementos ambientales									Elementos ambientales				Elementos ambientales									
	Atmosfera				Tierra	Procesos		Agua			Flora			Fauna		Nivel cultural			Servic.				Estet.
	Calidad del aire ambiente.	Malos olores.	Material particulado.	Ruidos y vibraciones.	Suelo (contaminación).	Estabilidad de taludes.	Inundaciones.	Agua superficial (contaminación).	Agua subterránea (contaminación).	Cobertura vegetal (retiro).	Vegetación terrestre.	Vegetación acuática.	Fauna terrestre.	Fauna acuática.	Salud y seguridad.	Empleo.	Riesgos a la población.	comerciales.	Servicios básicos.				Valor escénico.
Emisiones atmosféricas	4.1	-4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	1	0,7
Generación de material particulado	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0,0
Generación de ruido	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0,0
Manejo de efluentes domésticos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0,0
Manejo de desechos sólidos	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1	-15,9
Manejo de efluentes industriales	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0	0.0	-5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	1	17,4
Manejo de desechos peligrosos	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	2	-10,0
Operación de la planta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	0.0	2.4	0.0	-2.6	4.0	-7.1	5.1	0.0	3.2	5	2	55,0
Riesgos naturales	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0,0
Afectaciones positivas	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	7	7	47,2
Afectaciones negativas	0	1	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	7	47,2	
Agregaciones de impactos	28,7	-28,0	0	0	7,3	0	0	-10,6	0	0	9,6	0	9,6	0	-10,4	28,0	-35,5	36	0	12,8	47,2		

De la evaluación de la matriz de Leopold (Cuadro 11) para impactos ambientales potenciales, aplicada a la fase de operación de la planta de tratamiento de la vinaza, se concluye que montar un proyecto de este tipo tiene un impacto positivo (beneficioso) de 47.2 puntos.

Los aspectos positivos, de esta fase es el aprovechamiento del biogás para reemplazar el combustible fósil utilizado en la destilería. Además la degradación anaeróbica de la vinaza reduce la materia orgánica y los lodos aportan nutrientes al suelo. Entre los impactos negativos está el potencial riesgo de generación de olores en las piscinas, cuando el tratamiento sea deficiente, y, el potencial riesgo de fuga de gas. También existe el potencial riesgo de un derrame de las piscinas.

CAPÍTULO III

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO.

3.1. Resultados experimentales

3.1.1. Caracterización de vinaza que ingresa al biodigestor

Con los resultados mostrados en el cuadro 10, se evidencia que la vinaza es un residuo que resulta agresivo por los elevados valores de carga orgánica (DQO) y su pH ácido. Sin embargo, debidos a la relación DBO/DQO se puede deducir que la vinaza es fácilmente degradable por métodos biológicos y en especial por el proceso anaeróbico. Las variaciones del contenido de los diversos componentes de las vinazas dependen de varios factores, como:

- Características del proceso fermentativo.
- Calidad de la materia prima (melaza de caña).
- Tipo de levadura y productos químicos utilizados en la fermentación.
- Compuestos utilizados en los ingenios para el proceso de obtención de azúcar de caña.
- Eficiencias en el proceso de fermentación, quedando remanentes de compuestos como ácidos orgánicos, azúcares fermentables y no fermentables, glicerol etc.

- Restos de levadura, que no han sido separados en el proceso industrial que le dan un contenido proteico.

Para tener las estimaciones de las características físico - químicas de la vinaza se realizó un muestreo compuesto por el laboratorio acreditado GQM, el Cuadro 12 presenta los resultados de los análisis.

Cuadro 12. Composición físico-química de la vinaza

COMPOSICIÓN DE LA VINAZA DE SODERAL		
PARAMETROS FISICO-QUIMICOS	UNIDADES	RESULTADOS
Nitrógeno total amoniacal	mg/l	6,85
Temperatura	°C	58.6
Potencial de Hidrógeno		4,85
Ácidos Grasos Volátiles	mg/l	3740,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	42900,0
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	60327,0
Alcalinidad	mg/l	2934,0
Fosfatos	mg/l	86,00
Sulfatos	mg/l	2540,0
Potasio	mg/l	9500,0
Aceites y grasas	mg/l	4,00
Hierro	mg/l	50,90
Bario	mg/l	< 0,10
Flúor	mg/l	< 0,02
Zinc	mg/l	< 0,059
Cobre	mg/l	< 0,03
Manganeso	mg/l	< 23,20
Aluminio	mg/l	< 0,039
Molibdeno	mg/l	No detectable
Cobalto	mg/l	4,00
Níquel	mg/l	2,60
Vanadio	mg/l	< 0,10
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	19200
Pesticidas organofosforados	mg/l	< 0,00002
Coliformes Totales	NMP/100ml	< 1
Huevos Helmintos	unid/litro	Ausencia
Muestreo Compuesto realizado por Laboratorios GQO en Agosto del 2011		
Informe de Ensayo para Soderal No. 12768		

Fuente: Los autores.

En el Cuadro 13, se presenta algunos resultados analizados por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar Ecuatoriana (CINCAE), en donde se hace una comparación para las tres destilerías más grandes del Ecuador con promedios de análisis de destilerías de Colombia.

Cuadro 13: Comparación de análisis de vinaza de destilerías ecuatorianas

Análisis de Vinazas de Destilerías					
Características		Ecuador			Colombia
		PRODUCARGO	SODERAL	CODANA	
M.O	%	1.4	4.3	4	4.2-6-7
N	Kg/m3	4.3	3.3	3.5	0.63-1.14
P2O5	Kg/m3	0.05	0.13	0.04	0.07-0.25
K2O	Kg/m3	3.25	10.24	7.83	6.00-10.86
CaO	Kg/m3	1.96	2.38	2.24	1.05-3.14
MgO	Kg/m3	0.63	0.91	0.95	1.34-2.26
Fe	g/m3	15.1	29.7	37.7	
Cu	g/m3	1.1	2.3	1.7	
Zn	g/m3	3.3	1.8	2.2	
Mn	g/m3	4.6	2.1	2.8	
pH		4.0	4.5	4.3	3.5-4.3
CINCAE, Carta Informativa, Año 8, No 3					

Fuente: Centro de Investigación de la Caña Ecuatoriana, CINCAE, año 8, N° 3

Durante 97 días se operó la planta piloto DAF (Downflow Anaerobic Filter, Filtro Anaeróbico de Flujo Descendente), durante 24 horas al día, operada y controlada por operadores que trabajan los 3 turnos.

La gestión de la información se realizó electrónicamente en un formato Excel, como se muestra en la tabla 1, para el registro de los datos de operación de la Planta Pilotos y de los análisis realizados en el laboratorio respectivamente.

Las vinazas de las destilerías, como todo residuo industrial, presentan variabilidad en su composición para cada industria en particular. Como podemos observar en la figura 2, nos muestra el comportamiento del DQOt de la vinaza alimentada y el DQOt a la salida del biodigestor, El DQOt de la vinaza tratada estuvo siempre por debajo del DQOt de la vinaza cruda. Esta eficiencia de remoción del DQOt alimentado, presentó valores mínimos al comienzo de la alimentación, luego se logra una remoción máxima de 81.2%. La Figura 3 presenta la eficiencia de remoción lograda en todo el tiempo de la prueba.

3.1.2. Comportamiento del pH en la prueba

Se buscó en la experimentación, mantener un pH neutro en el biodigestor. Dependiendo de la relación de ácidos grasos volátiles y la alcalinidad, se neutralizó la vinaza en el equalizador. Dentro del biodigestor se autoreguló el pH con los cambios ocurridos durante la biodigestión.

