

DISEÑO TEÓRICO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE
RESIDUOS DE NARANJA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ

SEBASTIÁN CRIOLLO MARÍN
ESTEBAN RODRÍGUEZ CUERVO

Proyecto Integral para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director

ADRIANA SUESCA DIAZ
MsC. Ing. Química

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Presidente Jurado

Nombre
Jurado

Nombre
Jurado

Bogotá D.C., febrero de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro

Dr. MARIO PASADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectoría Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSE LUIS MACÍAS RODRÍGUEZ

Decana de la Facultad de Ingenierías

Ing. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Director de Programa de Ingeniería Química

Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestos en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Dedico este trabajo de grado, a Dios y aquellas personas que han partido de este mundo; a mis abuelos y mis tías.

Quiero agradecer a mis padres *Oscar Criollo y Lorena Marín*, por su compromiso, entrega, apoyo incondicional en cada momento, que han sido el motor para finalizar esta etapa. También agradezco a mis hermanos y a mi pareja por su compañía, confianza y apoyo.

Quiero agradecer a mis amigos y compañeros que conocí en la universidad por el tiempo compartido, por su apoyo y compromiso. En especial a mi amigo y compañero Esteban Rodríguez, por su empeño, sacrificio, compromiso y dedicación para poder realizar con éxito este trabajo de grado.

Agradezco a todos los profesores y profesoras que han sido han sido parte fundamental en el desarrollo para esta carrera universitaria; en la que me han brindado todo su intelecto, apoyo y compromiso para ser una mejor profesional día a día.

Sebastián Criollo Marín

Dedico este trabajo de grado, a mi madre quien con esfuerzo y sacrificio me permitió llegar a este momento, a mis abuelos quienes se han sido un ejemplo de vida y un ejempló a seguir.

Esteban Rodríguez Cuervo

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	20
OBJETIVO GENERAL	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 Biogás	21
1.1.1 Composición del biogás	21
1.1.2 Beneficios del biogás	22
1.2 Digestión anaerobia	23
1.2.1 Etapas de la digestión anaerobia	24
1.2.2 Microorganismos involucrados en la digestión anaerobia	27
1.3 Factores determinantes en el proceso de digestión anaerobia	29
1.3.1 Naturaleza y composición de la materia prima.	29
1.3.2 Relación carbono-nitrógeno	31
1.3.3 Niveles de sólidos totales	32
1.3.4 Temperatura	33
1.3.5 pH	34
1.3.6 Tiempo de retención hidráulico y velocidad de degradación	35
1.3.7 Nutrientes	35
1.3.8 Compuestos tóxicos e inhibidores de la metanogénesis	35
1.4 Digestores	36
1.4.1 Digestores Batch	36
1.4.2 Digestores continuos o semicontinuos	37
1.4.3 Digestores de mezcla completa	37
1.4.4 Contacto anaeróbico	38
1.4.5 U.A.S.B. (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)	39
1.4.6 Lecho fluidizado	39
1.4.7 Filtro anaeróbico	40
1.4.8 Dos etapas	41

1.4.9	Plantas de globo	41
1.4.10	Plantas de Domo Fijo (Tipo Chino)	42
1.4.11	Planta de Tambor Flotante (Tipo Hindú)	42
2.	GENERALIDADES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA	44
2.1	Sustrato	44
2.1.1	Naranja	44
2.1.2	Partes de la Naranja	45
2.1.3	Composición del sustrato	46
2.1.4	Cosustrato	50
2.2	Volumen a tratar	54
2.3	Capacidad de generación de biogás	55
2.3.1	Modelo de Buswell y Mueller	56
2.3.2	Modelo Boyle	56
2.3.3	Rendimiento Teórico de metano	56
2.4	Cinética del proceso	60
2.4.1	Cinética del crecimiento de microorganismos	61
2.4.2	Cinéticas que consideran la inhibición	62
2.4.3	Inhibición por concentración de sustratos	63
2.4.4	Inhibición por concentración de productos	65
2.5	Modelo cinético digestión anaerobia	66
2.6	Rendimiento específico de metano	67
2.6.1	Rendimiento específico de metano para la cáscara de naranja	67
2.6.2	Rendimiento específico de metano para las excretas bovinas	72
2.7	Producción de metano	73
2.7.1	Sólidos totales y volátiles cáscara de naranja	73
2.7.2	Sólidos totales y volátiles Excretas animales	74
2.7.3	Producción de metano Sustrato y Cosustrato	75
2.7.4	Resultados producción de metano	76
2.8	Conversión del proceso de digestión anaerobia	77
2.8.1	Conversión del proceso de digestión de las cáscaras de naranja	77
2.8.2	Conversión del proceso de digestión del Cosustrato	80
2.8.3	Conversión total del proceso de digestión	82

2.9	Carga de agua necesaria	82
2.10	Tiempo de Retención	83
2.10.1	Elección del TRH	84
3.	DISEÑO PLANTA DE PRODUCCIÓN BIOGÁS	85
3.1	Pretratamientos para la cáscara de naranja	85
3.1.1	Lavado de la cáscara de naranja	85
3.1.2	Molienda o corte de la cáscara de naranja	87
3.1.3	Extracción de Limoneno	88
3.2	Proceso de extracción del aceite	90
3.2.1	Composición del aceite esencial de las cáscaras de naranjas	90
3.2.2	Extracción del aceite	92
3.3	Diseño del digestor	93
3.3.1	Volumen necesario	94
3.3.2	Carga diaria	94
3.3.3	Tipo de digestor	95
3.3.4	Dimensionamiento del digestor	96
3.3.5	Radio del digestor	97
3.3.6	Unidad proporcional	97
3.3.7	Sección cilíndrica del digestor	97
3.3.8	Sección de la cúpula	98
3.3.9	Sección de la base o cono	99
3.3.10	Dimensiones del digestor	100
3.4	Diseño del tanque de compensación	100
3.4.1	Dimensiones de tanque de compensación	101
3.5	Balance de materia	101
3.5.1	Alimento del proceso	101
3.5.2	Balance de materia por digestor	102
3.5.3	Balance de materia del proceso de digestión anaerobia	104
3.6	Composición del biogás	106
3.6.1	Volumen de metano generado	106
3.7	Purificación del biogás	107
3.7.1	Proceso de purificación	108

3.7.2	Simulación del proceso de purificación	109
3.8	Almacenamiento biogás refinado	117
3.9	Proceso global de digetion anaerobia	119
3.9.1	Balance de masa del proceso	120
3.9.2	Balance de energia proceso de digestion	123
3.10	Lodos de digestión	125
4.	ANÁLISIS DE COSTOS INICIAL	127
4.1	Ubicación	127
4.2	Equipos y reactivo requeridos	128
4.2.1	Lavadora Industrial	128
4.2.2	Molino de cuchillas	129
4.2.3	Unidad de pasteurización	129
4.2.4	Digestor	130
4.2.5	Tanque de compensación	131
4.2.6	Torre de adsorción	132
4.2.7	Torre de recuperación DGA	133
4.2.8	Compresor	133
4.2.9	Bomba	133
4.2.10	Intercambiador de calor	134
4.2.11	Tanque de almacenamiento de Biometano	135
4.2.12	Costo de instalación	136
4.2.13	Diglicolamina (DGA)	136
4.3	Transporte materia prima	137
4.4	Servicio industrial	137
4.5	Plan de inversión inicial	138
5.	CONCLUSIONES	139
	BIBLIOGRAFIA	141
	ANEXOS	149

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. <i>Esquema de la digestión anaeróbica de materia orgánica compleja</i>	27
Figura 2. <i>Grupos bacterianos que intervienen en la digestión anaerobia</i>	29
Figura 3. <i>Digestor Batch</i>	36
Figura 4. <i>Digestor continuo o semicontinuo</i>	37
Figura 5. <i>Digestor de Mezcla completa</i>	38
Figura 6. <i>Digestor de contacto anaeróbico</i>	39
Figura 7. <i>Digestor de lecho Fluidizado</i>	40
Figura 8. <i>Digestor de filtro anaeróbico</i>	40
Figura 9. <i>Digestor de dos Etapas</i>	41
Figura 10. <i>Digestor de globo</i>	42
Figura 11. <i>Digestor tipo chino</i>	42
Figura 12. <i>Digestor de tambor flotante</i>	43
Figura 13. <i>Partes de la naranja</i>	46
Figura 14. <i>Curva de crecimiento Bacteriano</i>	61
Figura 15. <i>Rendimiento específico de metano Vs retención del sustrato</i>	69
Figura 16. <i>Rendimiento específico de metano Vs retención del sustrato</i>	69
Figura 17. <i>Rendimiento específico de metano Vs retención del sustrato</i>	70
Figura 18. <i>Rendimiento específico de metano Vs retención del sustrato</i>	70
Figura 19. <i>Lavadora industrial tipo MP-3000/ Nowicki [39]</i>	86
Figura 20. <i>Equipo ZD-XL 4500 [40]</i>	86
Figura 21. <i>Equipo MC - 120/60 [42]</i>	87
Figura 22. <i>Proceso de Extracción del aceite</i>	93
Figura 23. <i>Planta de Biogás tipo chino</i>	95
Figura 24. <i>Partes en que se divide un biodigestor de cúpula fija</i>	96
Figura 25. <i>Sección Cilíndrica</i>	98

Figura 26. <i>Sección Cúpula</i>	99
Figura 27. <i>Sección de la base</i>	99
Figura 28. <i>Dimensiones del digestor</i>	100
Figura 29. <i>Dimensiones del tanque de compensación</i>	101
Figura 30. <i>Balance materia digestor</i>	102
Figura 31. <i>Proceso de digestión anaerobia</i>	104
Figura 32. <i>Proceso global de digestión anaerobia</i>	105
Figura 33. <i>Proceso de absorción</i>	108
Figura 34. <i>Simulación Adsorción con DGA</i>	110
Figura 35. <i>Diagrama mixer</i>	110
Figura 36. <i>Diagrama Compresor 1 e intercambiador H1</i>	112
Figura 37. <i>Diagrama bomba</i>	112
Figura 38. <i>Flujo de DGA VS Fracción molar de metano</i>	114
Figura 39. <i>Diagrama torre T1</i>	114
Figura 40. <i>Diagrama Torre T2</i>	116
Figura 41. <i>Proceso de digestión anaerobia</i>	120
Figura 42. <i>Proceso de digestión anaerobia para el balance de masa</i>	121
Figura 43. <i>Localización Planta</i>	128
Figura 44. <i>Unidad de pasteurización</i>	130
Figura 45. <i>Modelo de digestor [67]</i>	131
Figura 46. <i>Tanque de compensación [68]</i>	132
Figura 47. <i>COMPRESOR LUBRICADO UT100 HP 16 DIESEL [69]</i>	133
Figura 48. <i>Bomba industrial 3 HP 5IME0300 [71]</i>	134
Figura 49. <i>Intercambiador de calor QLB325.1200.08-50K [73]</i>	135
Figura 50. <i>Tanque de almacenamiento CLW [74]</i>	136

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. <i>Composición del Biogás</i>	22
Tabla 2. <i>Componentes comunes e impurezas presentes en el biogás.</i>	23
Tabla 3. <i>Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica.</i>	31
Tabla 4. <i>Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica.</i>	33
Tabla 5. <i>Parámetros de suelo para el cultivo.</i>	45
Tabla 6. <i>Composición química de la cáscara de naranja.</i>	49
Tabla 7. <i>Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.</i>	50
Tabla 8. <i>Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.</i>	51
Tabla 9. <i>Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.</i>	52
Tabla 10. <i>Relación Cosustrato y Sustrato.</i>	52
Tabla 11. <i>Caracterización de estiércol bovino.</i>	54
Tabla 12. <i>Composición elemental de residuos orgánicos.</i>	57
Tabla 13. <i>Composición en peso (Toneladas) para la mezcla de Sustrato y Cosustrato</i>	58
Tabla 14. <i>Composición elemental en porcentaje para la mezcla de Sustrato y Cosustrato.</i>	58
Tabla 15. <i>Coeficientes modelo de Boyle.</i>	59
Tabla 16. <i>Rendimientos teóricos.</i>	59
Tabla 17. <i>Principales inhibidores del proceso de biodigestión.</i>	63
Tabla 18. <i>Parámetros modelo de crecimiento de Gompertz.</i>	68
Tabla 19. <i>Rendimiento de metano.</i>	71
Tabla 20. <i>Coeficientes modelo de Boyle para las excretas bovinas.</i>	72
Tabla 21. <i>Rendimiento específico metano para el sustrato y cosustrato.</i>	73
Tabla 22. <i>Sólidos totales y volátiles cáscara de naranja.</i>	74

Tabla 23. <i>Sólidos totales y volátiles Excretas animales.</i>	74
Tabla 24. <i>Sólidos totales y volátiles sustrato cosustrato</i>	75
Tabla 25. <i>Producción de metano.</i>	77
Tabla 26. <i>Constantes a y b Ecuación de gases de Van der Waals.</i>	79
Tabla 27. <i>Pesos moleculares.</i>	80
Tabla 28. <i>Balance de masa.</i>	80
Tabla 29. <i>Balance de masa.</i>	81
Tabla 30. <i>Balance de materia proceso digestión.</i>	82
Tabla 31. <i>Composición en peso de la salida del proceso.</i>	82
Tabla 32. <i>Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintas regiones.</i>	84
Tabla 33. <i>Composición del aceite esencial de las cáscaras de naranjas.</i>	91
Tabla 34. <i>Propiedades Fisicoquímicas de Limoneno.</i>	92
Tabla 35. <i>Flujo de alimento del proceso.</i>	102
Tabla 36. <i>Flujo corriente de alimentación.</i>	103
Tabla 37. <i>Flujos de las corrientes de salida de materia.</i>	103
Tabla 38. <i>Balance de materia para un digestor.</i>	103
Tabla 39. <i>Flujos de salida de materia.</i>	106
Tabla 40. <i>Composición en peso del Biogás.</i>	106
Tabla 41. <i>Composición gas natural.</i>	107
Tabla 42. <i>Flujo corriente Biogás sin refinar.</i>	111
Tabla 43. <i>Flujos corrientes H₂S.</i>	111
Tabla 44. <i>Flujo corriente Biogás 1.</i>	111
Tabla 45. <i>Presión y Temperatura corriente 4.</i>	112
Tabla 46. <i>Presión y Temperatura corriente 4.</i>	112
Tabla 47. <i>Flujo corriente DGA.</i>	113
Tabla 48. <i>Flujos corrientes de Biometano.</i>	115
Tabla 49. <i>Flujos corrientes de Fondos.</i>	115
Tabla 50. <i>Flujos corrientes DGA R.</i>	116

Tabla 51. <i>Flujo corriente Gases.</i>	117
Tabla 52. <i>Datos de biometano para un día de operación.</i>	118
Tabla 53. <i>Información básica Tanque CLW.</i>	118
Tabla 54. <i>Dimensiones Tanque CWL.</i>	119
Tabla 55. <i>Flujos de materia del proceso de producción de biogás.</i>	122
Tabla 56. <i>Flujos de materia del proceso de producción de biogás.</i>	122
Tabla 57. <i>Balance de materia del proceso.</i>	123
Tabla 58. <i>Carga inicial para un digestor.</i>	124
Tabla 59. <i>Calores Específicos.</i>	124
Tabla 60. <i>Plan de inversión Inicial.</i>	138

RESUMEN

En el desarrollo de este trabajo de grado se presenta una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos como lo son; cáscaras de naranja y excretas bovinas, adicional a esto se plantea un posible diseño de una planta que puede ser usado para la producción de biogás. Inicialmente se realizó la búsqueda de los conceptos y principios sobre la producción de biogás entre ellos tenemos: composición y propiedades del biogás, características y composición de la cascara de naranja y de las excretas bovinas, se estudió el proceso de digestión anaeróbica donde a lo largo del primer capítulo se describe las distintas etapas que comprenden el proceso; hidrolisis, etapa fermentativa o acidogénica, la etapa acetogénica y la etapa metanogénica. Por último, en este capítulo se realizó una revisión bibliográfica de las tecnologías de digestores que se tienen en la actualidad a partir de dicha información se escogió el digestor que se usara para el respectivo diseño de planta.

Seguido se describen las generalidades del proceso en la producción de biogás, allí se muestra las condiciones a las que se lleva a cabo el proceso, tipos de microorganismos que se pueden utilizar, tiempos de retención, rendimientos teóricos para los sustratos usados, cargas iniciales y diarias de materia prima. A partir de ello se definió como se llevaría a cabo el proceso y se plantea en el capítulo tres (3) todo lo relacionado al diseño del digestor en el cual se determinó el uso de tres (3) digestores de 600 m³, además del proceso de refinación del biogás, el cual consiste en una adsorción de CO₂ con Diglicolamina (DGA).

Por último, se realizó un plan de inversión inicial para llevar a cabo el proyecto en mención, donde se tomaron distintos criterios para la estimación de un valor inicial, entre estos tenemos: costo de terreno por metro cuadrado, costo para la adquisición de equipos, costo de transporte de materia prima y costos relacionados a servicios industriales requeridos para la producción de biogás el cual se estima en aproximadamente \$5.543.621.845, teniendo en cuenta que este valor se verá afectado al cambio constante del valor TRM.

Palabras claves: Digestión anaeróbica, biogás, digestor, cáscaras de naranja, excretas bovinas.

INTRODUCCIÓN

En Colombia la cosecha de cítricos tiene una producción estimada de 1.206.856 toneladas al año [1]. En los procesos de recolección, procesamiento, distribución y consumo final se generan grandes cantidades de residuos de estas frutas, solo para la producción de jugos cítricos, la industria nacional desecha alrededor 15 a 25 toneladas semanales de cáscara de naranja [2], las cuales terminan en botaderos a cielo abierto o en rellenos sanitarios generando gases de efecto invernadero, en el caso del relleno sanitario Doña Juana se reciben diariamente 6368 toneladas al día de residuos sólidos [3] de los cuales el 51.32% corresponde a residuos sólidos orgánicos y el 8.05% corresponden a residuos sólidos orgánicos cítricos [4]. Todo el proceso de recolección y transporte necesita grandes cantidades de combustible para operar, en Bogotá se realizan en promedio 684 viajes diarios de recolección [3], lo que se traduce en emisiones de gases de efecto invernadero que agravan el problema ambiental.

Se presenta la producción de biogás a partir de estos residuos cítricos, como alternativa a su acumulación en rellenos sanitarios, de esta forma, se estaría reutilizando una materia prima que no posee valor comercial, que representa un problema ambiental y se le estaría transformando en un compuesto de valor, con un alto poder calorífico, y que puede llegar a ser usado como combustible en distintos procesos, adicional, el proceso de producción del biogás genera distintos subproductos los cuales también poseen valor en el mercado, como lo son el biol como fertilizante, compuestos como la pectina que es usada como espesante y el D-Limonelo con aplicaciones en la industria cosmética.

La producción del biogás se logra mediante el uso de sistemas biológicos y utilizando un biodigestor anaeróbico, donde se busca la producción del gas metano (biogás) y subproductos como fertilizantes naturales (biol), a partir de un sustrato como lo son los residuos cítricos.