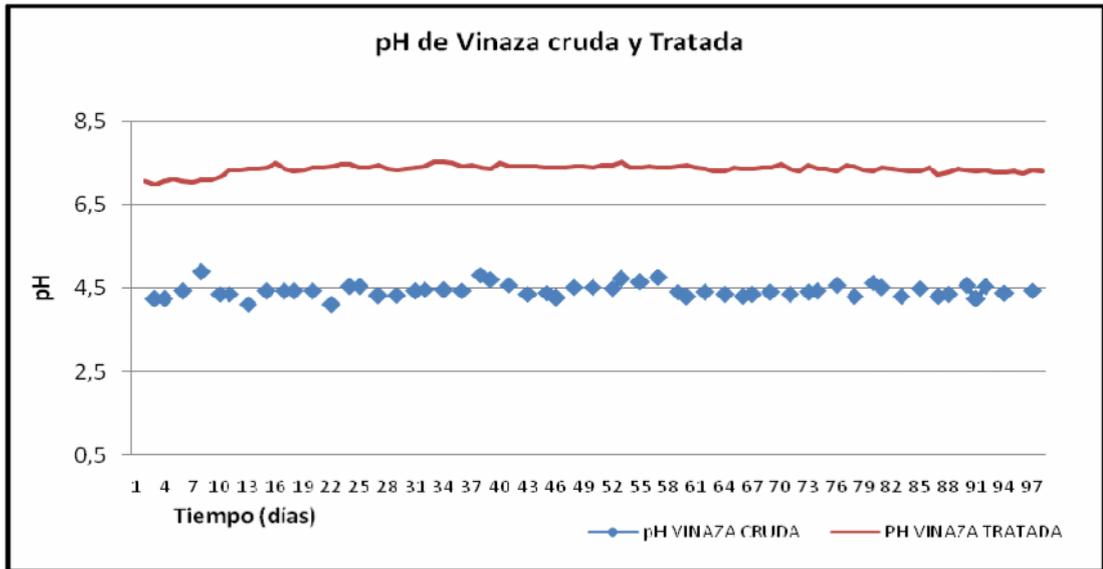
El Gráfico 2 muestra el comportamiento de los pH de la vinaza cruda y el pH de la vinaza a la salida del biodigestor. El pH de la vinaza cruda estuvo en los rangos de 4.11 a 4,89.

El pH de la vinaza alimentada fue medido diariamente al igual que la vinaza a la salida del biodigestor.

Según el comportamiento de la acidez del biodigestor se neutralizó la vinaza de alimentación.

El pH promedio de la vinaza saliente del biodigestor se mantuvo en un promedio de 7.35.

Gráfico 2: pH de la vinaza cruda y tratada



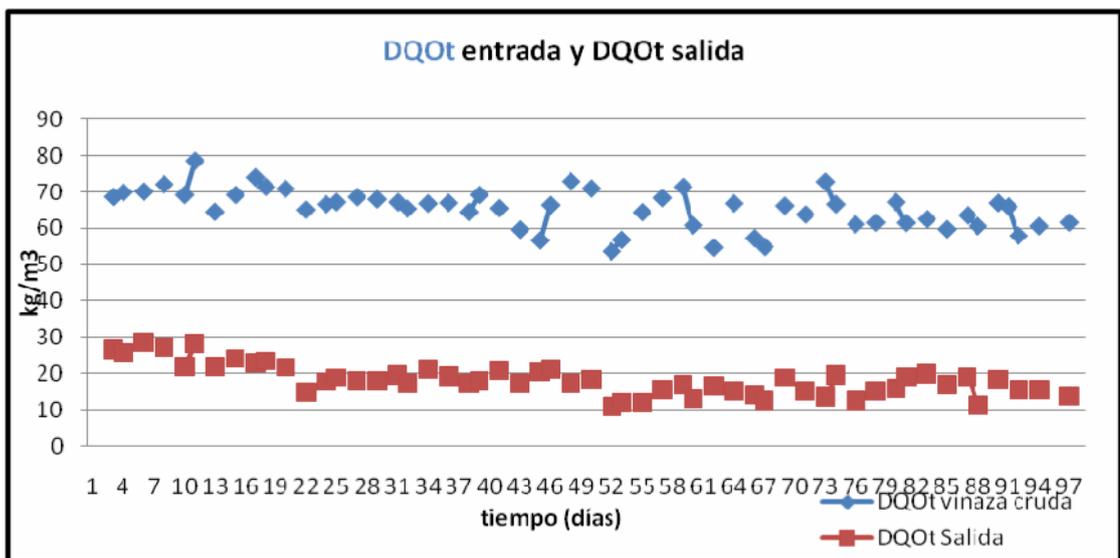
Fuente: Los autores.

3.1.3. Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno total y soluble

La Demanda Química de oxígeno, fue el parámetro que nos dio la cuantificación de la remoción de la carga orgánica.

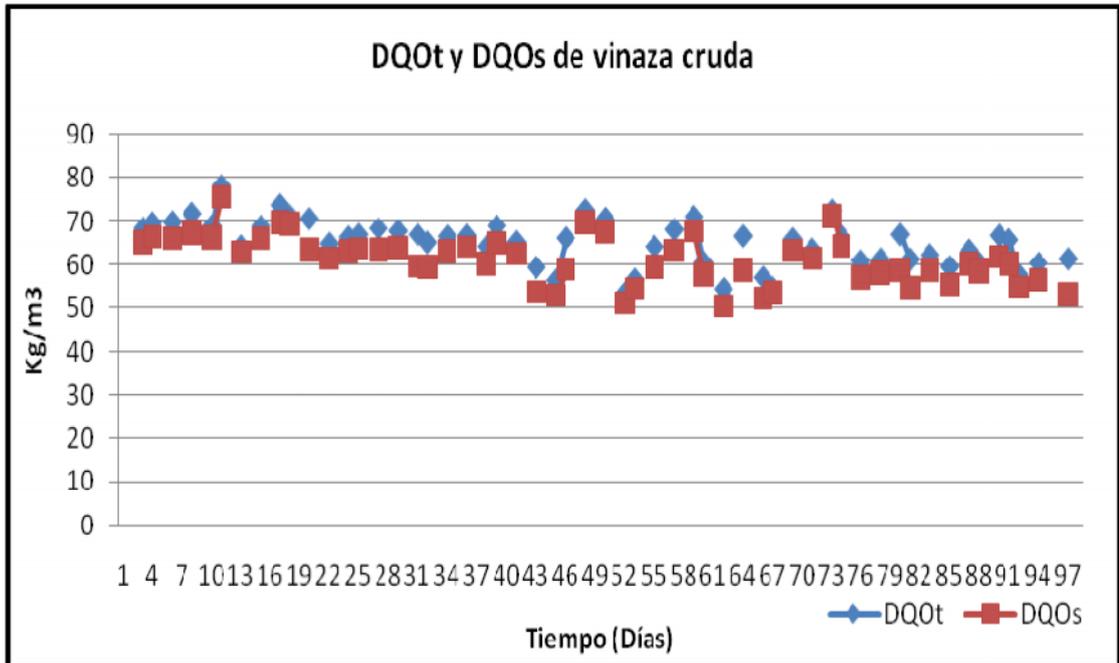
El DQO de la entrada y salida del biodigestor nos permite calcular el porcentaje de remoción del sistema y, este parámetro está directamente relacionado al biogás producido

Gráfico 3: Demanda Química de Oxígeno total



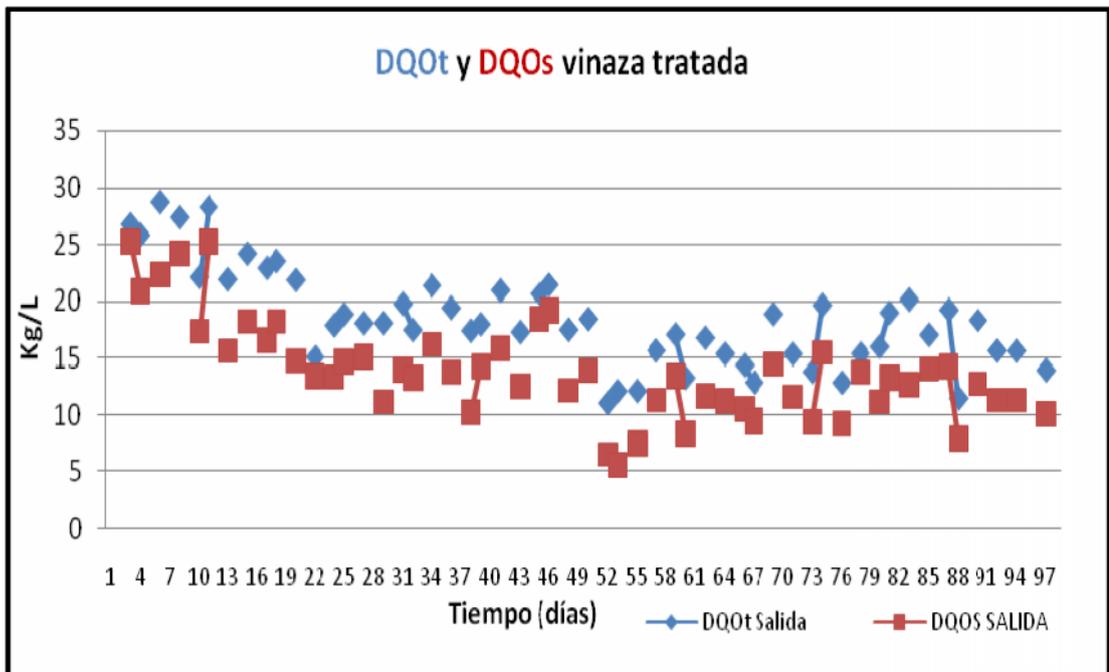
Fuente: Los autores.

Gráfico 4: Demanda Química total y soluble de la vinaza cruda



Fuente: Los autores.

Gráfico 5: Demanda Química de oxígeno de la vinaza tratada



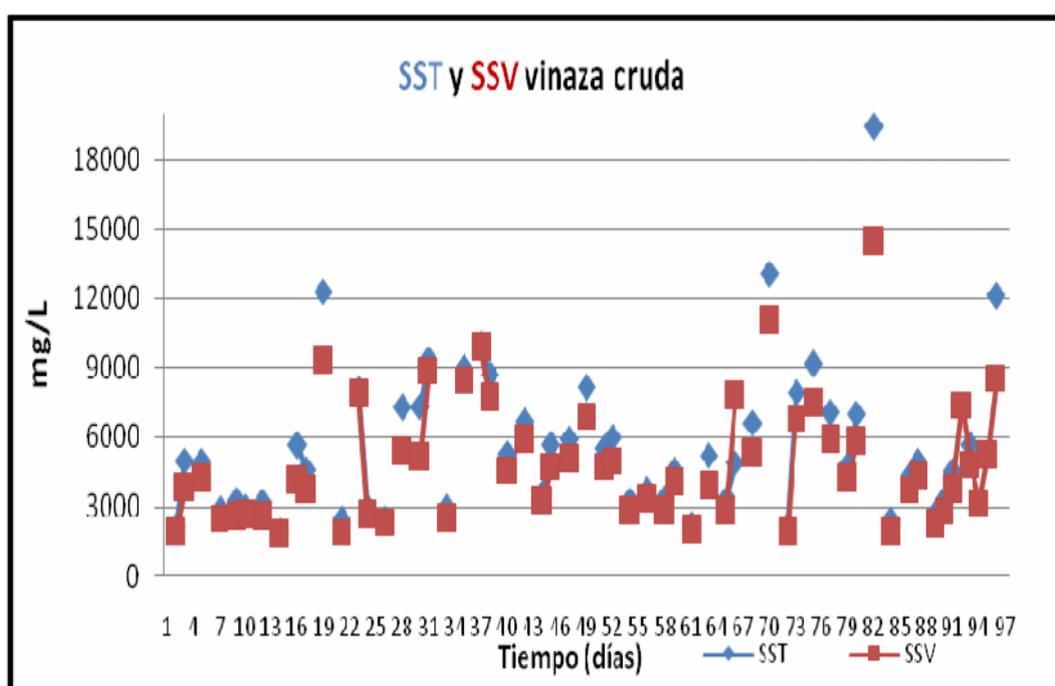
Fuente: Los autores

3.1.4. Sólidos suspendidos totales y volátiles de la vinaza

Los valores de Sólidos Suspendidos Totales (SST) de la vinaza alimentada al biodigestor fluctuaron entre un máximo de 19450 mg/L y un mínimo de 1960 mg/L y los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) oscilaron entre un máximo de 14445 y 1780 mg/L.

La concentración de sólidos estuvo en constante variación durante el periodo de prueba. (Gráfico 6).

Gráfico 6: Sólidos en la vinaza alimentada al biodigestor



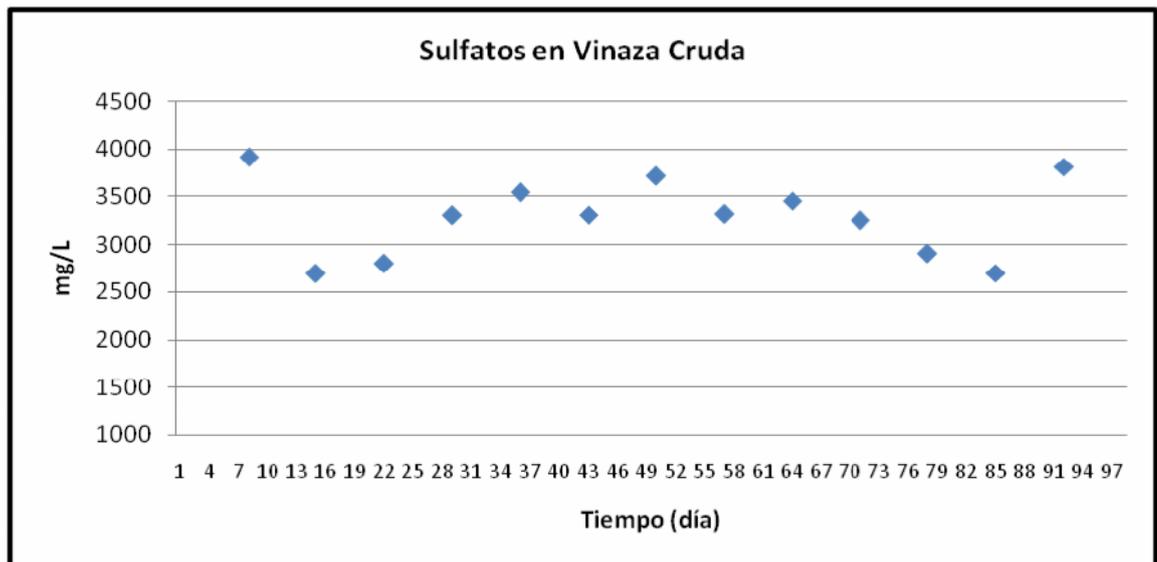
Fuente: Los autores.