Otra alternativa para el tratamiento de los residuos cítricos y que es muy similar en finalidad a la producción del biogás, es la pirolisis, pues, es posible quemar los residuos orgánicos directamente para producir energía, no obstante, dado el bajo poder calorífico

de los residuos orgánicos cítricos versus la alta producción de gases de efecto invernadero en el proceso, se entiende que es menos sostenible que el biogás, aun así, se perfila como alternativa a su acumulación bajo tierra.

Esta tesis presenta una estrategia que consiste en la producción de biometano mediante la digestión anaerobia de residuos de naranja, comúnmente conocidos como “cáscara”, junto con un cosustrato, se tuvieron en cuenta factores como: el tiempo de retención, la temperatura del proceso, las características fisicoquímicas y cinéticas de los sustratos, además de definir procesos y equipos para la digestión, purificación y almacenamiento del biogás.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un proceso de digestión anaerobia aplicable industrialmente para la obtención de Biogás de residuos de cáscara de naranja.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir las generalidades del proceso de digestión anaeróbica con residuos de naranja.
2. Plantear el diseño conceptual de la planta de digestión anaerobia para la obtención Biogás.
3. Realizar el análisis de costo inicial del proyecto.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Biogás

El biogás es una mezcla de gases producto de la descomposición de la materia orgánica por agentes microbianos en ambientes anaerobios, en un proceso conocido como degradación anaerobia.

El biogás es considerado como una fuente de energía no convencional y una excelente opción para reemplazar al gas natural, con todas sus bondades y ventajas incluidas, aplica como combustible para calefacción, cocción, refrigeración y generación de energía lumínica [5]. También puede utilizarse como carburante en los motores de combustión interna y celdas de combustible para la producción de trabajo mecánico y/o electricidad

1.1.1 Composición del biogás

El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas [6], la composición del biogás varía según el sustrato empleado y las condiciones de operación del proceso de digestión anaerobia.

Generalmente el gas está compuesto principalmente de 55 al 70% [7] por metano (CH_4) y de dióxido de carbono (CO_2), se pueden encontrar concentraciones bajas de otros gases como: hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). La tabla 1 muestra la composición que debe poseer el biogás.

Las impurezas deben ser retiradas del producto final, debido, a que afectan la calidad del biogás, generan problemas de corrosión en tuberías y equipos y pueden tener efectos negativos sobre la salud humana.

Tabla 1.

Composición del Biogás

Composición	55 - 70% Metano 30 - 45 % Dióxido de carbono Trazas de otros gases
--------------------	--------------------------------------------------------------------------

Nota. Esta tabla muestra la composición en volumen indicada para el biogás, para que este sea útil como combustible. Tomado de: *D. Deublein y A. Steinhauser, Biogas from waste and renewable resources., Wiley –VCH, 2008. P.86*

1.1.2 Beneficios del biogás

El biogás es una fuente de energía alternativa permite aprovechar los desechos procedentes de distintas actividades humanas, y convertirla en energía renovable y de bajo costo [5]. Se diferencia de las otras energías alternativas en que su producción puede ser continua y no depende de factores climáticos, siendo una fuente de energía que puede operar de forma continua, dependiendo únicamente de la disponibilidad el sustrato.

Para la producción del biogás en la ciudad de Bogotá, usando como sustrato las cáscaras de naranja o desperdicios de esta misma fruta, se presentan los siguientes beneficios:

- Reducción de la carga orgánica en el vertedero de la ciudad.
- Reducción de malos olores asociados a la descomposición de la materia orgánica.
- Producción de biol, como fertilizante derivado de la producción del gas.
- Producción de un energético (biogás).

En la tabla 2 se presentan algunos componentes comunes presentes en el biogás y su efecto sobre la calidad del mismo.

Tabla 2.*Componentes comunes e impurezas presentes en el biogás.*

COMPONENTE	CONTENIDO	EFECTO
Dióxido de carbono	25-50% en Volumen	Disminuye el poder calorífico. Causa Corrosión si el gas se humedece (ácido carbónico en baja concentración). Daña Celdas de combustible alcalinas
H ₂ S	0-0.5% en Volumen	Efecto corrosivo en equipos y sistemas de tuberías (fatigas por corrosión): muchos establecen un límite de 0,05 en volumen. Emisiones de SO ₂ después de los quemadores o emisiones de H ₂ S cuando la combustión es incompleta- límite máximo es 0,1% en volumen.
NH ₃	0-0.05% en Volumen	Emisiones de NO _x dañan las células de combustibles. Incrementa las propiedades antidetonantes de los motores. Causa corrosión en sistemas de tuberías y equipos. La condensación daña instrumentos.
Vapor de Agua	1-5% en Volumen	Riesgo de congelamiento en tuberías y boquillas en países fríos.
Polvo	> 5 m Volumen	Bloquea boquillas y celdas de combustible.
N ₂	0-5% en Volumen	Disminuye el poder calorífico. Incrementa las propiedades antidetonantes de los motores
Siloxanos	0-50% mg/m ³	Actúa como abrasivo y daña motores

Nota. Esta tabla presenta distintas impurezas presentes en el biogás. Tomado de: M. A. Forero Carrasco y A. C. Sánchez Quevedo, Desarrollo de la ingeniería conceptual del proceso de producción de biogás mediante los residuos orgánicos provenientes de la plaza distrital de mercado siete de agosto, Bogotá D.C: Fundación Universidad de América, 2017, pp 38.

1.2 Digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia consiste en la descomposición microbológica de la materia orgánica en un ambiente ausente de oxígeno, produciendo biogás que se

compone principalmente de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de ácido sulfhídrico (H_2S) [8].

La digestión anaeróbica permite aprovechar una gran cantidad de residuos orgánicos, sean de origen animal o vegetal, para convertirlos en materia útil como lo es el biogás o el biol, además, en el proceso el 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano [6].

1.2.1 Etapas de la digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia se suele dividir en cuatro fases etapas:

1. Hidrólisis.
2. Etapa fermentativa o acidogénica.
3. Etapa acetogénica.
4. Etapa metanogénica

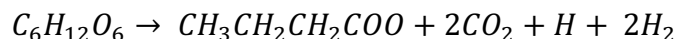
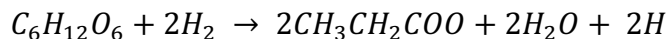
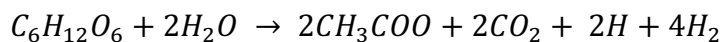
1.2.1.a. Hidrólisis. Esta primera etapa se inicia con la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos, dado que la materia orgánica polimérica (carbohidratos, grasas y proteínas) no puede ser procesada por los microorganismos, debido, a que, las macromoléculas orgánicas son demasiado grandes para ser absorbidas y utilizadas directamente como sustrato [9]. Se hace necesario romperlos en compuestos susceptibles de emplearse como fuente de materia y energía, son convertidos en monómeros simples por exoenzimas (hidrolasa) producidas por los microorganismos presentes en esta etapa.

La hidrólisis puede suele ser la etapa que limita la velocidad global del proceso, sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos, la velocidad de descomposición de esta etapa depende de la naturaleza del sustrato, por ejemplo: La transformación de celulosa y hemicelulosa generalmente es más lenta que la descomposición de proteínas [10]. La hidrólisis de los carbohidratos puede ocurrir en unas pocas horas, la de proteínas y lípidos en días, por el contrario, la hidrólisis de la lignocelulosa y lignina es lenta y muchas veces esta transformación es incompleta.

Lo anterior se debe a es la lignina es muy resistente a la degradación microbiana, afectando, la degradación de otras moléculas como la celulosa, la hemicelulosa y de otros hidratos de carbono. Dado que la etapa de la hidrólisis puede definir la velocidad global de proceso, el uso de pretratamientos sobre el sustrato que rompan las macromoléculas presentes, tendrá efectos positivos en el proceso, reduciendo el tiempo del mismo y llevando a tamaños de reactores más pequeños [6].

1.2.1.b. Etapa fermentativa o Acidogénica. En esta etapa los productos de la etapa de hidrólisis son absorbidos por diferentes bacterias facultativas y obligatorias se degradan en ácidos orgánicos de cadena corta como: ácido butírico, propiónico, acético, hidrógeno y dióxido de carbono [9].

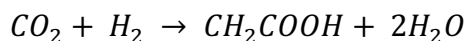
Las reacciones que gobiernan esta etapa son [11]:



1.2.1.c. Etapa acetogénica. En esta etapa parte de los productos obtenidos en la fase anterior como el hidrogeno y el acético son metabolizados directamente por los organismos metanogénicos. Los productos que no pueden ser metabolizados directamente en esta etapa (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos), son oxidados en compuestos más sencillos como lo son el acetato e hidrógeno, esto para facilitar la digestión de los mismos.

Para esta etapa ya se ha consumido la mayor parte de la biomasa presente en sustrato, como resultado de lo anterior las bacterias anaeróbicas y como resultado del metabolismo de estas bacterias, se generan algunos desechos, principalmente ácidos volátiles sencillos, los cuales, servirán de sustrato para las bacterias metanogénicas.

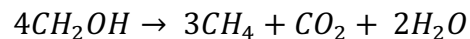
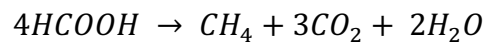
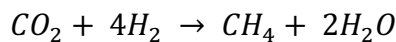
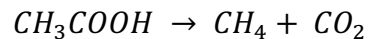
La reacción que gobierna esta etapa es [12]:



1.2.1.d. Etapa metanogénica. En esta última etapa ocurre la digestión bacteriana del ácido acético y del ácido fórmico en dióxido de carbono y metano, además, de la formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrogeno. La transformación del ácido acético en CH₄, representa la principal vía de producción de metano, produciendo el 70 % del metano del proceso [9].

La metanogénesis es un paso crítico en la totalidad del proceso de digestión anaeróbica, ya que es la reacción bioquímica más lenta del proceso [10] y puede constituir la etapa limitante del proceso de degradación anaeróbica.

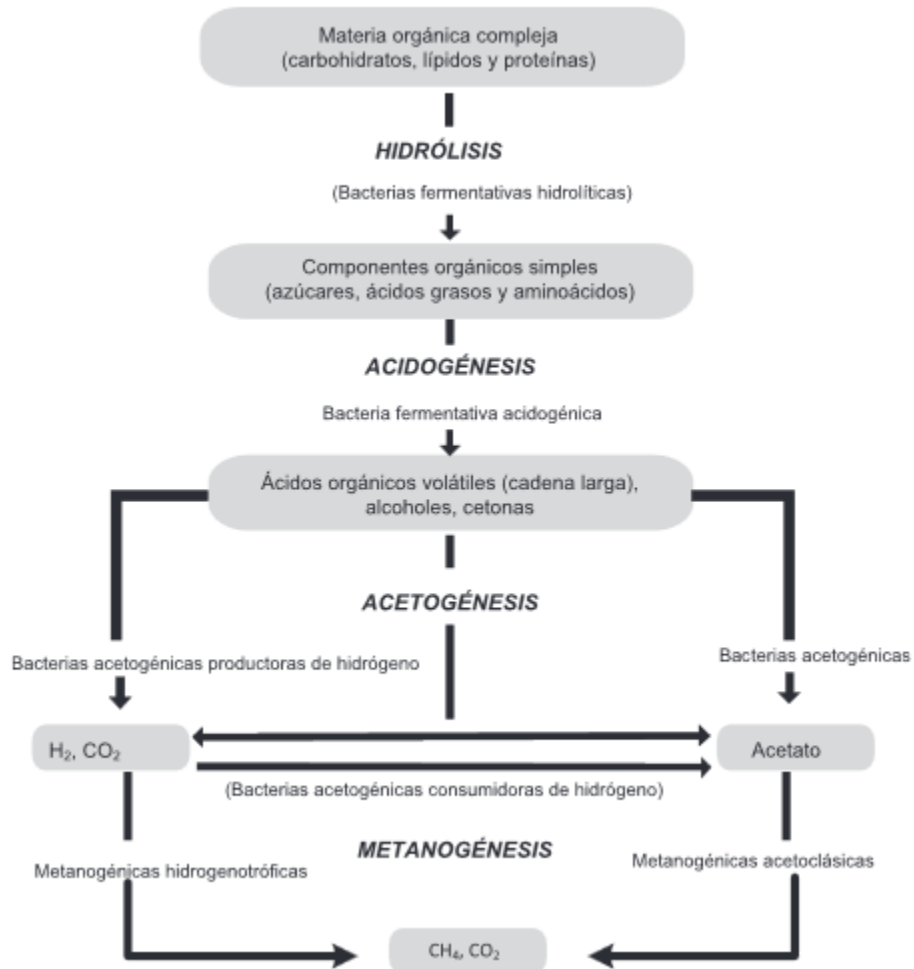
Las reacciones que describen el proceso son [13]:



La figura 1 presenta de forma gráfica el proceso de digestión anaerobia para la materia orgánica, resaltando los compuestos involucrados, el tipo de bacterias presentes en cada etapa y los distintos productos generados.

Figura 1.

Esquema de la digestión anaeróbica de materia orgánica compleja



Nota. La figura presenta la ruta bioquímica para el proceso de producción de biogás. Tomada de B. S. Moraes , M. Zaiat y A. Bonomi , «Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives,» Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 44, pp. 893

1.2.2 Microorganismos involucrados en la digestión anaerobia

Existe una diversidad enorme en los tipos de microorganismos involucrados en la digestión anaerobia, por lo general las especies de microorganismos en el proceso, puede varían según el tipo de sustrato y los componentes orgánicos presentes.

Es posible separar el proceso en dos partes, según del tipo de microorganismos presentes en las etapas, en las dos primeras etapas de la digestión, se encuentran bacterias de

128 órdenes de 58 especies y 18 géneros. Las especies más comunes en estas etapas son *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Eubacterium* y *Bacteroides*.

En las siguientes dos etapas del proceso de digestión, se encuentran principalmente bacterias metanogénicas, de 81 especies, de 23 géneros, 10 familias y 4 órdenes.

1.2.2.a. Microorganismos involucrados en la etapa de hidrólisis. Entre los microorganismos encontrados en la hidrólisis se destacan: *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propionibacterium*, *Sphingomonas*, *Sporobacterium*, *Megasphaera*, *Bifidobacterium*.

1.2.2.b. Microorganismos involucrados en la etapa fermentativa. Gran parte de los microorganismos que están involucrados en la etapa de la hidrólisis también lo están en esta etapa. Géneros como *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus*, que, aunque están presentes en todas las etapas, son mayoritarios en esta etapa.

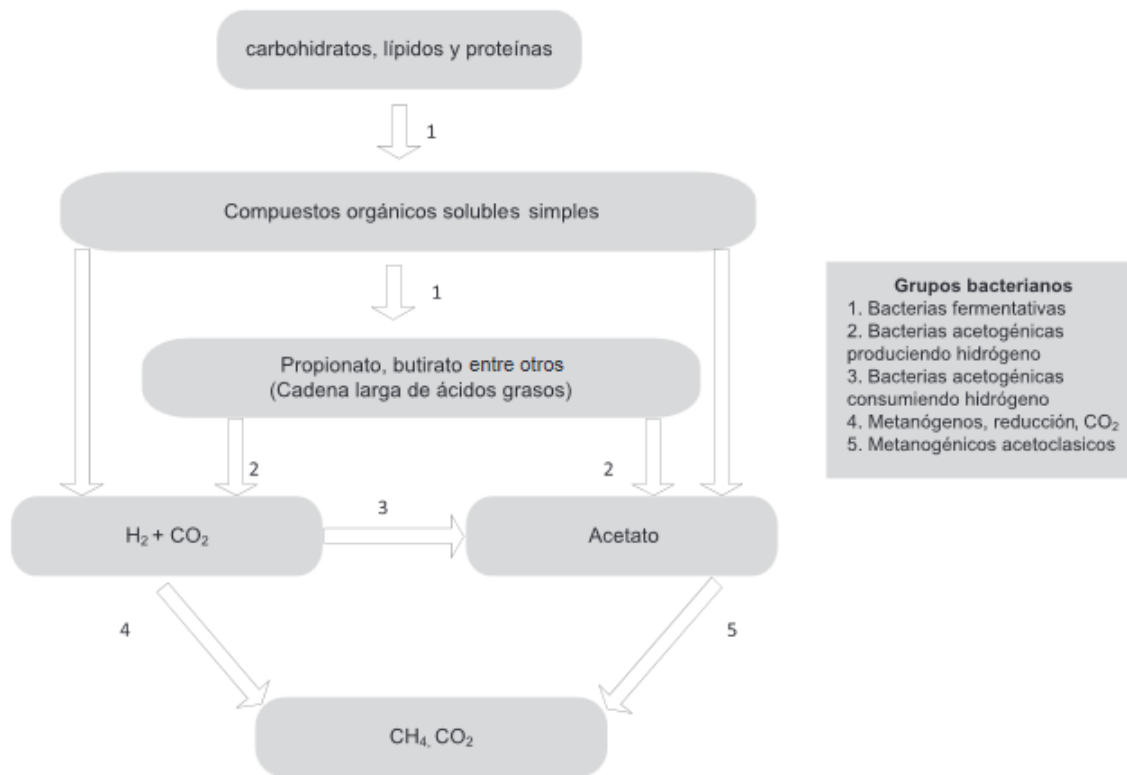
1.2.2.c. Microorganismos involucrados en la etapa acetogénica. Las bacterias acetogénicas reductoras de sulfato, son capaces de degradar lactato y etanol, pero no son capaces de degradar ácidos grasos y compuestos aromáticos [6]. Géneros como *Ruminococcus*, *Cytophaga*, *Flavobacterium-Bacteroides*, son comunes en esta etapa.

1.2.2.d. Microorganismos involucrados en la etapa metanogénica. Los microorganismos denominados como Arqueas metanogénicas dominan esta última etapa del proceso, Las principales especies de Arqueas presentan están representadas por *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *hungatii*, y *Methanosarcina*.

En la figura 2 presenta de forma gráfica el proceso de digestión anaerobia para la materia orgánica, resaltando el tipo de bacterias presentes en cada etapa.

Figura 2.

Grupos bacterianos que intervienen en la digestión anaerobia



Nota. La figura presenta los grupos bacterianos que intervienen en la digestión anaerobia. Tomada de R. A. Parra Huertas, «Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria,» Producción + Limpia, vol. 10, pp. 146.

1.3 Factores determinantes en el proceso de digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico complejo, por tanto, es importante tener en cuenta los factores que se ven involucrados y que pueden afectar el proceso, los microorganismos asociados a la digestión son muy susceptibles a las condiciones ambientales, por tanto, es necesario un correcto de aspectos como: temperatura, el tipo de materias primas, nutrientes y concentración de minerales traza, pH, toxicidad entre otros.

1.3.1 Naturaleza y composición de la materia prima

Existen una gran diversidad de material orgánico que es susceptible a la digestión orgánica, este material debe cumplir con una serie de características bioquímicas que favorezcan el desarrollo y la actividad microbiana del proceso.