3.1.5. Niveles de sulfatos en la vinaza

Los niveles de las concentraciones de sulfato (Gráfico 7), se midieron eventualmente.

Este parámetro fue el objeto del estudio de la biodegradación de la vinaza. Se presentó con niveles máximo de 3915 mg/l.

Gráfico 7: Niveles de sulfato en la vinaza cruda

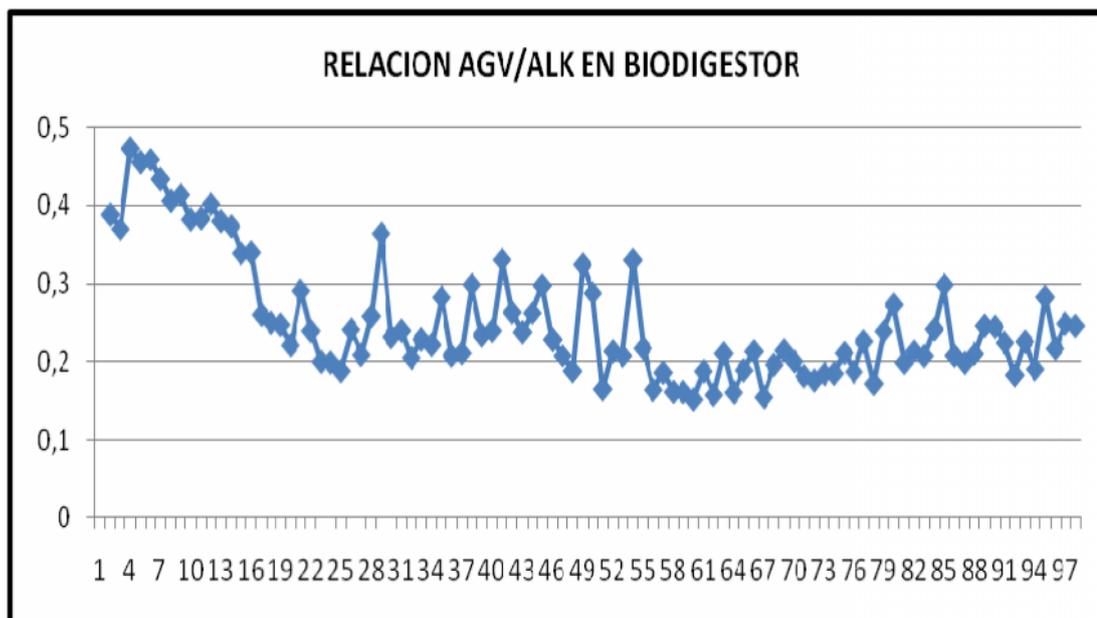


Fuente: Los Autores.

3.1.6. Relación de los ácidos grasos volátiles (AGV) con respecto a la alcalinidad (ALK) en el biodigestor

El Gráfico 8, nos presenta el comportamiento de la relación de los ácidos Grasos volátiles con respecto a la alcalinidad en el biodigestor. Los AGV y la Alcalinidad (ALK), fueron los parámetros de control para no poner en riesgo un desbalance entre las bacterias formadoras de metano y las formadoras de acidez dentro del biodigestor. La relación AGV/ALK, al inicio estuvo en el rango de 0.47, luego, a partir de los 20 días de alimentación se mantuvo en rangos menores a 0.35. Esta relación nos ayudó para controlar una sobrealimentación de acidez al biodigestor, evitando una acumulación de acidez en el biodigestor.

Gráfico 8: Relación de acidez y alcalinidad en el biodigestor.

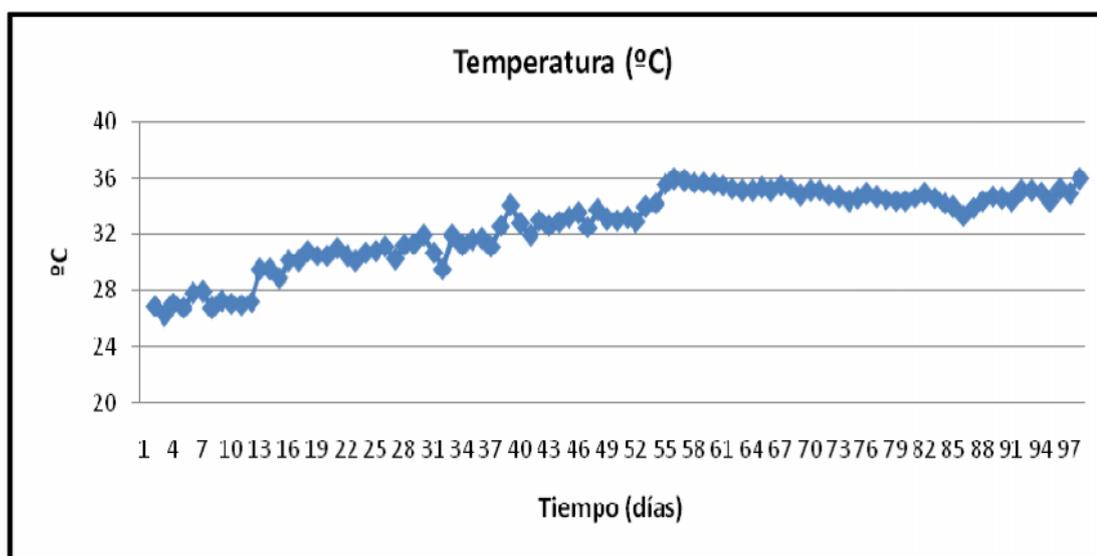


Fuente: Los autores.

3.1.7. Temperatura en el biodigestor

La temperatura del biodigestor fue también uno de los parámetros a controlar, se procuró mantener 37 grados centígrados, al comienzo esto no fue posible y se tuvo que instalar un serpentín de agua caliente en el equalizador y una camisa de intercambio de calor en la recirculación del biodigestor (Gráfico 9).

Gráfico 9: Temperatura del Biodigestor (°C)

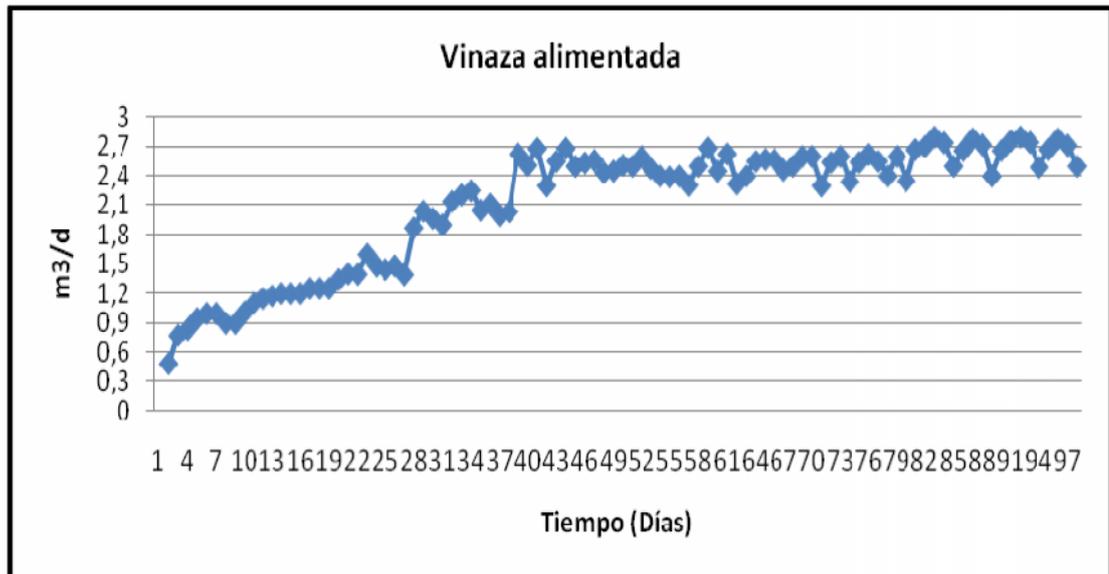


Fuente: Los autores.