Se requiere de un sustrato capaz de aportar grandes cantidades de carbono y nitrógeno, elementos fundamentales para la actividad microbiana, dado que, el nitrógeno se utiliza como constituyente para la formación de la estructura celular, y el carbono se utiliza como fuente de energía [14] pero a su vez, se necesita mantener un equilibrio en las sales minerales (azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, níquel y otros menores).

Se pueden aprovechar una gran cantidad de sustratos provenientes de distintas actividades o industrias, materiales como: excrementos, aguas residuales orgánicas de las industrias, restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, son susceptibles a ser degradados, pero el tiempo y el rendimiento en la degradación de cada uno de estos puede variar enormemente, también puede presentarse el caso que sea necesario agregar las sustancias antes descritas o de realizar tratamientos previos al sustrato, con el fin, de mejorar este rendimiento en la digestión, por ejemplo: sustancias con altos contenidos de lignina no pueden ser aprovechados directamente y es necesario someterlos a un pretratamiento.

Es posible clasificar los sustratos en cuatro tipos, según características cuantitativas como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO) [6]. La tabla No. 4 muestra la clasificación de sustratos.

Las cuatro clases o tipos de sustratos son:

1.3.1.a. Sustratos de clase 1. Pueden degradarse eficientemente en digestores tipo Batch o por lotes.

1.3.1.b. Sustratos de clase 2. Son degradados de manera eficiente en digestores mezcla completa de operación continua.

1.3.1.c. Sustratos de clase 3. Deben tratarse con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio, esto por presentar una dilución mayor y en consecuencia una DQO menor.

1.3.1.d. Sustratos de clase 4. Debido a su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia.

La tabla 3 muestra la clasificación de distintos sustratos empleados en la digestión anaerobia.

Tabla 3.

Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica.

Características	Clase	Tipo de Sustrato	Características Cuantitativas
Sólidos	1	Basura Domestica Estiércol Solido Restos de Cosecha	> 20 % ST 40 - 70 % Fracción Orgánica
Lodo altamente contaminado, Alta viscosidad	2	Heces Animales	100-150 g/l DQO 5% - 1P% ST 4- 8 % SV
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos	3	Heces Animales de cría Levante diluido con agua Aguas residuales de mataderos	3-17 g/l DQO 1-2 g/l SS
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de Agroindustria Aguas Negras	5-18 g/l DQO 4-500 g/l DQO

Nota. Se presenta distintos tipos de sustrato para el proceso de digestión anaerobia. Tomado de: M. T. Varnero Moreno, «MANUAL DE BIOGÁS,» “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. Santiago de Chile.pp. 33

1.3.2 Relación carbono-nitrógeno

Como se mencionó anteriormente el carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimento de las bacterias, dado que el consumo de carbono es 30 veces superior al del nitrógeno, se considera que la relación óptima de estos dos elementos en el sustrato o materia prima, debe estar en un rango de 30:1 hasta 20:1 carbono: nitrógeno [6].

Mantener dentro del rango la relación carbono nitrógeno, es de suma importancia para lograr una producción optima del biogás, dado que, en una relación de carbono superior a 30:1, el proceso ocurrirá de forma muy lenta, debido a la falta de nitrógeno la tasa de

multiplicación celular será baja, llevando a un proceso con un periodo de producción muy largo. Por otro lado, en una relación de carbono inferior a 20:1 se puede inhibir la actividad de bacteriana debido a la formación en exceso de compuesto de amonio.

Por tanto, cuando no se tiene un sustrato con una relación C: N adecuada, es necesario realizar mezclas con cosustratos para lograr relaciones C: N óptimas para calcular la relación de carbono nitrógeno de una mezcla de distintas sustancias o para agregar un cosustrato que permita alcanzar relaciones C:N optimas, se puede hacer uso de la siguiente ecuación [6]:

$$K = \frac{C_1Q_1 + C_2Q_2 + \dots C_nQ_n}{N_1Q_1 + N_2Q_2 + \dots N_nQ_n} \quad (1)$$

Donde:

K: C/N de la mezcla de sustratos.

C: % de carbono contenido en el sustrato

N: % de nitrógeno contenido en el sustrato

Q: Peso fresco del sustrato.

1.3.3 Niveles de sólidos totales

La cantidad de sólidos totales óptima para el proceso, varia, según el tipo de digestor a utilizar, digestores semicontinuos el porcentaje de ST no debe ser superior del 8% a 12 %, para el caso de los digestores discontinuos este porcentaje debe estar entre el 40 a 60% [6].

De esta forma, si el sustrato presenta un porcentaje de sólidos totales superior a lo indicado, es necesario realizar una dilución con agua. Para calcular la cantidad de agua necesario se puede hacer uso de la siguiente ecuación:

$$\% S.T \text{ dilución} = \frac{1 \text{ kg de sustrado} * \% S.T \text{ sustrado}}{1 \text{ kg de sustrato} + W} \quad (2)$$

Donde:

% S.T dilución: porcentaje de S.T para carga al digestor.

% S.T sustrato: porcentaje de S.T del sustrato elegido.

W: agua necesaria.

1.3.4 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en la digestión anaerobia ya que puede determinar la velocidad del proceso, al ser un proceso biológico, este dependerá de la velocidad del crecimiento de los microorganismos que, a su vez, dependen de la temperatura, por lo tanto, un correcto manejo de la temperatura, aumentara la velocidad de crecimiento de los microorganismos, dando lugar a mayores producciones de biogás.

La digestión anaerobia se puede trabajar dentro de tres rangos de temperatura, donde la velocidad máxima específica de crecimiento mayor, conforme aumenta el rango de temperatura. En la tabla 4 se presenta la clasificación del proceso en función de su temperatura y el tiempo de fermentación.

Tabla 4.

Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica.

Fermentación	Mínimo	Optimo	Máximo	Tiempo de Fermentación
Psicrofílica	4 - 10 °C	15 - 18 °C	20 - 25 °C	Sobre 100 días
Mesofílica	14 -20 °C	25 - 35 °C	35 - 45 °C	30 a 60 días
Termofílica	25 - 45 °C	50 - 60 °C	75 - 80 °C	10 a 15 días

Nota. Esta tabla muestra las condiciones de temperatura para distintos tipos de fermentación. Tomado de: M. T. Varnero Moreno, «MANUAL DE BIOGÁS,» “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. Santiago de Chile.pp. 39.

El rango de temperatura psicofílico se presenta como el menos viable, debido a que requiero grandes tamaños de digestores, aunque, es de resaltar que este presenta menores consumos de energía y mayor estabilidad con respecto a los otros dos rangos de operación.

En la actualidad el rango de operación mesofílico es el más extendido, pero se está implementando cada vez más el rango termofílico, el cual, permite obtener mayores

rendimientos, pero con una gran inestabilidad a los cambios de temperatura y la posible aparición de compuestos tóxicos a altas temperaturas.

Para todos los casos, se entiende que la actividad biológica se duplica dentro de los rangos de temperatura óptima con respecto a los rangos mínimos, además, para lograr un óptimo funcionamiento del digestor, este debe estar diseñado de forma que las variaciones de temperatura no excedan de los 0.6 a 1.2 °C al día [6].

1.3.5 pH

Los cambios en el pH tienen efectos adversos en el proceso anaeróbico, debido a que los microorganismos metanogénicos son muy susceptibles a las variaciones de pH en el medio, aunque, en la digestión anaeróbica participan distintos grupos bacterianos, los niveles de pH óptimos para este se encuentra en torno a la neutralidad.

Para grupos bacterianos acidogénicos el pH óptimo se encuentra entre 5.5 a 6.5, para grupos metanogénicos el pH óptimo va de 7.8 a 8.2. Para el caso de cultivos mixtos donde convivan ambos grupos bacterianos el rango de pH se encuentra de 6.8 y 7.4, siendo un pH neutro el valor óptimo [6].

La importancia en el control del pH, no solo radica en el efecto que tiene sobre la cantidad de biogás a producir, sino que, además, tiene efectos sobre la composición del mismo, valores de pH bajos llevan a un biogás con bajo contenido de metano, con pobres propiedades energéticas, esto se debe a que en condiciones bajas de pH se reduce la actividad de las bacterias metanogénicas encargadas de la producción de la mayor parte del metano del biogás.

El nivel de pH deseado para la operación del digestor se puede alcanzar de dos maneras, la primera es ajustando el pH de las materias primas antes de que ingresen al digestor o controlando el pH directamente en este, la segunda opción, acompañada de un continuo monitoreo de los niveles de pH, permite un mayor control de esta variable. Para corregir el pH se utilizan químicos como bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoniacal, cal, hidróxido de sodio y potasio.

1.3.6 Tiempo de retención hidráulico y velocidad de degradación

El tiempo de retención hidráulico es un promedio de tiempo de la permanencia del material orgánico dentro del digestor, este valor está directamente relacionado con la temperatura del proceso y el tipo de reactor a utilizar [8].

Dado que las bacterias requieren de un periodo de tiempo para degradar la biomasa. La duración de este proceso es conocido como velocidad de degradación, y esta velocidad depende de la temperatura, a mayores temperaturas (temperaturas no superiores a los límites termófilos), menor es el tiempo de retención.

Los tiempos de retención se calculan según el tipo de digestor que se esté manejando. Para operaciones con digestores discontinuos, el tiempo de retención será el tiempo que transcurre entre la carga y su descarga del digestor.

1.3.7 Nutrientes

Como se mencionó con anterioridad, además de carbono y nitrógeno, los microorganismos presentes en la digestión anaerobia, requieren macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (minerales traza).

Para el caso de los macronutrientes, la cantidad de estos se puede calcular, de forma empírica asumiendo una célula bacteriana anaeróbica como $C_5H_7O_2N$, donde el nitrógeno representa un 12% de la masa celular, por tanto, se necesitaría aproximadamente de 12g de nitrógeno por cada 100 de biomasa bacteriana. De forma general la demanda de fósforo será menor a la del nitrógeno, representando de un 1/7 a 1/5 de la demanda de este último [6].

1.3.8 Compuestos tóxicos e inhibidores de la metanogénesis

Dentro del proceso de digestión anaerobia es necesario realizar la medición de aquellos factores que pueden generar la inhibición del proceso, existen varios compuestos o elementos que pueden ser tóxicos o afectar el correcto funcionamiento del proceso.

1.3.8.a. Hidrogeno. El hidrogeno, aunque es un compuesto intermedio en el proceso anaeróbico, la acumulación de este, inhibe la fase de acetogénesis, generando una acumulación de ácidos grasos volátiles.

1.3.9.b. Ácidos grasos volátiles. Formas no ionizadas de ácidos grasos volátiles (AGV) en concentraciones de 30 – 60 mg/L [6] inhiben las funciones de las bacterias metanogénicas, provocando una inestabilidad en el proceso, reflejado en una disminución de la producción del biogás.

1.4 Digestores

Para llevar a cabo la digestión anaerobia se debe hacer uso de un biodigestor, según la literatura consultada se tienen los siguientes tipos de digestores usados en la actualidad.

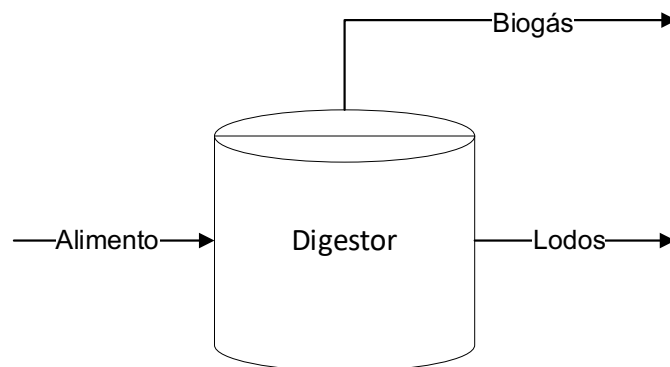
1.4.1 Digestores Batch

Estos se caracterizan por su carga y descarga, en ambos casos se hace de manera total, se tiene un tiempo para realizar el mantenimiento y limpieza a la cámara de digestión. Este sistema tiene un uso a escala laboratorio y en el tratamiento de desechos vegetales.

Para el arranque de este sistema se estima que se debe tener una proporción de inóculo del 20%. Según su curva de producción de gas, su comportamiento sigue la característica de arranque - estabilización – agotamiento. [15], un ejemplo gráfico del digestor tipo batch se presenta en la figura 3.

Figura 3.

Digestor Batch



Nota. Figura base de un digestor tipo batch, se representan las corrientes de entrada y salida.

1.4.2 Digestores continuos o semicontinuos

En estos digestores el volumen que se va ingresando en la cámara, equivalentemente del efluente se evacua por la corriente de salida. Siguiendo esto se mantendrá un volumen de sustrato constante dentro de la cámara de digestión. Se debe realizar la siguiente aclaración; en los digestores continuos se realiza la carga diariamente, mientras que un digestor semicontinuo se realiza una descarga total del equipo esto con fines de realizar mantenimientos preventivos.

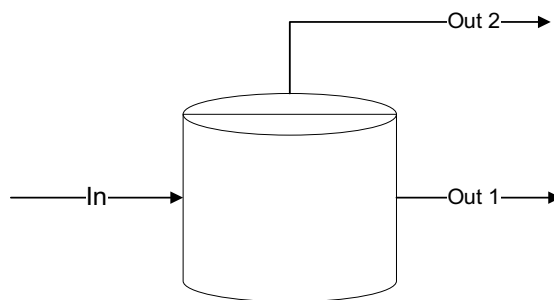
El tiempo de permanencia o retención de la biomasa (sustrato) en estos digestores se calcula por medio de la siguiente relación:

$$\text{Tiempo de Retención} = \frac{\text{Volumen de la camara de digestion}}{\text{Volumen de carga diaria}} \quad (3)$$

Es de aclarar que el valor obtenido no es exacto, esto a partir de que el material (sustrato) introducido puede que salga en un periodo de tiempo más corto [15], un ejemplo grafico del digestor tipo continuo se presenta en la figura 4.

Figura 4.

Digestor continuo o semicontinuo



Nota. Figura base del tipo de digestor continuo o semicontinuo.

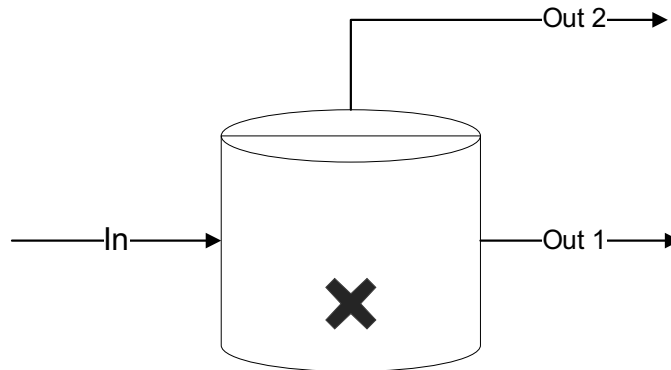
1.4.3 Digestores de mezcla completa

En estos digestores, se busca que el sustrato tenga una mezcla total dentro de la cámara del digestor, este se puede lograr mediante el uso de varias técnicas como lo son; paletas de agitación, uso de bombas ya sea internas o externas dentro de la cámara de digestión esto mediante el movimiento de los líquidos dentro de esta, por último, tenemos la

reinyección del biogás obtenido dentro de la misma cámara esto generan un burbujeo que provoca las mezclas. Para el caso de tener digestores calefaccionados esta acción de mezcla asegura una distribución de la temperatura en todo el volumen del digestor a usar [15], un ejemplo grafico del digestor tipo de mezcla completa se presenta en la Figura 5.

Figura 5.

Digestor de Mezcla completa



Nota. Figura base del tipo de digestor de Mezcla completa.

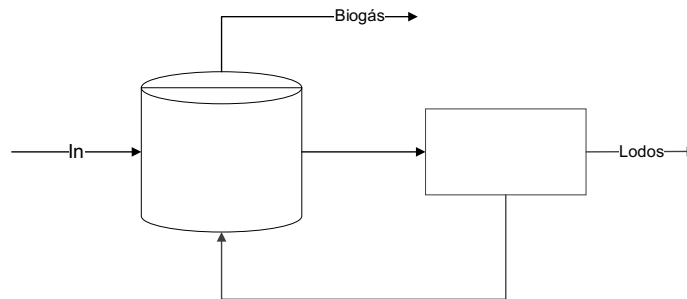
1.4.4 Contacto anaeróbico

Este sistema consiste en hacer la mayor retención posible de bacterias activas dentro de la cámara del digestor, esto se hace con el fin de lograr tiempos de retención y así mismo se disminuiría el volumen del digestor para tratar la misma cantidad de biomasa (sustrato).

Para llevar a cabo la retención de la bacteria se haría uso de un sedimentador que permite al efluente asentarse y decantar, las bacterias sedimentadas se reintroducen mediante una recirculación a la entrada del digestor, mezclada con la carga del sustrato como inóculo. Un ejemplo grafico del digestor tipo contacto anaeróbico se presenta en la figura 6.

Figura 6.

Digestor de contacto anaeróbico



Nota. Figura base del tipo de digestor de contacto anaeróbico.

1.4.5 U.A.S.B. (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

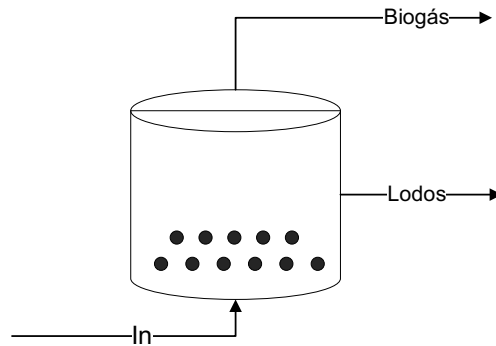
Este digestor posee en el interior separadores y mamparas, las cuales se encuentran ubicadas en las zonas donde las bacterias han formado glomérulos (floculación) allí se sedimentan y se evita que estas salgan por el efluente manteniendo las bacterias activas en la cámara del digestor, teniendo una función similar al sistema de contacto anaeróbico. Tiene como característica que la salida del digestor se realiza en la parte superior. [15]

1.4.6 Lecho fluidizado

Este reactor tiene unas pequeñas partículas (comúnmente llamadas pellets) permanecen en suspensión dentro de la cámara de digestión. Acá las bacterias se adhieren a los pellets, estas no son atacadas. Los pellets con bacterias se recuperan mediante la filtración del efluente y posteriormente se reintroducen en el digestor. Este reactor es usado mayormente a escala laboratorio y nivel de planta piloto. Un ejemplo grafico del digestor tipo de lecho fluidizado se presenta en la figura 7.

Figura 7.

Digestor de lecho Fluidizado



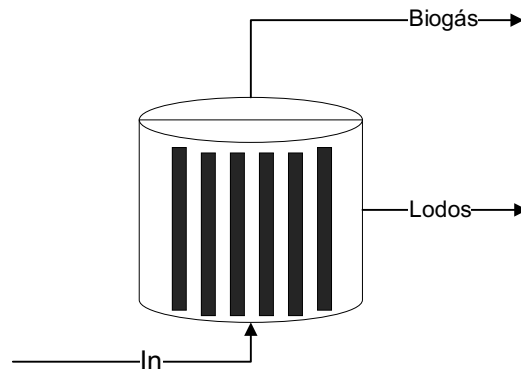
Nota. Figura base del tipo de digestor de lecho fluidizado.

1.4.7 Filtro anaeróbico

Este tipo de digestores tienen la particularidad de ser alargados donde, se tiene una relación de alto/diámetro mayor a 1, comúnmente se encuentran en forma vertical y poseen un medio fijo en el interior del digestor se puede tener cañerías reticuladas, piedra caliza y formas plásticas todos estos materiales se caracterizan por tener una gran relación superficie/volumen, etc. Algo muy importante respecto a estos materiales es que no atacan las bacterias y por lo contrario las bacterias se adhieren a ellos, con esto se evita la pérdida de bacterias así se puede tener un rendimiento mayor y disminuyendo los tiempos de retención [15], un ejemplo grafico del digestor tipo filtro anaeróbico se presenta en la figura 8.

Figura 8.

Digestor de filtro anaeróbico



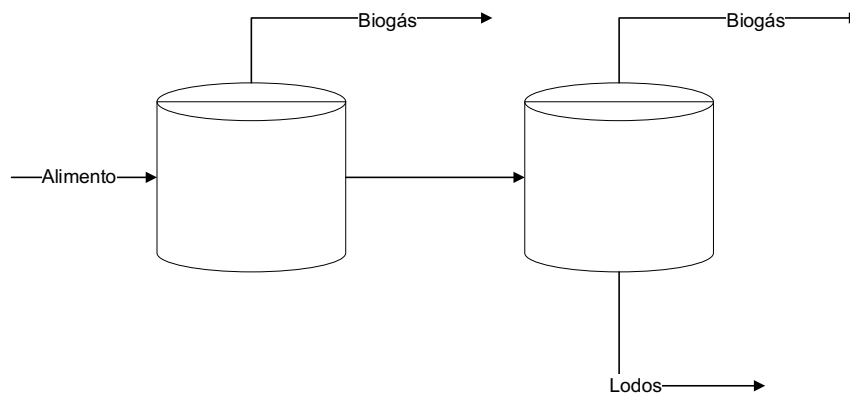
Nota. Figura base del tipo de digestor de filtro anaeróbico.

1.4.8 Dos etapas

La primicia de este sistema de reactores, es que se divide en dos las cámaras de digestión, en la primera cámara se desarrolla la etapa acidogénica y en la segunda cámara se lleva a cabo las etapas acética y metanogénica. Esto optimiza el proceso de obtención y el desarrollo de cada tipo de las bacterias, además en la primera etapa se puede retirar líquidos indeseables antes de que pasen a la etapa dos (metanogénica y acética). Este método aún se encuentra en una fase experimental y de uso a escala piloto. [15], un ejemplo grafico del digestor de dos etapas se presenta en la figura 9.

Figura 9.

Digestor de dos Etapas



Nota. Figura base del tipo de digestor de dos Etapas.

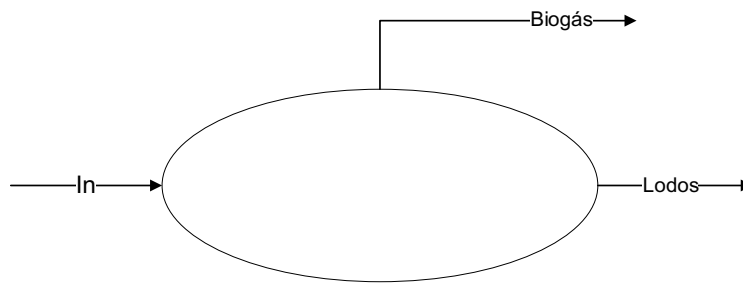
1.4.9 Plantas de globo

Estas plantas, poseen en la parte superior un digestor de bolsa en el cual se almacena el gas producido, la entrada y la salida de la planta se encuentran en la misma superficie de la bolsa. Este tipo de planta tiene las siguientes ventajas; de bajo costo, fácil transporte, baja sofisticación en su construcción, puede resistir altas temperaturas de digestión y por último se puede realizar fácil limpieza, mantenimiento adicionalmente una descarga fácil.

Cuenta con desventajas como lo son; tienen un corto tiempo de vida, debido al material del digestor por este factor es altamente susceptible y además genera una desventaja en un ámbito social ya que no genera empleo para la comunidad adyacente [16], un ejemplo grafico del digestor tipo globo se presenta en la figura 10.

Figura 10.

Digestor de globo



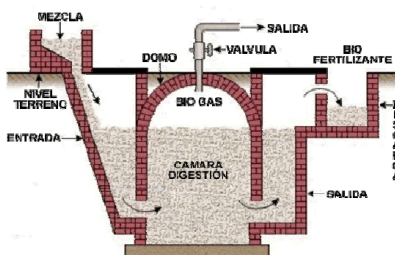
Nota. Figura base del tipo de digestor de globo.

1.4.10 Plantas de Domo Fijo (Tipo Chino)

Esta consiste en el uso de un recipiente fijo e inmóvil para el gas, este se coloca en la parte superior del digestor, el método comienza cuando la producción de gas desplaza la mezcla hacia el tanque de compensación, con esto la presión del aumenta y genera un aumento en el volumen del gas almacenado y con la diferencia de alturas entre el nivel de la mezcla en el digestor y el nivel de la mezcla presente en el tanque compensación [16], un ejemplo grafico del digestor tipo chino se presenta en la figura 11.

Figura 11.

Digestor tipo chino



Nota. Figura base del tipo de digestor chino. Tomada de: I. Corona Zúñiga, «Repositorio Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,»2007. [En línea]. Available: <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10722/Biodigestores.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 13 octubre 2021].

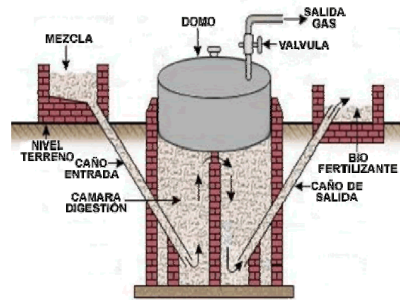
1.4.11 Planta de Tambor Flotante (Tipo Hindú)

Consiste en digestor subterráneo y un recipiente móvil para el gas. Este recipiente flota, bien sea sobre la mezcla de fermentación o sobre la chaqueta de agua. El gas es recolectado y de acuerdo a la cantidad de gas que se esté generando se observara el

ascenso o descenso del tambor o recipiente. Un ejemplo grafico del digester tipo hindú se presenta en la figura 12.

Figura 12.

Digester de tambor flotante



Nota. Figura base del tipo de digester de tambor flotante. Tomada de: I. Corona Zúñiga, «Repositorio Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,»2007. [En línea]. Available: <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10722/Biodigestores.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 13 octubre 2021].

2. GENERALIDADES DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

El proceso de digestión anaerobia por medio de la actividad microbiana es un proceso complejo, con un mecanismo que consiste en múltiples reacciones independientes, que pueden ocurrir de forma consecutiva o en paralelo, además, el proceso se ve fuertemente influenciado por el tipo de sustrato a utilizar, donde, las características fisicoquímicas y la composición del mismo, tienen un efecto directo en los rendimientos del proceso.

Este capítulo se centrará, en primera instancia es realizar una descripción del sustrato elegido, reportar distintas de sus características fisicoquímicas y las variables o parámetros necesarios para lograr una óptima digestión, posterior a esto, se desarrollará un estudio cinético, para lograr obtener una aproximación a la producción de biogás, por medio de modelos matemáticos y parámetros cinéticos.

2.1 Sustrato

Como sustrato se optó por el uso de los desechos generados por el consumo de la naranja, dichos desechos son conocidos comúnmente como “cáscara”. Estos representan un problema ambiental, dado su alto volumen de generación, solo para la ciudad de Bogotá y alrededores representan aproximadamente el 8,05% de las 6.368 toneladas diarias de residuos sólidos que ingresan al relleno sanitario Doña Juana [4].

2.1.1 Naranja

La naranja es el fruto del naranjo dulce (*Citrus Sinensis*), árbol perteneciente al género Citrus de la familia de las rutáceas. Estos frutos poseen una pulpa en forma de numerosas vesículas llenas de jugo, presentan un color anaranjado, aunque existen especies que son de tonalidades verdes al madurar.

Es uno de los cítricos que más se cultivan en el país después del limón y la mandarina, las últimas cifras de producción reportadas para esta fruta indican que se cosecharon alrededor 97.275 hectáreas que son aproximadamente 1'206.856 toneladas. [1]. La tabla 5 muestra las condiciones de cultivo de a naranja.

Las naranjas son ricas en Fibra, vitamina C, folatos, ácidos orgánicos y flavonoides, su porción comestible es de 73 gramos por cada 100 gramos de producto fresco [17], dejando un aproximado de 27 gramos de desechos sin aprovechar.

Tabla 5.

Parámetros de suelo para el cultivo.

Determinaciones analíticas	Datos de análisis de suelos				
	Niveles				
	Muy bajo	bajo	Normal	Alto	Muy alto
Relación pH	< 5.5	5.5 – 6.5	6.6 – 7.5	7.6 – 8.5	> 8.5
CO ₃ Ca total (%)	< 2	2-oct	nov-20	21 – 40	> 40
CO ₃ Ca activo (%)	< 1	1-abr	5-sep	oct-15	> 15
N total	< 0.07	0.07 – 0.12	0.13 – 0.18	0.19 – 0.24	> 0.24
Relación C/N	< 6	6-ago	8.1 – 10	10.1 - 12	> 12
Ca (%)	< 25	25 - 45	46 – 75	76 - 90	> 90
Mg (%)	< 5	5-oct	nov-20	21 -25	> 25
K (%)	< 2	2-abr	5-ago	9-dic	> 12
Na (%)	< 1	1-feb	3-sep	oct-15	> 15

Nota. La tabla presenta algunas condiciones de cultivo óptimas para la naranja. Tomado de: I. AGRO, «INFOAGRO.COM,» [En línea]. Available: <https://www.infoagro.com/citricos/naranja.htm>. [Último acceso: 15 AGOSTO 2021].

2.1.2 Partes de la Naranja

En la figura 13 se representarán las partes que componen una naranja:

2.1.2.a. Parte exterior – Epicarpio (exocarpo o flavedo). Es lo visible y cambia de color verde a un precioso naranja cuando el fruto está maduro y listo para la cosecha. Sirve de capa protectora para el interior y evita que las inclemencias del tiempo lo estropeen. Allí encontramos la cera, carotenoides (pigmento) y aceites esenciales

2.1.2.b. Parte blanca o Mesocarpio (mesocarpio o albedo). Es lo que une la parte exterior con la interior. Su grosor varía según la variedad de naranja porque en realidad forma parte de la cáscara. En esta encontramos las pectinas y los flavonoides (serie de metabolitos secundarios de las plantas).

2.1.2.c. Endocarpio (pulpa). El endocardio es la parte comestible de la naranja y del resto de cítricos y supone el 80% de su peso, En esta parte de la naranja es donde se encuentran los diferentes ácidos orgánicos (como la vitamina C), azúcares y agua que aportan esta fruta.

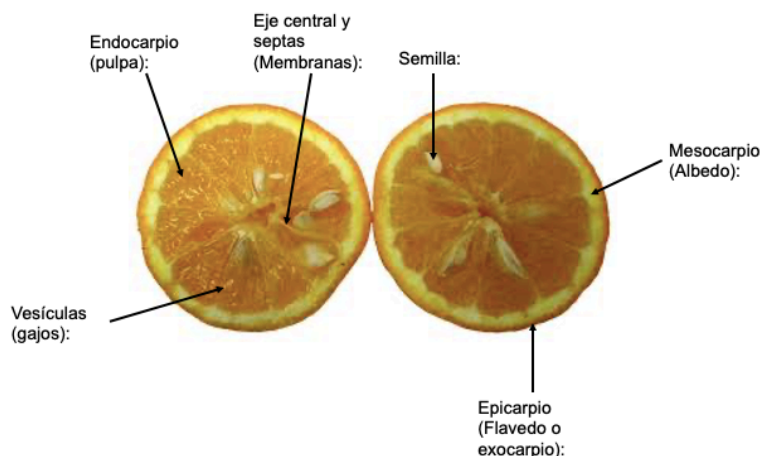
2.1.2.d. Semillas. Las semillas son el órgano duro que se encuentra en la parte interior de la naranja. Se caracterizan por producir un aceite que es rico en hesperidina, limonoides y en ácidos grasos conteniendo un valor dietético alto.

2.1.2.e. Vesículas (gajos). Divisiones individuales del endocarpio, separados por ambos lados por membranas.

2.1.2.f. Eje central y Septas (membranas). Son paredes celulares finas de color blanco que dividen el interior de la naranja en gajos o vesículas, estas membranas parten de una estructura del mismo material que se ubica en el centro del fruto.

Figura 13.

Partes de la naranja



Nota. La figura muestra las distintas partes o secciones de una naranja. Elaboración propia, Tomada de: T. L. Alvarado Dávila y A. T. Hernández Sierra, «Revisión de alternativas sostenibles para el aprovechamiento del orujo de naranja,» Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales, vol. 5, nº 2, pp. 9-32,2018.

2.1.3 Composición del sustrato

Los residuos de naranja resultantes de actividades de consumo humano, como la extracción del zumo o el consumo directo de la misma fruta denominados comúnmente

como “cáscaras de naranja”, se componen principalmente de membranas residuales de endocarpios, vesículas, albedo, semillas y exocarpio. [2]

Estos residuos de naranja se caracterizan por su característica fisicoquímica, un pH bajo entre 3 y 4, un alto contenido de humedad de entre 70 y 90%, un alto contenido de materia orgánica, cercana al 95% del total de sólidos [18]. Las “cáscaras” de naranja poseen un nivel elevado de materia orgánica, bajo pH y una gran concentración de carbohidratos representado el 89% del peso en seco de la fruta, estos carbohidratos están conformados por azúcares solubles en su mayoría por sacarosa, glucosa y fructosa; ácidos orgánicos como ácido cítrico, oxálico y succínico y fibra por pectina, celulosa, hemicelulosa y lignina. [18]

El alta de concentración de celulosa (22%), hemicelulosa (11%) y lignina (3.2%) que son macromoléculas orgánicas, aunque representan una fuente importante de carbono, por su gran tamaño, dificultarían el proceso de digestión anaerobia, por tanto, será prudente realizar tratamientos previos al sustrato con el fin de hidrolizar estas macromoléculas por medios distintos a los del proceso de digestión.

Se aprecia que el valor de la relación entre carbono y nitrógeno es demasiado alto, para este caso la relación carbono nitrógeno es aproximadamente 58 a 1, este valor está por encima del rango recomendado y debe ser corregido para asegurar una correcta digestión del sustrato.

Para corregir la relación carbono nitrógeno es necesario aumentar la concentración de nitrógeno en el sustrato, para esto, existen dos alternativas, la primera es hacer uso de un segundo sustrato junto con las cáscaras de naranja, dicho sustrato deberá contar con un alto contenido de nitrógeno, que permita modificar la relación C:N, este sustrato será consumido en el proceso y al igual que las cáscaras de naranja, parte de su biomasa se transformara en biogás, aunque, el agregar un segundo sustrato o cosustrato conducirá a un aumento del volumen a tratar y una disminución en la participación de la cáscaras de naranja en el proceso, el hecho que se puede usar materiales ricos en nitrógeno tales como: excretas animales o agua negras [19], es atractivo al proyecto, dado que son considerados residuos o materiales desechos, su adquisición es de bajo costo y mantiene una línea de economía circular.

La segunda alternativa es agregar junto con las cáscaras de naranja una fuente de nitrógeno, dicha fuente será consumida en el proceso, pero su masa no será transformada en biogás. Las fuentes de nitrógeno pueden ser ureas, amoniacos o abonos con alto contenido de este elemento, pero no se encuentran referencias del uso extendido de estas sustancias en los procesos de digestión anaerobia, además, se puede incurrir en costos adicionales de adquisición.

Para corregir la relación carbono nitrógeno de las cáscaras de naranja, se opta por hacer uso de un cosustrato, esto según las ventajas que ofrece sobre el uso de otras fuentes de nitrógeno, en específico se decide usar excretas de origen animales de granja (gallina, cerdos y vacas) como cosustrato, dado que su uso es ampliamente registrado en procesos de digestión o codigestión anaerobia [20] [21] [22].

La composición química de la "cáscara", se muestran en la tabla 6, (se muestran los datos en base seca que se representan como ***d.b. (dry basis)*** por sus siglas en inglés).

Tabla 6.

Composición química de la cáscara de naranja.

Parámetros	Residuos de cáscara de naranja
pH	3.42 ± 0.02
VA (mg de ácido acético/kg)	1950 ± 27
Humedad (%)	79.83 ± 0.08
ST (%)	20.17 ± 0.08
SRA (%)	0.87 ± 0.03
SV (%)	19.31 ± 0.11
DQO (mg O ₂ / g d.b.)	1085 ± 55
TKN (mg N / g d.b.)	12.24 ± 0.56
P T (mg P/ g d.b.)	1.18 ± 0.03
Cr (mg / g d.b.)	1.6 ± 0.7
Cd (mg / g d.b.)	4.9 ± 0.8
Cu (mg / g d.b.)	< 1.0
Ni (mg / g d.b.)	6.1 ± 1.3
Pb (mg / g d.b.)	< 1.0
Zn (mg / g d.b.)	4.5 ± 0.4
C (% , db)	44.33 ± 0.27
H (% , db)	5.90 ± 0.06
N (% , db)	0.76 ± 0.06
O (% , db)	46.33 ± 0.41
S (% , db)	0.11 ± 0.01
Celulosa (%)	22
Hemicelulosa (%)	11
Grasa (% , db)	1.55 ± 0.17
Ceniza (% , db)	3.29 ± 0.19
Proteína (% , db)	6.16 ± 0.23
Carbohidratos (% , db)	89.0 ± 1.1
Pectina (% , db)	17 ± 5
Lignina (%)	3.2 ± 0.4
Azúcares neutrales	3.8 ± 0.3
Ácido urónico	7.1 ± 0.9
Total, de acidez (g de ácido cítrico/ml)	0.29 ± 0.03
Limoneno (% , db)	3.78 ± 0.3

Nota. La tabla presenta la composición de la cáscara de naranja. Tomado de J. Siles, F. Vargas, M. Gutiérrez y A. Chica, «Integral valorisation of waste orange peel using combustion, biomethanisation,» *Bioresource*, 2016. pp.32. db (base seca), g d.b. (gramos de base seca), mg (miligramos).

2.1.4 Cosustrato

Como se mencionó en la sección anterior, es necesario utilizar un segundo sustrato para corregir la relación carbono nitrógeno de las cáscaras de naranja, se propone el uso de excretas de origen animal, dado que su uso está extendido en los procesos de digestión anaerobia. La tabla 7 muestra los porcentajes de carbono y nitrógeno, presentes en distintos tipos de excretas animales, aunque, estos valores pueden variar, dependiendo de la región, la raza del animal y su dieta.

Tabla 7.

Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

Materias Primas	C (%)	N (%)
Excretas:		
Bovino	17.4 - 40.6	0.3 - 2.0
Porcino	17.4 - 46.0	1.1 - 2.5
Caprino	35.0 - 50.0	1.0 - 2.0
Equino	35.0 - 52.0	0.3 - 0.8
Ovino	35.0 - 46.0	0.3 - 0.6
Conejos	23.0 - 35.0	1.0 - 1.9
Aves	28.0 - 35.0	1.4 - 2.0
Patos	29.0 - 41.0	0.6 - 0,8
Pavos	17.4 - 41.0	0.6 - 0,8
Humanas	2.5	0.8 - 1.0

Nota. La tabla presenta los porcentajes de carbono y nitrógeno para distintos tipos de excreta animal. Tomado de: M. T. Varnero Moreno, «MANUAL DE BIOGÁS,» “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. Santiago de Chile.pp. 35

Una de las caracterizas que se busca en el cosustrato, es que, posea un alto contenido de nitrógeno, esto con la finalidad de reducir la masa necesaria de cosustrato para corregir la relación carbono nitrógeno de las cáscaras de naranja. Un cosustrato pobre en nitrógeno requerirá una gran masa del mismo para modificar la relación C:N, generando un aumento en los costes del proceso y restando participación e importancia de los desechos de naranja como sustrato principal.

Se encontró que, para el caso de los animales de granja, las concentraciones más elevadas de nitrógeno se encuentran en las excretas de los bovinos, porcinos, conejos y aves. Las excretas humanas resaltan por su baja relación entre carbono y nitrógeno.

Las relaciones de carbono nitrógeno promedio para cada uno de las excretas animales se muestra en la tabla 8:

Tabla 8.

Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

Materias Primas	C:N
Excretas:	
Bovino	25 : 1
Equino	50 : 1
Ovino	35 : 1
Porcino	16 : 1
Caprino	40 : 1
Conejos	23 : 1
Gallinas	23 : 1
Patos	47 : 1
Pavos	50 : 1
Humanas	3 : 1

Nota. La tabla presenta rangos de valor para la relación carbono nitrógeno para distintos tipos de excreta animal. Tomado de: M. T. Varnero Moreno, «MANUAL DE BIOGÁS,» "Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables". Santiago de Chile.pp. 36

Con los datos mostrados en la tabla 8 se confirma que la relación carbono nitrógeno promedio para excretas de equinos, ovinos, caprinos, patos y pavos es demasiado alta, por tanto, el uso de estos como cosustrato se descarta, debido al pobre contenido de nitrógeno en su composición, la tabla 9 contiene los valores promedio aproximados del contenido de carbono y nitrógeno de las excretas de bovinos, porcinos, conejos, gallinas y humanos, se usarán estos como valor patrón o referencia para realizar los análisis del cosustrato, pero se entiende que estos son valores promedio.

Tabla 9.

Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

Materias Primas	C (%)	N (%)
Excretas:		
Bovino	30	1.3
Porcino	25	1.5
Conejos	35	1.5
Gallinas	35	1.5
Humanas	2.5	0.85

Nota. La tabla presenta valores promedio para la relación carbono nitrógeno para distintas excretas animales. Tomado de: M. T. Varnero Moreno, «MANUAL DE BIOGÁS,» “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. Santiago de Chile, pp. 36

Con la información de contenido en porcentaje de carbono y nitrógeno de las cáscaras de naranja y las excretas, además, del uso de la ecuación 1, se calculó la cantidad de masa necesaria de cosustrato a mezclar con 100 kg de sustrato, para lograr una relación carbono nitrógeno de 30:1, los resultados obtenidos se reportan en la tabla 10.

Tabla 10.

Relación Cosustrato y Sustrato.

Materias Primas	Q (Kg)	Relación Cosustrato – Sustrato
Excretas:		
Bovino	222.22	2:1
Porcino	100.00	1:1
Conejos	199.97	2:1
Gallinas	199.97	2:1
Humanas	86.96	1:1

Nota. La tabla presenta la carga necesaria de excretas y su relación con el sustrato.

Se encontró que para lograr una relación de carbono nitrógeno de 30 a 1 en una muestra de 100 kg de cáscara de naranja, se necesitan mezclar con aproximadamente 222.22 kg de excretas bovinas, 100 kg de excretas porcinas, 199.97 kg de excretas de conejos / gallinas y 86.96 kg de excretas humanas, estas cantidades se pueden simplificar en relaciones de peso a peso, como lo muestra la tabla 10.

El uso de las excretas bovinas como cosustrato, junto con residuos de origen cítrico ha demostrado ser más efectiva en la producción de biogás que otros cosustratos. Rodríguez y Hernández en su artículo [23], compararon el uso de tres distintas excretas de diferentes tipos de animales de granja (bovinos, porcino y borrego) mezclado con residuos de naranja para la producción de biogás, obtuvieron un volumen de producción del gas significativamente superior y una concentración de metano más alta en las pruebas que contenían excreta de bovino.

Escarraga y Espinosa [20], también reportaron un aumento en la producción del biogás, con el uso de excretas bovinas como cosustrato junto a residuos de origen cítrico. Con base a las referencias bibliográficas consultadas, se consideró el uso de las excretas bovinas como cosustrato para la digestión anaerobia de las cáscaras de naranja, con el fin de elevar la producción de biogás en el proceso digestivo.

La tabla 11 presenta la caracterización de las excretas bovinas recolectadas en la finca el Guarumal [5], de forma similar a lo realizado anteriormente, se tomarán los datos reportados en esta tabla como valor referencia a la hora de realizar los distintos análisis correspondientes al cosustrato.

Tabla 11.*Caracterización de estiércol bovino.*

Parámetros	Estiércol
Sólidos totales (%)	51.40
Materia orgánica (%)	25.76
Carbono orgánico total (%)	14.94
Nitrógeno total (%)	1.29
fosforo (mg/Kg)	125.06
Potasio (mg/Kg)	17442.87
Manganeso (mg/Kg)	269.34
Zinc (mg/Kg)	100.36
Cobre (mg/Kg)	21.81
Hierro (mg/Kg)	1811.25
Humedad (%)	48.6
Coliformes totales (Col/g)	3.3x10 ⁶
Coliformes fecales (Col/g)	2.4x10 ⁶

Nota. La tabla presenta la composición de las excretas bovinas. Tomado de L. E. Bernal Patiño y I. s. Suárez Ramírez, «diseño conceptual de un biodigestor partiendo de estiércol vacuno y avícola, producido en la finca el Guarumal, para la obtención de biogás,» fundación universidad de américa, Bogotá D.C, 2018.

2.2 Volumen a tratar

Se entiende que en el 2018 la producción de cítricos en Colombia se estimó en 1.206.856 toneladas al año [1]. Desde su recolección, distribución, procesamiento y consumo se generan grandes cantidades de residuos de estas frutas. Para definir la cantidad de residuo a tratar, se plantean tres escenarios posibles, los cuales, surgen de la recopilación y el análisis de información recolectada.

El primer escenario corresponde a la cantidad de residuos orgánicos cítricos que recibe el relleno sanitario doña Juana en Bogotá, al cual, llegan diariamente 6.368 toneladas de residuos orgánicos sólidos, de los cuales el 8,05% corresponde a residuos orgánicos cítricos [4], lo que resulta en un aproximado de 510 toneladas diarias de este tipo de residuos que llegan al relleno sanitario. El segundo escenario es el reportado por

Monsalve [24], quien reporta que la industria nacional desecha cerca de 15 a 25 toneladas semanales de cáscara de naranja.

El ultimo escenario es el que se presenta en las jornadas de ciclovía en Bogotá, en donde se estimada de que al final de una jornada resultan 1,152 bultos, que se traducen en 35 toneladas de cáscara de naranja [25], las cuales son depositadas en la calle donde pueden permanecer incluso por más de 24 horas. [26]

Para el desarrollo de este documento, se propone trabajar con el tercer escenario, dado que actualmente no existe ningún plan de aprovechamiento para estos residuos [26] y que presenta facilidades en la obtención de las cáscaras de naranja, ya que, estas son depositas a lo largo de todo el recorrido de la ciclovía.

Con lo anterior se define que el diseño propuesto va a tratar un total de entre 30 a 40 toneladas semanales de residuos de cáscaras de naranja, las cuales, provienen de los residuos generados en las jornadas de ciclovía en la ciudad de Bogotá.

2.3 Capacidad de generación de biogás

En procesos de digestión anaerobia la capacidad de producción de biogás y el contenido de metano, está limitado por la estequiometria y puede calcularse si la composición elemental de la materia prima es conocida. [27]

De forma general el esquema de la reacción que involucra la digestión anaerobia se puede resumir de la siguiente forma:



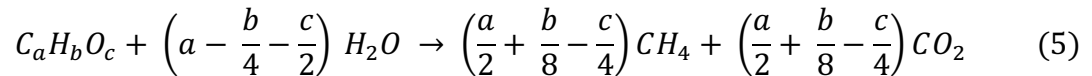
Donde se da la transformación de los reactivos (A y B) en un producto C, basado en el esquema de reacción surgen distintos modelos que permiten predecir la capacidad de generación de biogás para cualquier sustrato.

Estos modelos reducen la materia orgánica en expresiones generales y las relaciona únicamente con los productos finales del proceso, no se incluyen otros elementos o compuestos involucrados en la digestión, con la finalidad de no complicar el modelo. La

principal característica de estos modelos es que son independientes del tiempo, esto dificulta la definición de variables asociadas a este.

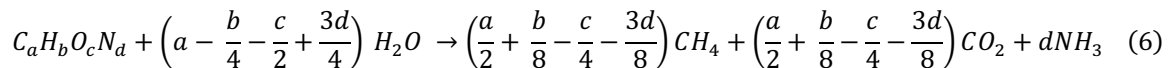
2.3.1 Modelo de Buswell y Mueller

El modelo estequiométrico de Buswell y Neave es una de más utilizados. [28], al conocer los componentes se expresan en forma estequiométrica, lo que permite definir la concentración de biogás, aunque, este modelo no tiene en cuenta la formación de productos intermedios.

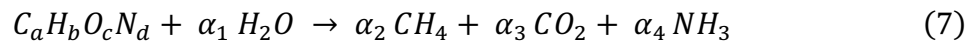


2.3.2 Modelo Boyle

El modelo de Boyle está basado en el modelo de Buswell y Mueller, en este se tienen en cuenta la presencia de nitrógeno en el proceso de digestión.



A continuación, se presenta este modelo de forma simplificada [20]:



El modelo presenta la reacción global del proceso de digestión anaerobia, la fórmula $C_aH_bO_cN_d$ es una representación de molecular de la biomasa, los coeficientes a , b , c y d representan los coeficientes estequiométricos de los elementos que la componen.

El modelo no tiene en cuenta el crecimiento microbiano ni la presencia de sulfuro, sin embargo, funciona como una aproximación teórica para el cálculo del potencial de producción de metano. [20]

2.3.3 Rendimiento Teórico de metano

Para dar solución al modelo de Boyle es necesario calcular los coeficientes para cada uno de los elementos que conforman la biomasa, recordando que el modelo solo tiene

en cuenta al carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno como constituyentes de la biomasa, la tabla 12 contiene los porcentajes de composición de dichos elementos para las excretas y las cáscaras de naranja.

Tabla 12.

Composición elemental de residuos orgánicos.

Materias Primas	Porcentaje en Peso	
	Naranjas	Excretas
Elemento		
C	44.33	30.0
H	5.9	5
O	46.33	28.84
N	0.76	1.3
Otros	2.68	34.86

Nota. La tabla presenta el porcentaje en peso para los sustratos por elemento químico. Tomado de A. F. Rojas González y C. Flórez Monte, «Valorización de residuos de frutas para combustión y pirólisis,» *Revista Politécnica ISSN 1900*, vol. 15, nº 28, pp. 42-53, 2019.

Tomando las 35 toneladas de residuos de naranja a tratar, y la relación de 1:2 con respecto a las excretas bovinas, se entiende que se necesitan 70 toneladas de excretas bovinas en mezcla con las cáscaras de naranja, para un total de 105 toneladas de materia orgánica que entra en el proceso de digestión.

La tabla 13 muestra la composición elemental por toneladas para una mezcla de 1:2 de cáscaras de naranja y excretas bovinas de 105 toneladas.

Tabla 13.

Composición en peso (Toneladas) para la mezcla de Sustrato y Cosustrato.

Materias Primas	Naranjas	Excretas	Mezcla
Elemento			
C	15.52	21.00	36.52
H	2.07	3.50	5.57
O	16.22	20.19	36.40
N	0.27	0.91	1.18
Otros	0.94	24.40	25.34
Total (Ton)	35	70	105

Nota. La tabla presenta la composición en peso para la mezcla de sustratos por elemento químico.

De la misma forma, se puede calcular los porcentajes de composición de cada elemento en la mezcla de sustrato y cosustrato, como lo muestra la tabla 14.

Tabla 14.

Composición elemental en porcentaje para la mezcla de Sustrato y Cosustrato.

Materias Primas	Porcentaje en Peso
Elemento	Mezcla
C	34.78
H	5.30
O	34.67
N	1.12
Otros	24.13

Nota. La tabla presenta el porcentaje en peso para la mezcla de sustratos por elemento químico.

Con los datos consignados en las tablas 13 y 14, se procede a encontrar el valor de los coeficientes del modelo simplificado de Boyle, estos coeficientes se consignaron en la tabla 15.

Tabla 15.

Coefficientes modelo de Boyle.

Coefficiente	Valor
A	1.00
B	1.84
C	0.75
D	0.03

Nota. La tabla presenta los coeficientes del modelo de Boyle para la mezcla de cáscaras de naranja y excretas.

Con el valor de los coeficientes es posible calcular el rendimiento teórico del biogás (RTB) y el rendimiento teórico de metano (RTM) [27], a continuación, se presentan las ecuaciones simplificadas para estos cálculos:

$$RTB \left[\frac{m^3}{Kg_{sustrato}} \right] = \frac{22.415 a}{12 a + b + 16 c + 14 d} \quad (8)$$

$$RTM \left[\frac{m^3}{Kg_{sustrato}} \right] = \frac{\left(\frac{4 a + b - 2c - 3d}{8} \right) * 22.415}{12 a + b + 16 c + 14 d} \quad (9)$$

La tabla 16 muestra los valores obtenidos para el RTB y el RTM.

Tabla 16.

Rendimientos teóricos.

Rendimientos teóricos (m³/kg)	
RTB	0.86
RTM	0.46

Nota. La tabla presente los rendimientos teóricos del proceso de digestión anaerobia.

Los rendimientos teóricos sugieren una producción de biogás de 0.86 m³ por cada kilogramo de biomasa en el digestor, con una composición del 53% en metano, lo que

sugiere una factibilidad teórica del biogás para su uso como combustible, dado que el porcentaje de metano es superior al 45%. [7]

2.4 Cinética del proceso

Los procesos de digestión pueden dividirse de acuerdo al modo en cómo operan en procesos continuo y discontinuos. En los procesos continuos se alimenta de forma continua el digestor, por lo tanto, se tendrá flujos constantes a la entrada y a la salida de este, reflejado en una producción de gas continua y en condiciones de crecimiento microbiano constantes en el tiempo.

En los procesos discontinuos o por lotes, la velocidad de degradación del sustrato, el crecimiento microbiano y la producción del biogás varía en función del tiempo, teniendo diferentes fases dentro del desarrollo del proceso.

El balance de materia para cualquier proceso puede plantearse de forma general como:

$$a = in - out + G \quad (10)$$

Donde a será la acumulación de material dentro del proceso o sistema, in y out representan las salidas y entradas de materia y G la generación de esta. Según lo anterior es posible plantear el balance de materia para el proceso de digestión anaerobia en función del sustrato de la siguiente forma [22]:

$$\frac{dS}{dt} = DS_0 - DS + \left(\frac{dS}{dt}\right)_r \quad (11)$$

Donde:

$\frac{dS}{dt}$: Acumulacion de sustrato

$\left(\frac{dS}{dt}\right)_r$: Descomposición del sustrato

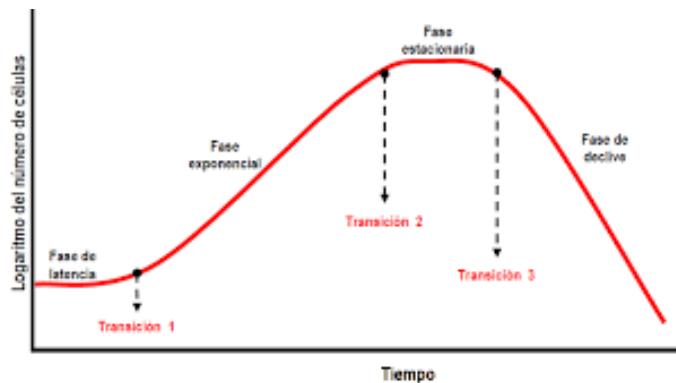
Tanto la acumulación del sustrato como su descomposición están en función del tiempo, S_0 y S son concentraciones (g/L) y representan la entra y salida del sustrato y D corresponde a la tasa de dilución del mismo (1/ día).

2.4.1 Cinética del crecimiento de microorganismos

La figura 14 representa la curva de crecimiento o desarrollo bacteriano, esta muestra las 4 fases de desarrollo bacteriano que se obtiene del número de células viables en función del tiempo en un cultivo [29], de resaltar los tres cambios en la pendiente, estos cambios indican la transición de una fase de crecimiento a otra.

Figura 14.

Curva de crecimiento Bacteriano



Nota. La figura muestra el crecimiento bacteriano. Tomado de: R. F. Sancho Mamani, Ajuste de modelos matemáticos de crecimiento de bacterias lácticas en queso tipo paria en condiciones isotérmicas y no isotérmicas, Puno, Perú: Universidad nacional del altiplano, 2015.

Se observa que existe una fase de latencia en la cual el crecimiento bacteriano es nulo, seguido de una fase exponencial en la cual se da un incremento acelerado de la velocidad de crecimiento y un decrecimiento de la velocidad hasta llegar a la fase estacionaria, en la cual, la velocidad de crecimiento es nula. Posterior la velocidad continúa disminuyendo en la fase de declive. El desarrollo bacteriano dependerá de las condiciones ambientales, el tipo y concentración del sustrato, también, se deben considerar que la acumulación y aparición de productos tóxicos, el consumo de los nutrientes y cambios en el pH afectan y provocaran cambios en la velocidad del crecimiento bacteriano [30].

El crecimiento bacteriano puede ser descrito de la siguiente manera [22]:

$$\frac{dX}{dt} = D X_0 - D X + \mu X + k_d X \quad (12)$$

Donde X y X_0 es la concentración de las bacterias durante el proceso (g/L), k_d es la tasa de mortalidad de la bacteria (1/día) y μ es la tasa específica de crecimiento bacteriano (1/día), las tasas de crecimiento y mortalidad se ven fuertemente influenciadas por la concentración del sustrato, concentración de inhibidores, el pH y la temperatura.