3.1.8. Flujo de vinaza alimentación al biodigestor

La vinaza fue alimentada paulatinamente al biodigestor, dependiendo de la carga orgánica y tendencia del pH del biodigestor.

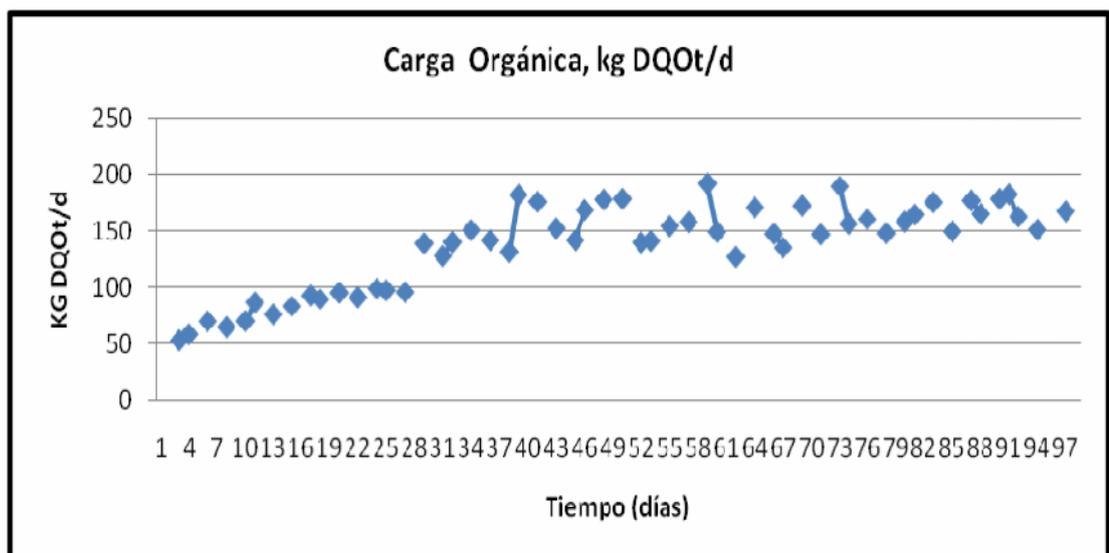
Gráfico 10: Alimentación de vinaza al biodigestor



Fuente: Los autores.

3.1.8.1. Carga orgánica alimentada al biodigestor

Gráfico 11: Carga orgánica alimentada.



Fuente: Los autores.

3.1.9. Caracterización del biogás obtenido en el estudio

Cuadro 14: Resultados del biogás obtenido en la prueba

Composición del biogás				
PARAMETRO	Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo
Metano, CH ₄	%	61.80	53.31	43.00
Dióxido de carbono, CO ₂	%	53.50	43.10	34.70
Gas Sulfhídrico, H ₂ S	%	3.20	2.59	1.80

Fuente: Los autores.

El Cuadro 14 presenta los promedios, máximos y mínimos de las concentraciones de metano, CO₂ y SH₂ analizados en la prueba.

3.2. Resultados económico por aprovechamiento del biogás

Cuadro 15: Estimaciones económicas por aprovechamiento del biogás

NOMINA	UNIDAD	VALOR
Costo del Bunker	\$ USA/gal.	0,6722
Costo de la energía	\$ USA/kwh	0,08
Costo actual de los CERs	\$ USA/tCO ₂	\$10.00*
Ahorro por reemplazo de bunker	\$ USA/año	\$668694.00
Ahorro por aprovechamiento de energía eléctrica.	\$ USA/año	\$139270.00
Bonos por Certificados de Carbono	\$ USA/año	\$269750.00
Total de dinero recuperable	\$ USA/año	\$1'077714.00

*Se estima que un CERS cuesta en el mercado \$10.00

Fuente: Los Autores

El Cuadro 15 nos presenta un resumen de los datos calculados para el bunker reemplazado por el biogás, al igual que la energía eléctrica que podemos generar con el vapor y las emisiones reducidas en toneladas de CO₂.

3.3. Resultados de los rendimientos obtenidos en el estudio

La remoción de DQO se da en la etapa final metanogénica, donde se forma CH₄ (muy poco soluble). La materia orgánica inicial contenida en la vinaza termina siendo liberada a la atmósfera en forma de CH₄, reduciendo así el contenido orgánico del efluente. La conversión teórica de la materia orgánica a metano (m³ CH₄/ kg DQOs_{removido}), está basada en el equivalente de oxígeno necesitado para degradar el DQOs (Materia orgánica soluble en la vinaza) que se convierte a metano y está representada por la ecuación:



El DQOs de 1 mol de CH₄ es 64 (2x32) y la cantidad de metano en condiciones estándar producidas por el metabolismo completo en el proceso anaeróbico es:

$$\frac{22.4 \text{ L/mol de CH}_4}{64 \text{ g DQOs/mol de CH}_4} = 0.35 \text{ L CH}_4/\text{g DQOs}$$

El valor ideal del rendimiento también puede estar dado en m³ CH₄/kg DQOs.

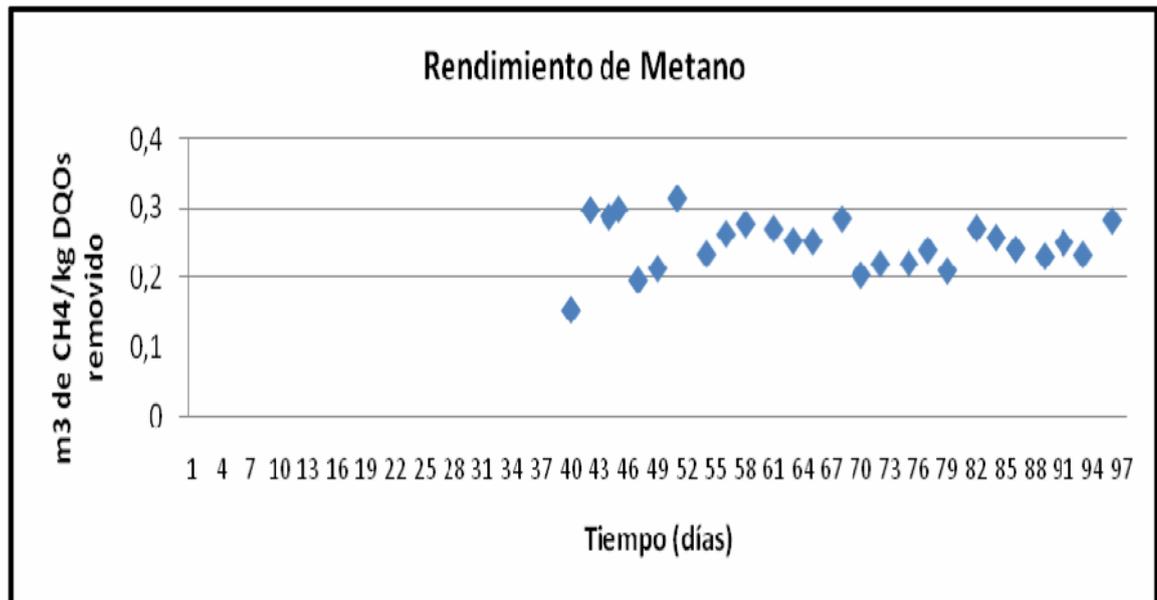
Cuadro 16: Rendimiento obtenido en m³ CH₄/Kg DQO_s removido

Rendimiento de metano en la prueba				
	Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo
Rendimiento de metano	m ³ CH ₄ / Kg DQOs remv	0.31	0.25	0.15

Fuente: Los Autores.