Dado que el crecimiento bacteriano se da por la división de células individuales, la velocidad de crecimiento será proporcional al tamaño de la población de bacterias, lo que permite describir el proceso con una cinética de primer orden como:

$$r = \frac{dX}{dt} = \mu X \quad (13)$$

Esta expresión cinética, no contempla la disponibilidad de sustrato o nutrientes en el crecimiento bacteriano, los cuales, son factores que influyen de gran manera en este proceso. La cinética propuesta por Monod [30], fue la primera en reconocer la relación no lineal entre la tasa específica de crecimiento μ y la concentración limitada de sustrato [22]. La cinética de Monod se presenta a continuación:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_S + S} \quad (14)$$

Donde μ es la tasa específica de crecimiento bacteriano, μ_{max} es la máxima tasa de crecimiento para la bacteria, S es la concentración de sustrato y K_S será la constante de velocidad media. [30]

En este modelo la tasa específica de crecimiento se incrementa de forma acelerada para valores bajos de concentración de sustrato y de forma lenta para valores elevados de concentración. El modelo Monod, aunque considera la concentración de sustrato como agente limitando o inhibidor del proceso, no considera la presencia de sustancias o productos que pueden ser inhibidores.

2.4.2 Cinéticas que consideran la inhibición

Como ya se ha mencionado, el desarrollo bacteriano puede ser inhibido por la presencia de algunas sustancias, sean sustancias propias del sustratos o productos generados por la digestión anaerobia. Los principales inhibidores del proceso se presentan a continuación:

Es de aclarar que no todos organismos bacterianos se ven afectados del mismo modo ni por los mismos compuestos. Es posible ajustar el modelo de Monod para tener en cuenta los factores de inhibición, la tabla 17 presenta los principales inhibidores del proceso de digestión anaerobia.

Tabla 17.

Principales inhibidores del proceso de biodigestión.

Inhibidor	Efecto inhibidor
Ácidos Grasos	Estos reducen el valor del pH llegando a inhibir los procesos de Hidrólisis y acetanogenesis
Amónico no Disociado	Inhibe la degradación de ácidos como el propiónico, butírico y acético
Hidrogeno H2	Inhibe la degradación de ácidos como el propiónico, butírico y acético
Oxigeno O2	Puede detener el proceso de digestión estando presente hasta en cantidades pequeñas
Sulfuro de Hidrogeno	Influye en los valores de pH y en el equilibrio iónico

Nota. La tabla presenta distintos inhibidores del proceso de digestión y sus efectos. Tomado de F. Valladares Carnero, Modelamiento del proceso de digestión anaeróbica de estiércol, Piura, Perú: Universidad de Piura, 2017

A continuación, se mencionarán algunos modelos que consideran la inhibición:

2.4.3 Inhibición por concentración de sustratos

Una concentración de sustrato optima permite el incremento máximo de la velocidad específica de crecimiento bacteriana, pasada esta concentración se observa una disminución considerable en esta velocidad. Esto puede ser causado principalmente por el grado de toxicidad del sustrato, lo que causa una reducción del metabolismo de las células [22].

A continuación, se presentan algunos modelos cinéticos desarrollados sobre el efecto inhibitor de los sustratos:

2.4.3 a. Modelo de Haldane [31]:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{(S + K_s) * \left(1 + \frac{S}{K_i}\right)} \quad (15)$$

Donde:

μ : Tasa específica de crecimiento promedio. [dia⁻¹]

μ_{max} : Tasa específica de crecimiento máxima [dia⁻¹]

S: Concentración del sustrato. [g/ L]

K_s : Constante de Michaelis-Menten. [g/ L]

K_i : Concentración del sustrato cuando se reduce al 50% el crecimiento bacteriano. [g/ L]

2.4.3 b. Modelo de Grant:

$$\mu = \mu_{max} \frac{1}{K_i + S} \quad (16)$$

Donde:

μ : Tasa específica de crecimiento promedio. [dia⁻¹]

μ_{max} : Tasa específica de crecimiento máxima [dia⁻¹]

S: Concentración del sustrato. [g/ L]

K_i : Constante de inhibición. [g/ L]

2.4.3 b. Modelo de Webb:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S \left(1 + \frac{\beta S}{K_i}\right)}{S + K_s + \frac{S^2}{K_i}} \quad (17)$$

Donde:

μ : Tasa específica de crecimiento promedio. [día^{-1}]

μ_{max} : Tasa específica de crecimiento máxima [día^{-1}]

S: Concentración del sustrato. [g/ L]

K_s : Constante de Michaelis-Menten. [g/ L]

K_I : Constante de inhibición. [g/ L]

β : Parámetro definido por la velocidad de reacción

2.4.4 Inhibición por concentración de productos

El efecto de inhibición que pueden causar los productos generados en la digestión anaerobio es similar al que causan los sustratos.

A continuación, se presentan algunos modelos cinéticos desarrollados sobre el efecto inhibitorio de los productos:

2.4.4 a. Modelo de Lerusalimsky [22]:

$$\mu = \mu_{\text{max}} \frac{S}{S + K_s} * \frac{K_p}{P + K_p} \quad (18)$$

Donde:

μ : Tasa específica de crecimiento promedio. [día^{-1}]

μ_{max} : Tasa específica de crecimiento máxima [día^{-1}]

S: Concentración del sustrato. [g/ L]

P: Concentración del producto. [g/ L]

K_s : Constante de Michaelis-Menten. [g/ L]

K_I : Constante de inhibición. [g/ L]

K_p : Concentración del sustrato cuando se reduce al 50% el crecimiento bacteriano. [g/ L]

2.4.4 b. Modelo de Holzberg [22]:

$$\mu = \mu_{max} [1 - K_1 (P - K_2)] \quad (19)$$

Donde:

μ : Tasa específica de crecimiento promedio. [día⁻¹]

μ_{max} : Tasa específica de crecimiento máxima [día⁻¹]

P: Concentración del producto. [g/ L]

K1: Parámetro. [L/g]

KI: Concentración del producto cuando no hay inhibición. [g/ L]

Aunque estas cinéticas permiten predecir el crecimiento bacteriano, los modelos basados en el de Monod no son capaces de describir procesos con degradación de sustratos completos y con periodos de retención [25].

2.5 Modelo cinético digestión anaerobia

Para modelar la tasa de producción de biogás en la digestión anaerobia, se puede hacer uso de un modelo lineal, en donde se expresen dos etapas de producción de gas, como una fase ascendente y otra descendente [32].

$$y = a + b * t \quad (20)$$

Donde y es la tasa de producción de metano [L/ Kg SV día], t será el tiempo expresado en días, a será la máxima producción del gas [L/ Kg SV] y b será el inserto [L/ Kg SV].

Bajo este modelo lineal, la tasa de producción del biogás crecería de forma lineal a mediada que pase el tiempo, hasta alcanzar un clímax o un tope máximo de producción para luego disminuir hasta de forma lineal hasta llegar al cero.

Como se mencionó anteriormente, el crecimiento bacteriano crece de forma exponencial, dado que depende de la división celular, por tanto, es necesario entonces, realizar uso de un modelo exponencial [33].

$$y = a + b \exp(c t) \quad (21)$$

Donde y es la tasa de producción de metano [L/ Kg SV día], t será el tiempo expresado en días, a y b son constantes [L/ Kg SV día] y c será también constante [1/día] y su valor será positivo cuando la producción del gas crece y negativo cuando este decrece.

Suponiendo una distribución normal a lo largo de la digestión, en las tasas de producción del gas, la cinética microbiana de crecimiento y descomposición, la tasa de producción de metano se puede modelar según la ecuación de Gauss [32].

$$y = a \exp\left(-0.5 \left(\frac{t - t_0}{b}\right)^2\right) \quad (22)$$

Donde y es la tasa de producción de metano [L/ Kg SV día], t será el tiempo expresado en días, a [L/ Kg SV] y b [día] y t_0 será el tiempo expresado en días donde se obtiene la máxima producción de gas.

Por último, asumiendo que la producción de biogás es proporcional a la actividad bacteriana, se puede implementar un modelo de crecimiento de Gompertz [27], este modelo se puede presentar como [32] [34]:

$$y = A \exp\left(-\exp\left[\frac{\mu e}{A} (\lambda - t)\right] + 1\right) \quad (23)$$

Donde y es la tasa de producción de metano [L/ Kg SV], t será el tiempo expresado en días, A es el potencial de producción de gas [L/ Kg SV], μ será la máxima tasa de producción de biogás [L/ Kg SV día], λ es el periodo de adaptación, λ es el representa el tiempo de adaptación en días y e es la constante de Euler.

2.6 Rendimiento específico de metano

Dado que la literatura no se reportan datos de rendimiento específico para la mezcla entre las cáscaras de naranja y las excretas bovinas, se decide, evaluar el rendimiento de metano para cada una de las materias primas de forma separada.

2.6.1 Rendimiento específico de metano para la cáscara de naranja

Los parámetros cinéticos tomados de la literatura [35], en este se reporta parámetros cinéticos para el modelo de crecimiento de Gompertz para la cáscara de naranja, estos

parámetros surgen de análisis del laboratorio y contienen datos para la cáscara de naranja cruda, la cáscara de naranja sin aceites, cáscara de naranja sin pectina y cáscara de naranja sin aceites y sin pectina, estos datos se presentan en la tabla 18.

Tabla 18.

Parámetros modelo de crecimiento de Gompertz.

Sustrato	Parámetros cinéticos			
	A	μ	λ	R ²
Cáscara naranja	284.53	95.376	0.00	91.98
Cáscaras sin Aceites	261.22	69.936	0.00	98.39
Cáscaras sin Pectina	278.71	74.712	0.00	99.37
Cáscaras sin Aceites, Pectina	264.17	79.032	0.00	99.27

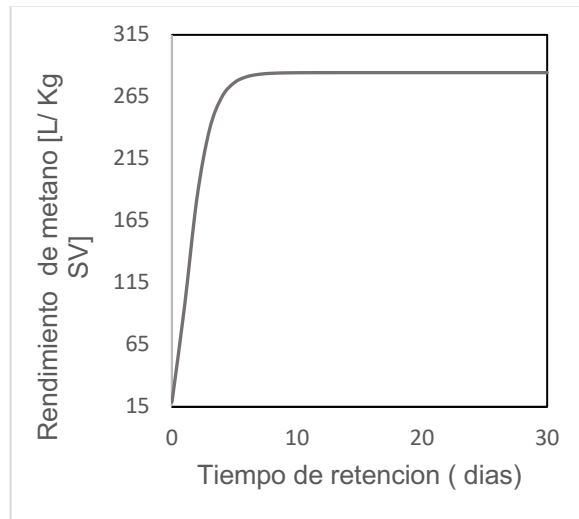
Nota. La tabla presenta los parámetros cinéticos del modelo de Gompertz para las cáscaras de naranja. Tomado de A. Echeverri Arias, Determinación del potencial de producción de biogás y bioetanol del residuo de naranja, Bogotá: Universidad de los Andes, 2019.

Con los datos de la tabla 18, se procede a dar solución al modelo de Gompertz, bajo condiciones mesófilas y un tiempo de retención de 30 días [20].

2.6.1.a. Rendimiento específico de metano para la cáscara de naranja.

Figura 15.

Rendimiento específico de metano Vs retención del sustrato

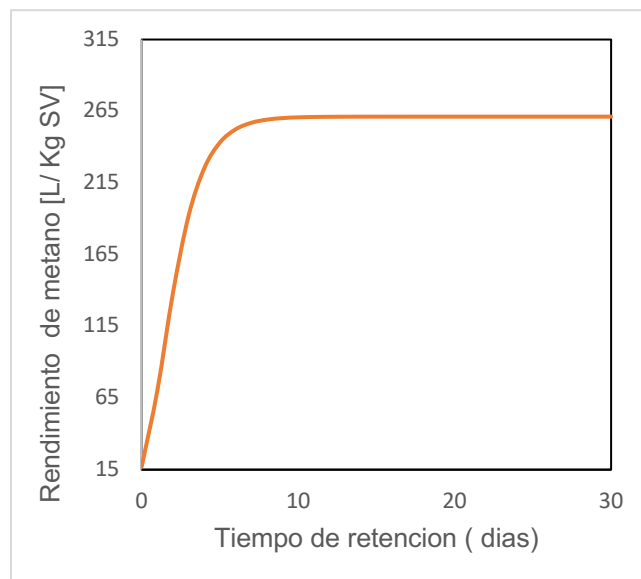


Nota. la figura muestra la máxima producción de metano para la cáscara de naranja

2.6.1.b. Rendimiento específico de metano para la cáscara de naranja sin aceite.

Figura 16.

Rendimiento específico de metano Vs retención del sustrato

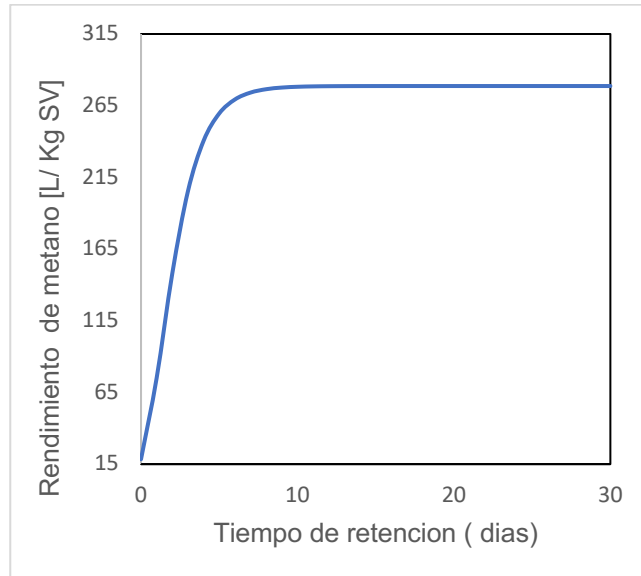


Nota. la figura muestra la máxima producción de metano para la cáscara de naranja sin aceite

2.6.1.c. Rendimiento específico de metano para la cáscara de naranja sin pectina.

Figura 17.

Rendimiento específico de metano Vs retención del sustrato

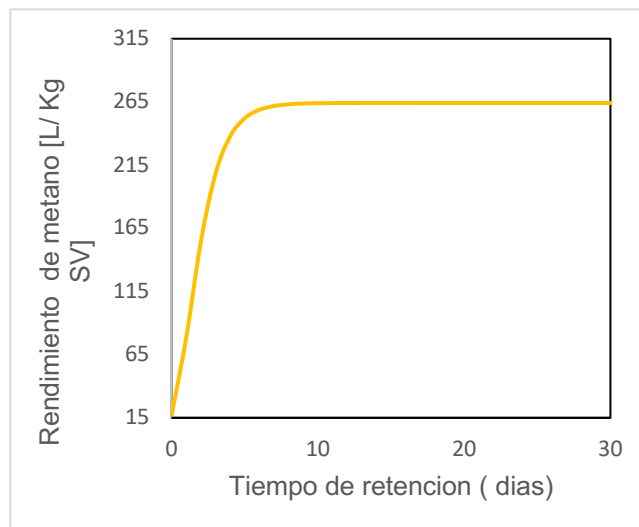


Nota. la figura muestra la máxima producción de metano para la cáscara de naranja sin pectina.

2.6.1.d. Rendimiento específico de metano para la cáscara de naranja sin aceite y sin pectina.

Figura 18.

Rendimiento específico de metano Vs retención del sustrato



Nota. La figura muestra la máxima producción de metano para la cáscara de naranja sin aceite y sin pectina.

En el análisis de los rendimientos teóricos de metano se encontró que, para las cáscaras de naranja la máxima tasa de producción de metano es de 284.53 [L/ Kg SV] y esta se alcanza a los 21 días de digestión, para las cáscaras de naranja a las cuales se les retiró el aceite, la máxima tasa de producción de metano es de 261.22 [L/ Kg SV] y se alcanza a los 17 días de digestión, para las cáscaras de naranja a las cuales se les retiró la pectina, la máxima tasa de producción de metano es de 278.70 [L/ Kg SV] y se alcanza a los 15 días de digestión y para las cáscaras de naranja a las cuales se les retiró el aceite y la pectina, la máxima tasa de producción de metano es de 264.17 [L/ Kg SV] y se alcanza a los 15 días de digestión. Los resultados obtenidos del estudio del modelo de Gompertz se presentan en la tabla 19.

Tabla 19.

Rendimiento de metano.

Sustrato	L CH₄/ Kg SV	Retención (días)
Cáscara naranja	284.53	21
Cáscaras sin Aceites	261.22	17
Cáscaras sin Pectina	278.70	15
Cáscaras sin Aceites, Pectina	264.17	15

Nota. La tabla presenta los rendimientos de gas metano y el tiempo de retención para cáscara de naranja en distintas condiciones.

Se encontró que, al retirar la pectina y los aceites presentes en las cáscaras de naranja, se da una reducción en el tiempo de digestión necesario para alcanzar la máxima tasa de producción de metano. Es de apreciar que la mayor tasa de metano es para las cáscaras de naranja crudas, esto se debe a que, al retirar la pectina y los aceites, se reduce la concentración de sólidos volátiles presentes en la naranja, es por esto que se reduce de la tasa de rendimiento de metano.

Aunque la reducción de la tasa de rendimiento es preocupante, la diferencia con respecto a las otras tasas no es demasiada, encontrando una diferencia del 8.2% con respecto a las cáscaras sin aceite, 2.0% con respecto a la cáscara sin pectina y de un 7.2% para

las cáscaras sin aceite y sin pectina. Con estas diferencias en las tasas de producción de metano y teniendo en cuenta que la concentración de sustancias como los aceites y la pectina, que en grandes cantidades como las que se pueden tratar, pueden tener efectos de inhibición del proceso, hace que se decida retirar del sustrato los aceites, siendo los principales inhibidores del proceso. Se descarta eliminar la pectina, dado que su eliminación de las cáscaras puede reducir de gran forma el material orgánico disponible para la digestión.

2.6.2 Rendimiento específico de metano para las excretas bovinas

Dado que la cáscara de naranja es el producto de interés y la materia prima principal, la cinética del proceso deberá ser gobernada por el consumo y degradación de este sustrato, marcando de esta forma el inicio y final del proceso.

No obstante, el consumo de las excretas bovinas también es un generador de biogás, por tanto, es necesario determinar el rendimiento específico de metano generado por este sustrato, dado que las excretas son un sustrato / cosustrato de baja complejidad y fácil degradación [7], el rendimiento específico de metano puede calcularse como [36]:

$$REM = \frac{22.4 * 1000 * \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8}\right)}{12a + b + 16c + 14d} \quad (24)$$

Donde REM será el rendimiento específico de metano expresado en [L/ Kg SV] y los a, b, c y d, corresponden a los coeficientes del modelo de Boyle específicos para las excretas bovinas. La tabla 20 presenta los coeficientes del modelo de Boyle específicos para las excretas bovinas.

Tabla 20.

Coeficientes modelo de Boyle para las excretas bovinas.

Coeficiente	Valor
a	1.00
b	2.00
c	0.72
d	0.03

Nota. La tabla presenta los coeficientes de Boyle para las excretas bovinas.

Al reemplazar los valores de la tabla 20 en la ecuación para el cálculo del rendimiento específico de metano, se encontró que las excretas bovinas tienen un rendimiento de 479.27 [L/ Kg SV]. La tabla 21 resume los rendimientos específicos de metano para el sustrato y el cosustrato.

Tabla 21.

Rendimiento específico metano para el sustrato y cosustrato.

Materia prima	L CH₄/ Kg SV sustrato
Cáscara naranja	261.22
<u>Excretas bovinas</u>	<u>479.27</u>

Nota. La tabla presenta los rendimientos específicos de metano para el sustrato y cosustrato.

2.7 Producción de metano

Encontrado los rendimientos específicos de metano para el sustrato y el cosustrato, es posible estimar la producción de metano, para esto es necesario conocer los porcentajes de sólidos volátiles (SV) de las materias primas, dado que son los SV los componentes orgánicos que teóricamente serán convertidos en metano [6].

En términos generales los sólidos volátiles es una fracción o porción de los sólidos totales de una muestra, que se volatilizan cuando se calientan durante dos horas a 600 °C [21] y que son susceptibles a la digestión.

A continuación, se presentan la composición de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) para el sustrato y el cosustrato:

2.7.1 Sólidos totales y volátiles cáscara de naranja

La tabla 22 muestra los porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles para la cáscaras de naranja. Es de resaltar la disminución drástica en el porcentaje de sólidos volátiles en los residuos donde la pectina fue retirada, esto se debe a que al ser la pectina un compuesto orgánico también será susceptible a portar a los sólidos volátiles, por tanto, al retirar la pectina se reduce el material disponible para la digestión orgánica, factor que es importante tener en cuenta.

Tabla 22.*Sólidos totales y volátiles cáscara de naranja.*

Sustrato	% ST	% SV
Cáscara naranja	89.74 ± 0.18	86.33 ± 0.14
Cáscaras sin Aceites	86.99 ± 1.69	83.14 ± 2.39
Cáscaras sin Pectina	86.19 ± 0.22	56.31 ± 0.64
Cáscaras sin Aceites, Pectina	88.64 ± 0.23	58.64 ± 0.86

Nota. La tabla presenta los porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles de la cáscara de naranja en distintas condiciones. Tomado de A. Echeverri Arias, Determinación del potencial de producción de biogás y bioetanol del residuo de naranja, Bogotá: Universidad de los Andes, 2019.

Como se mencionó anteriormente, se propone que el sustrato del proceso sea las cáscaras de naranja sin aceites, con un porcentaje de sólidos totales de 87% y de sólidos volátiles de 83% [35].

2.7.2 Sólidos totales y volátiles Excretas animales

Los porcentajes de sólidos totales y volátiles para las excretas bovinas también fueron consultados en la literatura encontrado un porcentaje de sólidos totales del 19% y un porcentaje de sólidos volátiles del 58.37% [21]. La tabla 23 contiene los porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles para distintas excretas animales.

Tabla 23.*Sólidos totales y volátiles Excretas animales.*

Materias Primas	% ST	% SV
Excretas:		
Bovino	19.00	58.37
Porcino	39.40	65.69
Gallinas	56.90	40.16
Caballos	33.30	75.16

Nota. La tabla presenta los porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles para las excretas bovinas. Tomado de E. A. Reyes Aguilera y E. Pérez Castellón, «Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás,» *Medio ambiente tecnología y desarrollo humano*, vol. 31, nº 8, 2019.

2.7.3 Producción de metano Sustrato y Cosustrato

La tabla 24 resume los valores encontrados de sólidos totales y sólidos volátiles para el sustrato y el cosustrato, conociendo estos valores, además de los rendimientos específicos se procede a calcular la producción de metano.

Tabla 24.

Sólidos totales y volátiles sustrato cosustrato

Materia prima	% ST	% SV
Cáscara naranja	87.00	83.00
Excretas bovinas	19.00	58.37

Nota. La tabla presenta los porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles para el sustrato y el cosustrato.

2.7.3 a. Producción metano para cáscara de naranja: anteriormente se estableció un flujo de cáscaras de naranja a tratar de entre 30 a 40 toneladas semanales, esto teniendo en cuenta que los residuos producidos en las jornadas de ciclo vía, pueden variar entre jornadas [26]. Para realizar cálculos se tomará una base de cálculo de 35 tonales semanas o 5 toneladas diarias de cascará de naranja.

De esta forma la producción de metano para las cáscaras de naranja será:

$$Producción_{metano} = \text{flujo solidos volatiles} * \text{Rendimiento especifico de metano} \quad (25)$$

Donde:

$$\text{flujo solidos volátiles} = 5000 \frac{Kg}{dia} * 0.87 \frac{Kg_{ST}}{Kg} * 0.83 \frac{Kg_{SV}}{Kg_{ST}}$$

$$\text{flujo solidos volatiles} = 3610.5 \frac{Kg_{SV}}{dia}$$

$$\text{Rendimiento especifico de metano} = 261.22 \frac{L_{CH_4}}{Kg_{SV}}$$

Entonces:

$$Producción_{metano} = 943131.81 \frac{L_{CH_4}}{dia}$$

$$Producción_{metano} = 943.13 \frac{m^3_{CH_4}}{dia}$$

2.7.3 b. producción metano para las excretas bovinas: realizando el mismo procedimiento que aplico a las cáscaras de naranja, para un flujo de 70 toneladas semanas o 10 toneladas diarias de excretas bovinas, la producción de metano será:

$$flujo\ solidos\ volátiles = 10000 \frac{Kg}{dia} * 0.19 \frac{Kg_{ST}}{Kg} * 0.5837 \frac{Kg_{SV}}{Kg_{ST}}$$

$$flujo\ sólidos\ volatiles = 1109.03 \frac{Kg_{SV}}{dia}$$

$$Rendimiento\ específico\ de\ metano = \frac{L_{CH_4}}{Kg_{SV}}$$

Entonces:

$$Producción_{metano} = 531524.80 \frac{L_{CH_4}}{dia}$$

$$Producción_{metano} = 531.52 \frac{m^3_{CH_4}}{dia}$$

2.7.4 Resultados producción de metano

Los resultados arrojaron una producción diaria de 943,13 m³ de metano para las cáscaras de naranja y de 531.52 m³ para el cosustrato, de esta forma se tendrá una producción de metano total de 1474.65 m³ diarios. Estos resultados fueron consignados en la tabla 25.

La baja producción de metano para las excretas bovinas frente a la de los residuos naranjas, se debe a que, a pesar de tener un rendimiento específico de metano mucho más alto, el poco porcentaje de sólidos volátiles en su composición química hace que su producción sea baja frente a residuos con porcentajes mayores de sólidos volátiles. Esto

hace que las cáscaras de naranja cobren aún más importancia en el proceso, dado que alrededor del 63% del volumen de gas generado proviene de la digestión de estas.

Tabla 25.

Producción de metano.

Materia prima	Carga (Ton/día)	Producción CH₄ (m³/día)
Cáscara naranja	5.00	943.13
Excretas bovinas	10.00	531.52

Nota. La tabla presenta la producción de metano al día para el sustrato y el cosustrato.

2.8 Conversión del proceso de digestión anaerobia

Encontrado los valores del rendimiento específico de metano tanto del sustrato, como del cosustrato, es posible predecir la conversión global del proceso de digestión anaerobia, así como estimar la producción de los demás productos del proceso.

2.8.1 Conversión del proceso de digestión de las cáscaras de naranja

Se encontró solución al modelo de Boyle, de esta forma se puede construir una fórmula empírica para la biomasa de las cáscaras de naranja.

La ecuación general para la digestión de las cáscaras de naranja se presenta a continuación:



De lo anterior se entiende que, por cada 10 moles de metano producido en proceso, también se generan otras 10 moles de dióxido de carbono y 0.3 moles de amoníaco.

Las moles de gas metano que se producen en el proceso, se calculan conociendo el rendimiento específico de metano para las cáscaras de naranja. Usando una base de cálculo de 100 kg de cáscaras de naranja se encontró el volumen de gas generado, de modo que:

$$Volumen\ de\ metano = 100\ Kg * 0.87 \frac{Kg_{ST}}{Kg} * 0.83 \frac{Kg_{SV}}{Kg_{ST}} * 261.22 \frac{L_{CH_4}}{Kg_{SV}}$$

$$\text{Volumen de metano} = 18934.90 \text{ L}$$

Conociendo el volumen de gas generado se puede calcular las moles a partir del uso de una ecuación de modelo de gases.

2.8.1.a. Ecuación del gas ideal. se usa este modelo para estimar las moles generadas de gas metano, entendiendo que la ecuación del gas ideal como:

$$n = \frac{P V}{R T} \quad (27)$$

Donde:

P: presión

V: Volumen del gas

n: Numero de moles del gas

R: constante Universal de los gases

T: Temperatura

Para este caso la temperatura será igual a 37 °C y la presión de 1 atm, esto se debido a que modelo cinético usado se encuentra bajo estas condiciones de presión y temperatura.

De modo que el número de moles de metano producidas será igual a:

$$n = 744 \text{ moles}$$

2.8.1.b. Ecuación de gases de Van der Waals. La ecuación de Van der Waals se entiende como: [37]

$$\left(P + a \left(\frac{n}{V} \right)^2 \right) * (V - n b) = n R T \quad (28)$$

Las condiciones de presión y temperatura son idénticas que el punto anterior, los valores de las constantes a y b, se presentan en la tabla 26:

Tabla 26.

Constantes a y b Ecuación de gases de Van der Waals.

	a (L²/mol²)	b (L/mol)
Metano	2.25313	0.04278

Nota. La tabla presenta los valores de los coeficientes de Van der Waals para el metano, Tomado de G. Don W y P. Robert H, Manual del ingeniero químico 8TH Edición, McGraw-Hill, 2007.

Al resolver se encontró el número de moles generadas

$$n_{Metano} = 745.86 \text{ moles}$$

Se decide optar por el número de moles calculado por la ecuación de gas de Van der Waals, dado que este modelo se entiende como una mejora al modelo de gas ideal.

Encontrado el número de moles del metano es posible encontrar las moles de agua, dióxido de carbono y amoníaco, de modo que para una masa de 100 Kg de cáscaras de naranja se necesitan 328.17 moles de agua y se generan 735.61 moles de CH₄ y CO₂, además de 22.37 moles de NH₃:

$$n_{H_2O} = 328.17 \text{ moles}$$

$$n_{CO_2} = 745.86 \text{ moles}$$

$$n_{NH_3} = 22.37 \text{ moles}$$

2.8.1.c. Balance de materia del proceso de digestión de las cáscaras de naranja. El balance de masa tendrá la siguiente forma:

$$Masa \text{ de los Reactivos} = Masa \text{ de los productos}$$

Al conocer las moles involucradas en el proceso y el peso molecular de las sustancias, se hace sencillo calcular la masa de estas, los pesos moleculares de las sustancias se encuentran en la tabla 27

Tabla 27.

Pesos moleculares.

<u>Materia</u>	<u>PM (g/mol)</u>
Agua	18
Metano	16
CO2	44
NH3	17

Nota. La tabla presenta los pesos moleculares de distintas sustancias.

De modo que se hace posible realizar un balance de masa para el proceso de digestión, los resultados de este balance se reportaron en la tabla 28.

Tabla 28.

Balance de masa.

<u>Reactivos</u>	<u>Kg</u>	<u>Productos</u>	<u>Kg</u>
Cáscara naranja	100	Metano	11.96
		Dióxido de Carbono	32.82
		Amoniaco	0.38
Agua	5.91	Otros	60.75

Nota. La tabla presenta el balance de masa.

De la tabla anterior se puede establecer que en la digestión anaerobia de las cáscaras de naranja solo se transforma en biogás el 42.63 % del material alimentado, el porcentaje restante del material corresponde a la formación del biol como uno de los subproductos del proceso.

2.8.2 Conversión del proceso de digestión del Cosustrato

La ecuación general para la digestión del cosustrato se presenta a continuación:



Por lo tanto, por cada 11.1 moles de metano producido en proceso, también se generan otras 11.1 moles de dióxido de carbono y 0.7 moles de amoniaco.

Las moles de gas metano que se producen en el proceso, se calculan conociendo el rendimiento específico de metano para las cáscaras de naranja. Usando una base de cálculo de 200 kg de cosustrato se encontró el volumen de gas generado, de modo que:

$$\text{Volumen de metano} = 200 \text{ Kg} * 0.19 \frac{\text{Kg}_{ST}}{\text{Kg}} * 0.5337 \frac{\text{Kg}_{SV}}{\text{Kg}_{ST}} * 479.27 \frac{\text{L}_{CH_4}}{\text{Kg}_{SV}}$$

$$\text{Volumen de metano} = 9719.88 \text{ L}$$

Conociendo el volumen de gas generado se puede calcular las moles a partir del uso de una ecuación de Van der Waals se encontró las moles de metano generado y posterior se calculó las moles de las demás sustancias involucradas.

$$n_{\text{Metano}} = 382.88 \text{ moles}$$

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = 113.82 \text{ moles}$$

$$n_{\text{CO}_2} = 382.88 \text{ moles}$$

$$n_{\text{NH}_3} = 24.14 \text{ moles}$$

2.8.2.a. Balance de materia del proceso de digestión del Cosustrato. El balance de masa tendrá la siguiente forma:

$$\text{Masa de los Reactivos} = \text{Masa de los productos}$$

Al conocer las moles involucradas en el proceso y el peso molecular de las sustancias, se hace sencillo calcular la masa de estas. De modo que se hace posible realizar un balance de masa para el proceso de digestión, los resultados de este balance se reportaron en la tabla 29.

Tabla 29.

Balance de masa.

Reactivos	Kg	Productos	kg
Cosustrato	200	Metano	6.12
		Dióxido de Carbono	16.84
		Amoniaco	0.41
Agua	2.04	Otros	178.67

Nota. La tabla presenta el balance de masa.

2.8.3 Conversión total del proceso de digestión

Dado que se conocen las conversiones individuales del sustrato y del cosustrato, es posible estimar la conversión total de materia para el proceso de digestión anaerobia propuesto.

Con lo anterior se plantea el balance de masa para el proceso global, teniendo una base de cálculo de 100 kg de alimento de cáscaras de naranja en relación de 1 a 2 en peso con el cosustrato. Los resultados de este ejercicio se reportan en la tabla 30.

Tabla 30. Balance de materia proceso digestión.

Reactivos	Kg	Productos	kg
Cáscara naranja	100	Metano	17.89
Excretas	200	Dióxido de Carbono	49.21
		Amoniaco	0.78
Agua	7.86	Otros	239.98

Nota. La tabla presenta el balance de masa.

Del análisis de la tabla anterior se establece que la composición a la salida del digestor será de 5.81% en metano, el 15.98% en dióxido de carbono, el 0.25% en amoniaco y un 77.95% en subproductos como el biol. La tabla 31 resume esta composición del biogás.

Tabla 31.

Composición en peso de la salida del proceso.

Productos	%
Metano	5.81
Dióxido de Carbono	15.98
Amoniaco	0.25
Otros	77.95

Nota. La tabla presenta el porcentaje de composición pen peso a la salida del proceso.

2.9 Carga de agua necesaria

Conociendo los sólidos totales del sustrato y del cosustrato, se puede estimar el porcentaje de sólidos totales para la mezcla de estos, recordando que esta mezcla está compuesta por un 66% de excretas y un 33% de cáscaras de naranja. Por tanto, el porcentaje de sólidos totales para la mezcla de cáscaras de naranja y excretas bovinas será:

$$\%ST_{Mezcla} = \left(\frac{2}{3} * \%ST_{Excretas} \right) + \left(\frac{1}{3} * \%ST_{Cascaras} \right) \quad (30)$$

$$\%ST_{Mezcla} = 41.66 \%$$

Conociendo el porcentaje de ST para la mezcla que servirá de alimento para el proceso y haciendo uso de ecuación 2, se estima la cantidad de agua necesaria para obtener una relación óptima de sólidos totales del 10%.

Al realizar el cálculo se encontró que por cada 1 kg de mezcla entre el sustrato y el cosustrato se requiere agregar 3.166 Kg de agua, de esta forma para un flujo de alimento al digestor de 15 toneladas/diarias de materia a digerir, se necesitaran 47.49 toneladas de agua, para mantener las condiciones ideales en el digestor.

La cantidad de agua calculada es mayor al agua necesaria por estequiometria, esto se debe a que además de su consumo en el proceso global de digestión, el agua se necesita para mantener la concentración de sólidos volátiles y ayuda a mantener un medio anaerobio, es por esta razón de su alta demanda en el proceso.

2.10 Tiempo de Retención

Se entiende como tiempo de retención hidráulico (TRH) al tiempo de permanencia de la biomasa en el biodigestor, será en este lapso de tiempo en el cual, las bacterias se alimentarán de la biomasa.

Entendiendo el TRH como función de la actividad metabólica de las bacterias, se puede establecer una relación inversamente proporcional entre la temperatura y el TRH, donde, a medida que la temperatura suba, disminuirla el TRH necesario para la biomasa, esto siempre que se mantenga en rangos de temperatura óptimos para el microorganismo en cuestión.

La temperatura del entorno en la cual se desarrolle la digestión, puede influenciar el tiempo de retención, y, por tanto, el rendimiento del mismo. La tabla 33 muestra como varia el THR para la digestión de excretas bovinas a diferentes condiciones climatológicas, por tanto, para evitar una variabilidad del proceso y cambios significativos

en la producción causado por la alteración del clima, es necesario un mantener un control sobre la temperatura del biodigestor.

Para este proyecto se establece que la condición de temperatura sea de carácter mesofílico, condición que posee gran difusión y que demuestra ser bastante efectiva en la producción del biogás. La tabla 32 muestra el TRH recomendado para las excretas bovinas en distintos climas.

Tabla 32.

Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintas regiones.

TRH	Características Climatológicas
30 - 40 Días	Clima Tropical con regiones planas
40 - 60 Días	Regiones Cálidas con inviernos fríos cortos
60 - 90 Días	Clima con inviernos fríos

Nota. La tabla presenta el tiempo de retención para las excretas bovinas en distintas condiciones climáticas. Tomado de M. T. Varnero Moreno, «MANUAL DE BIOGÁS,» “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”., Santiago de Chile, 2011.

2.10.1 Elección del TRH

Se encontró que para una mezcla entre cáscaras de naranja y excretas animales, el tiempo de retención más utilizado es sobre los 30 días, en el trabajo realizado por A. Echeverri Arias [35], en el cual, se realizó la cogestión entre cáscaras de naranja como sustrato y excretas bovinas como cosustrato, se encontró que en TRH superiores a 30 días la producción del biogás empieza a disminuir.

La información anterior coincide con lo reportados por K. J. Escarraga Parra [20], donde se manejó residuos cítricos en codigestión con excretas animales, y en donde el TRH se calculó con la siguiente expresión:

$$TRH = -51.227 \ln(T \text{ } ^\circ\text{C}) + 206.72 \quad (31)$$

Con lo expresión anterior y a una temperatura de 37°C, se define un tiempo de retención para el proceso de 30 días.

3. DISEÑO PLANTA DE PRODUCCIÓN BIOGÁS

En el capítulo anterior se definieron distintas variables para el proceso de producción del biogás como: la temperatura, el tiempo de retención, la carga de agua, además, de la capacidad de generación de los sustratos, basados en esa información, en este capítulo, se realizarán cálculos preliminares de la planta, estableciendo las distintas operaciones y procesos unitarios, así como su secuencia y los correspondientes balances. En el capítulo se usarán módulos simples para obtener una resolución sencilla de equipos y procesos.