El Cuadro 16, presenta los rendimientos calculados en base a los datos experimentales obtenidos. Es importante destacar que el rendimiento teórico es 0.35 m³ CH₄ / kg DQOs. En nuestra prueba se ha obtenido un máximo de 0.31 m³ CH₄ por cada kilogramo de DQOs.

Gráfico 12: Rendimientos obtenidos.



Fuente: Los autores.

Si hacemos referencia al rendimiento teórico, el gráfico 12 nos presenta que los rendimientos, después de estabilizar el proceso, oscilaron entre 0.15 como mínimo y 0.31 m³ CH₄ /Kg DQOs como máximo.

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. Evaluación y discusión de resultados experimentales

El Cuadro 17, nos muestra un resumen de la caracterización de la vinaza, realizados durante la prueba. Podemos observar que los sulfatos que ingresaron al sistema estuvieron fluctuando entre 2691 y 3915 mg/l, medido como SO_4 .

La vinaza utilizada en el estudio fluctuó entre 53500 mg/l y 78500 mg/L de DQOt. La producción de biogás depende de los flujos alimentados al biodigestor, la temperatura del biodigestor, la carga orgánica alimentada, el contenido de sólidos, inhibidores de las bacterias, como los antibióticos utilizados en la destilería, el tiempo de retención hidráulica (TRH).

Los valores de nitrógeno provienen de las condiciones del proceso de fermentación para la producción de alcohol. La vinaza en este periodo de prueba se mantuvo con un promedio de 232 mg/l.

Las condiciones de pH en la vinaza de prueba fluctuaron entre 4.11 y 4.89. En el equalizador se dosificó soda al comienzo de la prueba hasta obtener una relación de acidez volátil y alcalinidad estable en el sistema que reguló el pH neutro necesitado en el biodigestor.

Cuadro 17: Resultados de análisis a la vinaza cruda

Análisis de vinaza cruda en el periodo de prueba				
PARAMETRO	Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo
Ácidos Grasos Volátiles	mg/L	3291	2281	1563
Alcalinidad	mg/L	3200,00	1698	1300
pH	s.u	4,89	4,44	4,11
Demanda Química Total de Oxígeno, DQOt	Kg/m3	78,50	65,28	53,55
Demanda Química Soluble de Oxígeno, DQOs	Kg/m3	75,67	61,27	50,56
Sólidos Suspendidos Totales, SST	mg/L	19450	5719	1960
Sólidos Suspendidos Volátiles, SSV	mg/L	14445	4862	1780
Sulfatos, SO4	mg/L	3915	3285	2691
Nitrógeno Total Kjeldahl, TKN	mgN/L	398	231	28
Orto-fosfatos, ortho-P	mgP/L	115	46	23

Fuente: Los autores.

Las vinazas de las destilerías están ubicadas como uno de los residuales orgánicos de mayor efecto contaminante sobre la flora y fauna del planeta. Toda destilería genera vinaza a razón de entre 11 y 14 litros por cada litro de alcohol producido.

Los resultados de los análisis de la vinaza tratada en el biodigestor, se presenta en el cuadro 18. En el estudio se logró una remoción máxima del DQOt del 81.2% y del 89.7% del DQOs.

El tiempo de retención hidráulica es la razón existente entre el volumen del digestor y la carga diaria dosificada al biodigestor. El mínimo tiempo de retención hidráulica logrado en el estudio fue de 8 días.

Cuadro 18: Resumen de resultados para la vinaza tratada.

Resumen de resultados de Operación de la planta piloto				
PARÁMETRO	Unidad	Máximo	Promedio	Mínimo
Ácidos Grasos Volátiles	mg/L	2849	1370	737
Alcalinidad	mg/L	6450	5366	4300
pH	s.u	7.53	7.35	6.97
Demanda Química Total de Oxígeno, DQOt	Kg/m3	28.71	18.39	11.00
Demanda Química Soluble de Oxígeno, DQOs	Kg/m3	25.20	13.87	5.62
Sólidos Suspendidos Totales, SST	mg/L	17569	5362	602
Sólidos Suspendidos Volátiles, SSV	mg/L	14640	3732	409
Sulfatos, SO ₄	mg/L	191	55	16
% de Remoción DQOt	%	81.2	72.0	59.0
% de Remoción DQOs	%	89.7	77.5	61.4
Tiempo de Retención Hidráulica, THR, Días	d	29	12	8
Temperatura del digestor	°C	36.0	32.6	26.2
Alimentación de vinaza al digestor	m ³ /d	2801	2122	480
Relación AGV/ALK en Digestor	s.u	0.47	0.25	0.15

Fuente: Los autores.

Los sulfatos fueron removidos hasta niveles mínimos de 16 mg/l, dependiendo de las características de la vinaza que ingresó al sistema y este sulfato fue transformado por la bacterias del biodigestor hasta un nivel de 1.8 como mínimo y un máximo de 3.2% del biogás generado.

El máximo rendimiento medido fue de 0.32 m³ CH₄/ Kg DQOs, este resultado lo consideramos aceptables para los fines de aprovechamiento del biogás como energía alternativa.

4.1.1. Comparación de resultados de la vinaza cruda y la vinaza que sale del biodigestor

En el Cuadro 19 se hace una comparación de algunos análisis de la vinaza realizados en toda la prueba. Los resultados nos dan los estimados de la remoción del DQOt y DQOs, la remoción de los sulfatos, el comportamiento del pH, y, los sólidos a la entrada y salida del biodigestor.

Cuadro 19: Comparación de resultados de análisis de vinaza que entra y sale del biodigestor

Parámetro	Unidad	Vinaza	
		Entra	Sale
Ácidos Grasos Volátiles	mg/L	2281	1370
Alcalinidad	mg/L	1698	5366
pH	s.u	4,44	7,35
Demanda Química Total de Oxígeno, DQOt	Kg/m ³	65,28	18,39
Demanda Química Soluble de Oxígeno, DQOs	Kg/m ³	61,27	13,87
Sólidos Suspendidos Totales, SST	mg/L	5719	5362
Sólidos Suspendidos Volátiles, SSV	mg/L	4862	3732
Sulfatos, SO ₄	mg/L	3285	55

Fuente: Los autores.

Nota: La comparación es realizada a los promedios para cada variable.

4.2. Evaluación y discusión de resultados financieros

El aprovechamiento del biogás generado reemplaza combustible fósil que es utilizado en la destilería y equivale entre el 70 y 75% del combustible utilizado para la producción de alcohol.

Podemos ver que este reemplazo del biogás por el combustible fósil, la energía eléctrica generada en un turbogenerador que es accionada por el vapor producido por la quema del biogás y los bonos de carbono por las emisiones reducidas al ambiente en caso se quiera aplicar el proyecto como mecanismo de desarrollo limpio ante las Naciones Unidas puede ascender a valores de hasta \$1'077.714.

Aunque la tabla no nos muestra los gastos operativos, estos hay que considerarlos para poder calcular el TIR y el VAN⁴⁰

4.3. Evaluación y discusión de resultados ambientales.

De toda la vinaza generada en la destilería, 238000 m³, se puede generar biogás que puede desplazar 994.785,00 galones de combustible fósil, bunker # 6 que a su vez se puede generar y bajar los impactos por consumo de energía eléctrica a razón de 1'740874 kwh anuales.

4.4. Evaluación y discusión de resultados para proyecto MDL.

Con el reemplazo del combustible fósil y el captar metano de las lagunas abiertas, se reduce a la atmósfera 26.975,00 toneladas de CO₂e y aplicar un proyecto de este tipo como MDL equivale a un aporte de CERs⁴¹ que depende del valor de la tonelada de CO₂ que cueste en el mercado.

⁴⁰ TIR, tasa interna de retorno. VAN, valor actual neto

⁴¹ CERs Certificado de Emisiones Reducidas.

CONCLUSIONES

- El tratamiento de la vinaza, en el sistema anaeróbico utilizado, es viable tanto desde el punto de vista ambiental, económico y socioeconómico, porque constituye un proyecto de mecanismo de desarrollo limpio (MDL).
- La implementación de un proyecto de tratamiento de vinaza constituye una medida de mitigación de impactos ambientales, mejorando la calidad del aire de la zona donde se almacena la vinaza, lográndose bajar los impactos de olores ofensivos ocasionado en las lagunas abiertas.
- Los rendimientos obtenidos de metano contenido en el biogás constituye una fuente de aprovechamiento, como energía alternativa, para desplazar combustible fósil utilizado en la destilería.
- Esta tecnología contribuye a la reducción del efecto invernadero, al reemplazar las actuales lagunas anaeróbicas abiertas que emiten metano por descomposición natural de la materia orgánica de la vinaza.
- Hasta la estabilización del proceso se logró alimentar continuamente con un tiempo de retención hidráulica mínima de 8 días dentro del biodigestor.
- El estudio contribuye a minimizar el impacto que produce la vinaza al medio ambiente, lográndose en esta prueba una remoción promedio del 72 % del DQOt y 77.5% del DQO soluble (DQOs).
- Con niveles de sulfato en la vinaza, de entre 2691 y 3915 mg/L se pudo obtener biogás con un rendimiento máximo de 0.31 m³ de CH₄ por cada kilogramo de DQOs removido.
- El mayor descenso de los sulfatos en la vinaza cruda, hasta valores promedios de 55 mg/L, fue transformado a gas sulfhídrico, que salió con el biogás producido, con niveles del 2.59% de SH₂.

- Una vez estabilizado el sistema, el pH dentro del biodigestor se mantuvo en valores que oscilan entre 6.97 y 7.53. Obteniéndose un efluente con pH neutro después de la biodigestión, esto ayuda notablemente en el manejo de la vinaza degradada para el fertirriego de la caña.
- La implementación y operación de un proyecto con esta tecnología constituye un aporte para la empresa ecuatoriana interesadas a reducir la carga orgánica de sus efluentes.
- Implementar un proyecto de este tipo contribuye al empleo del sector porque se necesita operadores especializados en el manejo del proceso.

RECOMENDACIONES

- Es necesario, debido al contenido de gas sulfhídrico en el biogás, continuar con otros estudios para eliminarlo, ya que es un compuesto que puede causar problemas de corrosión.
- La implementación y operación de un proyecto de tratamiento de vinaza para la producción de biogás conlleva a implementar dentro de la destilería un plan de contingencia.
- Para un proyecto de esta magnitud, las acciones de los directivos deben estar encaminadas a lograr los máximos rendimientos reduciendo al máximo las condiciones de generación de emisiones al ambiente.
- Los potenciales impactos ambientales se encierran a potenciales riesgos de incendio, explosión y afectación a la salud y seguridad si no se tiene las precauciones planificadas.

BIBLIOGRAFÍA

- ANGELIDAKI, I. 1997. Anaerobic Digestion in Denmark past, present and future. Aprovechamiento Energético de Residuos Orgánicos, Nov. Berlín (Alemania), 214-215p.
- CASTRO, M. 1993. Estudio de la melaza de caña como sustrato de la fermentación Acetobutílica. Tesis pregrado Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia 3-35p.
- COFRE, C. 2001. Guía Para la Construcción y Operación de una Planta de Biogás, alimentada con lodos Residuales de la Industria Carnea, Tesis para Optar al Título de Constructor Civil, Universidad Austral de Chile, Valdivia (Chile)86-99p.
- CHINOWETH, D., FANNIN, K. Biological Gasification of Marine Algae, Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, October, pp 87-112(2002).
- DE LA FUENTE, 1995. E. Estudio de la producción de Biogás en una unidad experimental de Relleno Sanitario, Trabajo de tesis para optar al grado de Ingeniero Civil Industrial, Otorgado por la Universidad de Barcelona, España.
- FLOTATS, X, BONMATI, A. CAMPOS, E., TEIRA, R. 2000.El proceso de secado de purines en el marco de Gestión Integral de Residuos Ganadero, Tratamiento de residuos ganaderos, Enero, Madrid (España), 12-15p.
- HONING. P. 1974. Principios de Tecnología azucarera. Segunda edición. Compañía editorial. México. 23-54p.
- LEESON, S. Y SUMMERS, J. 2000.Nutrición Aveal Comercial. Editorial Le'Print Club Express Ltda. Bogotá, Colombia. 43-45p.

- LARRY W. CANTER, 1999. Manual de Evaluación de Impacto Ambiental. Técnicas para la elaboración de un estudio de impacto ambiental. 659-710p.
- QUEZADA, W. 2011. Manual de Industria Azucarera. Creadores Gráficos. Ibarra-Ecuador. 217-218p.
- SWAN, H. Y KARALAZOS. A. 1990. Las melazas y sus derivador. Revista Tecnología. Geplacea. N° 19. España. 78-82p
- SANZ, J. 1997. The Action of antibiotic on the anaerobic digestion process, Biotechnology Review, vol. 2, 11-18p,

REFERENCIAS ELECTRONICAS.

- Sitio Web: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/document-type>
Tema: documentos técnicos de evaluación.
- Sitio Web: <http://www.bancomundial.org/pubsdocs/>
Tema: Publicaciones.
Sitio Web: <http://datos.bancomundial.org/tema/medio-ambiente>
Tema: Indicadores ambientales
- Sitio Web: <http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>
Tema: Conceptos artículos varios sobre
- Sitio Web: <http://www.ambiente.gob.ec/>
Tema: Legislación ambiental, Autoridad Nacional MDL
- Sitio Web: <http://www.ambiente.gov.ar/>
Tema: Legislación ambiental y proyectos ambientales
- Sitio Web: <http://unfccc.int/2860.php>
Tema: Indicadores ambientales
- Sitio Web: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
Tema: Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático.
Sitio Web: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/document-type>

Tema: Indicadores ambientales

- Sitio Web: http://unfccc.int/methods_and_science/items/2722.php

Tema: Metodologías para proyectos MDL.

- Sitio Web: http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/ManualdeUsuariodelModelodeBiogasdeEcuador_V1.pdf

Tema: Modelos biogás Ecuador.

- Sitio Web: <http://espanol.agbioengineering.com/1/post/2010/2/notas-breves-sobre-biogas-en-ecuador.html>

Tema: Notas sobre biogás.

- Sitio Web: <http://www.mipro.gob.ec/>

Tema: Consultas sobre industria y producción en Ecuador.

- Sitio Web: <http://www.cincae.org/laboratorios.htm>

Tema: Centro de investigación, laboratorio CINCAE.

- Sitio Web: <http://www.portalsustentable.cl/es/mercado-de-carbono.html>

Tema: Proyectos sustentables en Chile.

- Sitio Web: <http://www.sancarlos.com.ec/cincae.php>

Tema: Ingenio San Carlos.

- Sitio Web: <http://nubiavalcarcel.files.wordpress.com/2009/06/fermentacion.jpg>

Tema: Fermentación.

- Sitio Web: <http://www.alcoholetilico.com.mx>

Tema: Alcohol etílico.

- Sitio Web: <http://www.manuales.com/manual-de/fermentacion-anaerobica>

Tema: Fermentación anaeróbica.

- Sitio Web: <http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/ usos>

Tema: Usos del Biogás.

GLOSARIO

Ácidos Grasos Volátiles: Son los principales productos intermedios de la digestión anaeróbica de los materiales biodegradables a metano. Las especies de Ácidos Grasos Volátiles comprenden entre otros el ácido acético, butírico, propiónico, etc. Se la expresa como mg/L ó meq/L de ácido acético.

Acetogénesis: es el proceso a través del cual bacterias anaerobias producen acetato a partir de diversas fuentes de energía (por ejemplo, hidrógeno) y de carbono (por ejemplo, dióxido de carbono). Las diferentes especies bacterianas que son capaces de realizar la acetogénesis se denominan colectivamente acetógenos.

Alcalinidad: Se define como la capacidad para neutralizar ácidos y cuantifica a que grado un agua residual puede soportar los cambios de pH.

Alcohol: Producto obtenido mediante destilación y rectificación de mostos que han sido sometidos a fermentación alcohólica.

Antropogénico: se refiere a los efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas a diferencia de los que tienen causas naturales sin influencia humana. Normalmente se usa para describir contaminaciones ambientales en forma de desechos químicos o biológicos como consecuencia de las actividades económicas, tales como la producción de dióxido de carbono por consumo de combustibles fósiles.

Biogás: Mezcla gaseosa producto del proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica biodegradable, su componente principal es el metano.

Biomasa: Todo material de origen vegetal y animal producido mediante procesos biológicos.

Búnker ó Fuel Oil: Derivado del petróleo formado generalmente por una mezcla de aceites residuales, hidrocarburos alifáticos y aromáticos del petróleo, trazas de azufre o nitrógeno, etc. cuyo principal componente es el residuo de la destilación

atmosférica del petróleo. Se lo utiliza en el sector industrial principalmente para equipos de generación de calor y para producir trabajo.

Cambio climático: se entiende al cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

CER: Certificado de Emisiones Reducidas.

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

CH4: Ver metano.

CO2: Ver Dióxido de Carbono.

Combustibles fósiles: son recursos no renovables, no se reponen por procesos biológicos como por ejemplo la madera. En algún momento, se acabarán, y tal vez sea necesario disponer de millones de años de una evolución y descomposición similar para que vuelvan a aparecer.

DAF: (*Downflow Anaerobic Filter*, Filtro Anaeróbico de Flujo Descendente). Tecnología mediante la cual se hace ingresar el agua residual por la parte superior de un reactor anaeróbico que tiene en su interior biomasa adherida a un medio inerte.

DBO, Demanda Bioquímica de Oxígeno: Cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de la materia orgánica biodegradable. Se expresa en mg de oxígeno por litro. Un valor DBO elevado indica un agua con mucha materia orgánica. El subíndice cinco indica el número de días en los que se ha realizado la medida.

DQO, Demanda química de oxígeno: Cantidad de oxígeno necesario para la oxidación química de la materia orgánica del agua residual. Se expresa en miligramo por litro. Un valor DQO elevado indica un agua con muchas sustancias oxidables.

Digestión Aeróbica o Aerobia: Proceso biológico de descomposición de la materia orgánica que se desarrolla en presencia de aire.

Digestión Anaeróbica o Anaerobia: Proceso biológico de descomposición de la materia orgánica que se desarrolla en ausencia de aire.

Digestor de desechos orgánicos o biodigestor: es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar para que a través de la fermentación anaerobia se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los residuos orgánicos.

Dióxido de Carbono: Gas incombustible, inodoro e incoloro.

Efectos adversos del cambio climático: se entiende los cambios en el medio ambiente físico o en la biota resultantes del cambio climático que tienen efectos nocivos significativos en la composición, la capacidad de recuperación o la productividad de los ecosistemas naturales o sujetos a ordenación, o en el funcionamiento de los sistemas socioeconómicos, o en la salud y el bienestar humanos.

Emisiones: se entiende a la liberación de gases de efecto invernadero o sus precursores en la atmósfera en un área y un periodo determinado.

Gas Sulhídrico: Gas incoloro de olor fuertemente ofensivo, soluble en agua.

Gases de efecto invernadero (GEI): se entiende aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenas, que absorben y reemiten radiación infrarroja.

GLP: Gas Licuado de Petróleo, nombre comercial de la mezcla de gases formada por el propano y el butano.

Hoja de Datos de Seguridad de los Materiales (Hojas MSDS): Es el documento “oficial” de un producto químico que indica entre otras cosas sus características físicas, químicas, biológicas y sus riesgos asociados.

Melaza: Subproducto que se obtiene en el proceso de elaboración de azúcar de caña, cuya relación entre sacarosa e impurezas es tal, que ya no debe emplearse en el proceso de cristalización.

Metano: Gas incoloro e inodoro, escasamente soluble en agua.

Metanogénesis: es la formación de metano por microbios. Es una forma de metabolismo microbiano muy importante y extendida. En la mayoría de los entornos, es el paso final de la descomposición de la biomasa.

Nutrientes: Elementos que requieren los microorganismos para su crecimiento y reproducción, en función de la cantidad requerida por las células pueden ser:

Micro nutriente: Nitrógeno y Fósforo.

Macro nutrientes: Potasio, Hierro, Magnesio, Calcio, Zinc, Cobre, Manganeseo, Níquel, Aluminio, Cobalto, Molibdeno.

Organismos anaerobios o anaeróbicos: son los que no utilizan oxígeno (O_2) en su metabolismo, más exactamente que el aceptor final de electrones es otra sustancia diferente del oxígeno.

Potencial Hidrógeno (pH): Indicador del grado de acidez o alcalinidad para este caso de un agua residual.

SH₂: Ver Gas sulfhídrico.

Sólidos Totales Suspendidos: Indicador de la cantidad de material insoluble en un agua residual.

Sumidero: se entiende cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero de la atmósfera.

Vinaza: Líquido café oscuro de densidad similar al agua, tiene alta concentración de DQO y DBO, de carácter ácido y por consiguiente de pH inferior a 7.0.

ANEXOS

Anexo 1:

Indicative simplified baseline and monitoring methodologies for selected small-scale CDM project activity categories

**La Convención Marco de las Naciones
Unidas sobre el Cambio Climático
(CMNUCC)**