3.1 Pretratamientos para la cáscara de naranja

Se deben realizar ciertos tipos de acondicionamientos a la cáscara de naranja, esto con el fin de obtener una mejor producción y calidad para el biogás, además de que realizando específicamente la extracción de Limoneno (compuesto encontrado en los aceites esenciales presentes en la cáscara de naranja) se puede tener un valor agregado al proceso esto refiriéndonos al apartado económico, ya que se puede generar ingresos por la venta de este compuesto (Limoneno). A continuación, se describirán los pretratamientos que harán parte de la producción de biogás a partir del uso de cáscara de naranja:

3.1.1 Lavado de la cáscara de naranja

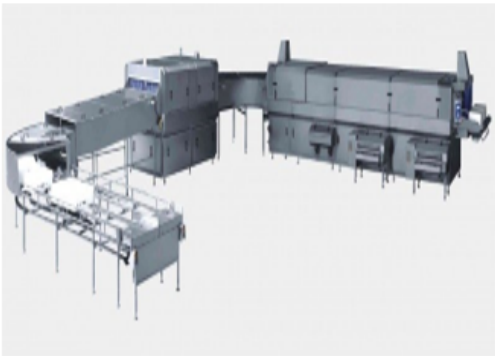
Esta es la etapa inicial, en el cual se evita una contaminación del biorreactor por la presencia de impurezas y compuestos solubles. El lavado se realiza con una cantidad abundante de agua. [38]

Las figuras 19 y 20 presentan ejemplos de los equipos a utilizar en esta operación:

3.1.1.a. Lavadora industrial (a doble línea) de contenedores tipo MP-3000.

Figura 19.

Lavadora industrial tipo MP-3000/ Nowicki [39]


	Proveedor	<u>Nowicki</u>
País de origen	Polonia	
Dimensiones máx.		
Altura	400 mm	
Anchura	600 mm	
Longitud	700 mm	

Nota. Elaboración propia, tomado de: M. NOWICKI, «NOWICKI,» [En línea]. Available: <https://metalbud.com/es/productos/carne/lavadoras/lavadora-industrial-a-doble-linea-de-contenedores-tipo-mp-3000>. [Último acceso: 27 09 2021].

3.1.1.b. Lavadora ZD-XL 4500.

Figura 20.

Equipo ZD-XL 4500 [40]

	Proveedor	<u>SHRIMP Machine</u>
País de origen	Polonia	
Capacidad máx.	2000-3000 Kg/h	
Dimensiones máx.		
Altura	1200 mm	
Anchura	1300 mm	
Longitud	6000 mm	

Nota. Elaboración propia, tomado de: S. Machine, «SHRIMP Machine,» [En línea]. Available: <https://www.shrimpmachine.com/washing-machine-raw-shrimp-fish/>. [Último acceso: 27 09 2021].

3.1.2 Molienda o corte de la cáscara de naranja

Tomando el artículo **Utilización de pre-tratamientos básicos y específicos para la producción de biogás**, allí se trata y se mencionan diferentes pre-tratamientos que pueden hacer óptima la producción de biogás en un proceso de digestión anaeróbica; se contemplan varios métodos del cual se tomara el siguiente.

Se plantea el uso de un pre-tratamiento mecánico como lo es la reducción de tamaño de partículas (Cáscara de naranja), esto enfocado a que se podrá tener una ruptura de las paredes celulares provocando así que los microorganismos puedan “atacar” de mejor manera el sustrato, esto genera una mejora en la velocidad y la eficiencia de la hidrólisis. Siendo uno de los más económicos, teniendo en cuenta lo que son métodos térmicos, biológicos, ultrasónicos y químicos, ya que estos involucran bien sea equipos más complejos o el requerimiento de reactivos, cultivos microbiológicos, etc. [41]. Para este proceso se plantea usar un molino de cuchillas, debido a que es óptimo para el tipo de corte necesario tanto para la extracción de los aceites esenciales, como para su uso en el biorreactor. Las figuras 21 y 22 presentan ejemplos de los equipos a utilizar en esta operación:

3.1.2.a. Molino MC – 120/60.

Figura 21.


Equipo MC - 120/60 [42]

	Proveedor	VEYCO
	País de origen	México
	Capacidad máx.	500-2000 Kg/h
	Dimensiones (mm)	
	Cámara tolva	1200x600
	Largo cuchillas	1200
	Tolva de alimentación	900x600

Nota. Elaboración propia, tomado de: VEYCO, «VEYCO Molinos y Mezcladoras,» [En línea]. Available: <https://molinosmezcladoras.com.mx/molinos-de-cuchillas.html#prettyPhoto>. [Último acceso: 27 09 2021].

3.1.2.b. TT-160/200 H

Trituradora TT-160/200 H [43]

	Proveedor	<u>JOVISA S.L.</u>
	País de origen	España
Dimensiones (mm)		
Ancho Trituración		1574
Longitud cuchillas		2000

Nota. Elaboración propia, tomado de: JOVISA, «JOVISA,S.L. Maquinaria E Hidráulica,» [En línea]. Available: <http://jovisa.eu/destruccion-confidencial/>. [Último acceso: 27 09 2021].

3.1.3 Extracción de Limoneno

El Limoneno es hidrocarburo que se clasifica como terpeno cíclico, el cual es un subproducto de la concentración de los aceites esenciales provenientes de las cáscaras de cítricos (limón, mandarina, naranja, etc.). Este subproducto es usado como solvente biodegradable [44]. Este proceso se realiza mediante el uso de distintos métodos entre estos se contemplan:

3.1.3.a. La expresión. El material vegetal es exprimido mecánicamente para liberar el aceite, este es recolectado y filtrado. Este método se utiliza para el caso de la esencia de cítricos.

3.1.3.b. Extracción con solventes volátiles. La muestra se seca es molida, se pone en contacto con solventes tales como alcohol o cloroformo. Estos solventes solubilizan la esencia, pero también solubilizan y extraen otras sustancias tales como grasas y ceras, obteniéndose al final una esencia impura. Se utiliza a escala de laboratorio, pues en la industria por el valor comercial de los solventes resulta costoso y se obtienen esencias impurificadas con otras sustancias.

3.1.3.c. Enflorado o enfleurage. El material vegetal (generalmente flores) es puesto en contacto con una grasa, la esencia se mezcla con la grasa que actúa como agente

extractor. Se obtiene inicialmente una mezcla de aceite esencial y grasa la cual se separa después por otros medios fisicoquímicos. Normalmente se utiliza el agregado de alcohol caliente que luego de enfriarse separa la grasa (insoluble) y el extracto aromático (absoluto). Esta técnica es empleada para la obtención de esencias florales (rosa, jazmín, azahar, etc.), pero su bajo rendimiento y la difícil separación del aceite extractor la hacen costosa.

3.1.3.d. Extracción con fluidos supercríticos. El material vegetal cortado en trozos pequeños, molido, se empaca en una cámara de acero inoxidable y se hace circular a través de la muestra un fluido en estado supercrítico (ejemplo CO₂), las esencias son así solubilizadas y arrastradas, el fluido supercrítico, que actúa como solvente extractor, se elimina por descompresión progresiva hasta alcanzar la presión y temperatura ambiente y finalmente se obtiene una esencia cuyo grado de pureza depende de las condiciones de extracción. Aunque presenta varias ventajas como rendimiento alto, es ecológicamente compatible, el solvente se elimina con facilidad e inclusive se puede reciclar, y las bajas temperaturas utilizadas para la extracción no cambian químicamente los componentes de la esencia, sin embargo, el equipo requerido es relativamente costoso, ya que se requieren bombas de alta presión y sistemas de extracción también resistentes a las altas presiones y a los ácidos.” [44]

3.1.3.e. Destilación por arrastre con vapor de agua. La cáscara de naranja generalmente fresca y cortada en trozos pequeños, se coloca en un recipiente cerrado y sometida a una corriente de vapor de agua sobrecalentado, la esencia así arrastrada es posteriormente condensada, recolectada y separada de la fracción acuosa [44]. Se propone realizar esta técnica debido a su uso en la industria esto por su alto rendimiento y grado de pureza en el aceite obtenido de la extracción, adicionalmente cuenta con costos bajos para su operación y baja exigencia tecnológica. Además, se tomará como un pre-tratamiento térmico, haciendo su vez de pasteurizador para la cascará de naranja mejorando la producción de biogás en alrededor de 20% o 30%, esto se logra al incrementar la temperatura entre 70°C y 121°C [41], esta acción la realizaría el vapor de agua en condición como agente de arrastre en este proceso de destilación.

3.2 Proceso de extracción del aceite

Como se estableció con anterioridad, la extracción de los aceites esenciales que poseen las cáscaras de naranja, se hará por medio de la destilación con arrastre con vapor, este método provee mejores resultados que los procesos de extracción por presión en frío [45].

3.2.1 Composición del aceite esencial de las cáscaras de naranjas

Cuando se ha hecho mención de la composición del aceite esencial de las cáscaras de naranja, el comentario se ha centrado en el limoneno como el principal compuesto de este aceite, sin embargo, dentro de la composición existen una gran cantidad de compuestos distintos al limoneno que no han sido mencionados, esto se debe a que pesar de estar en el aceite, poseen un bajo porcentaje en la composición del mismo.

Como lo muestra la tabla 33 el aceite esencial de las cáscaras de naranja, está compuesto principalmente por monoterpenos no oxigenados, lo cual, es una de las razones para la selección del método de destilación por vapor, ya que, esta técnica tiene un porcentaje alto de recuperación de monoterpenos [45], se hace evidente que el limoneno es el compuesto con mayor presencia en el aceite, además, posee una gran similitud con los otros compuestos presentes, por tanto, el estudio y posterior planteamiento del proceso extracción del aceite esencial estará basado en la recuperación del limoneno.

A continuación, se presentan las tablas 33 y 34, la tabla 33 muestra la composición en peso del aceite esencial de las cáscaras de naranja, la tabla 34 muestra algunas características fisicoquímicas del limoneno, se tomaron los valores contenidos en estas tablas, como referencia para los cálculos realizados en este capítulo.

Tabla 33.

Composición del aceite esencial de las cáscaras de naranjas.

Compuesto	Porcentaje en Peso (%)
D-Limoneno	90.97
β -mirceno	1.75
γ - terpinoleno	1.65
α -Pineno	0.53
β -felandreno	0.49
Linalol	1.27
Octanol	0.53
Decanal	0.23
Octanal	0.20
Otros	2.38

Nota. La tabla presenta la composición del aceite esencial de las cáscaras de naranja. Tomado de I. Cerón Salazar y C. Cardona Álzate, «Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cáscara de naranja,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 7, nº 13, p.79, 2011.

Tabla 34.*Propiedades Fisicoquímicas de Limoneno.*

Parámetro	Grado Técnico	Gado alimenticio
Apariencia	Líquido amarillo o agua blanca aceitosa	Agua blanca aceitosa
Olor	Aroma fuerte a naranja	Aroma suave a naranja
Gravedad específica (25°C)	0,838-0,843 g/cm ³	0,838-0,843 g/cm ³
Índice refracción (20°C)	1,4710-1,4740	1,4710-1,4740
Flashpoint (punto de inflamabilidad)	46°C	45°C
Punto de ebullición	154°C	163°C
Solubilidad en agua	Insoluble	Insoluble
Presión de vapor (20°C)	2 mmHg	2 mmHg

Nota. La tabla muestra las características fisicoquímicas del aceite esencial de las cáscaras de naranja. Tomado de: I. Cerón Salazar y C. Cardona Álzate, «Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cáscara de naranja,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 7, n° 13, p.79, 2011.

3.2.2 Extracción del aceite

Para lograr la separación de cáscaras y aceites, se considera un proceso conformado por 4 etapas, el cual, permite extraer el aceite de las cascarras de naranja.

El proceso de extracción y sus etapas se explican a continuación;

3.3.2.a. Triturado. Se debe reducir el tamaño de las cáscaras hasta un tamaño aproximado de 4 cm² [45]. Este proceso aumenta el área superficial del sustrato, lo que tiene efectos positivos en la extracción del aceite y la posterior digestión.

3.3.2.b. Extracción de aceite esencial. El aceite se extrae con vapor a 90°C, a esta temperatura se evita que el aceite extraído se degrade o se desnaturalice [45].

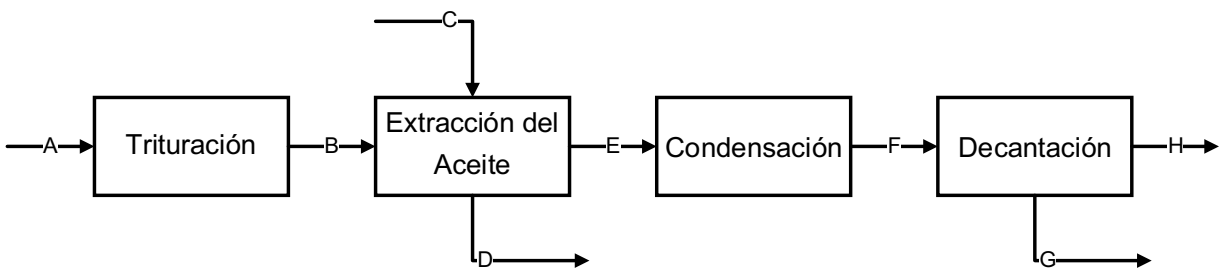
3.3.2.c. Condensado. Al condensar la corriente compuesta de aceite y agua, se facilita su posterior separación.

3.3.2.d. Decantación. al ser sustancias inmiscibles, es posible separar el aceite del agua líquida por medios físicos.

Al final de este proceso, se obtiene las cáscaras de naranja con una baja concentración de aceite, las cuales, serán alimentadas al proceso de digestión, también se obtiene una corriente de aceite esencial, el cual, es un subproducto con valor agregado, el cual, es ampliamente utilizado en la industria farmacéutica. La Figura 19 resume el proceso antes descrito, mostrando las corrientes involucradas y especificando los productos obtenidos en cada una de las etapas.

Figura 22.

Proceso de Extracción del aceite



- A = Cáscaras de naranja
- B = Cáscaras de naranja trituradas
- C = Vapor de Agua 90°C
- D = Cáscaras de naranja sin Aceite
- E = Vapor de Agua 90°C y Aceite Esencial
- F = Agua y Aceite Esencial
- G = Agua
- H = Aceite Esencial

Nota. el diagrama presenta el proceso de extracción de aceites esenciales.

3.3 Diseño del digestor

Para esta operación se optó por un sistema que opere de manera semicontinua con un tiempo de retención de 30 días, cargando diariamente el digestor, de esta forma, se garantiza una producción constante de biogás. [6]

3.3.1 Volumen necesario

En capítulos anteriores se definió el tratamiento de 35 toneladas de cáscaras de naranja semanales, lo que equivale a 150 toneladas mensuales, las cuales, para su tratamiento requieren de 300 toneladas de excretas bovinas como cosustrato y de 1425 toneladas de agua que mantienen una baja concentración de sólidos volátiles.

El volumen del alimento se calculó en 1500 m³, siendo el agua el elemento que define este volumen, dado que se encuentra en mayor concentración que el sustrato y cosustrato, con lo anterior, se entiende que el volumen mínimo para el digestor debe ser igual a 1500 m³.

El digestor funciona como un tanque de almacenamiento de líquidos, por tanto, puede ser tratado como tal, de esta forma se entiende que este no puede operar a una capacidad mayor al 80% [46], esto con la finalidad de evitar que el digestor se rebose y se generen desbordamientos de su contenido.

Se corrige el volumen mínimo necesario aumentando en un 20%, de modo que el volumen de operación para el digestor será igual 1800 m³. Este volumen extra no solo evitara el desbordamiento del digestor, si no, que a su vez permite almacenar de forma temporal el gas generado en su interior.

Dado el alto volumen necesario y para facilitar la operación, así como para garantizar un proceso continuo, se decide repartir la carga total en 3 digestores idénticos, cada uno con un volumen operativo de 600 m³.

De esta forma no se depende únicamente de un solo digestor y las mantenimientos, cargas y descargas pueden realizarse de forma separada, permitiendo una continua generación de gas en el proceso.

3.3.2 Carga diaria

Usando la ecuación de diseño de los digestores semicontinuos, y conociendo el volumen y el tiempo de retención, se calculó la carga diaria de modo que:

$$\text{Tiempo de Retención} = \frac{\text{Volumen de la camara de digestion}}{\text{Volumen de carga diaria}} \quad (3)$$

$$30 \text{ Dias} = \frac{1500 \text{ m}^3}{\text{Volumen de carga diaria}}$$

$$\text{Volumen de carga diaria} = 50 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

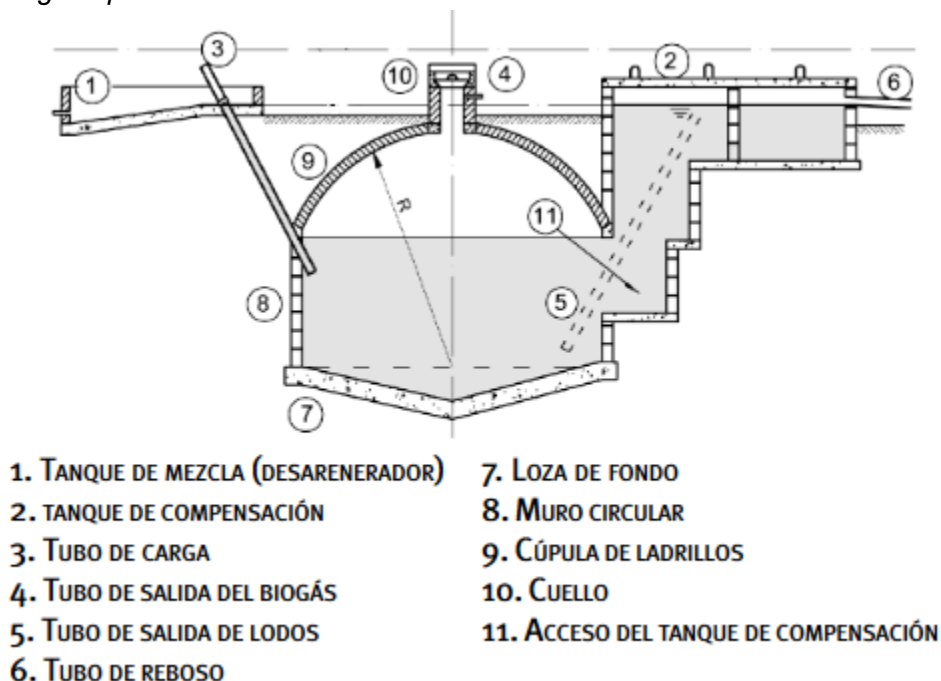
Se cargan diariamente 50 m³ de material dividido en los tres digestores, a la vez, de que se retira de forma continua el biogás y los lodos que se generan.

3.3.3 Tipo de digestor

Para este proceso se eligió el digestor de cúpula fija de tipo chino, ya que, estos digestores pueden manejar sustratos con alto contenido en fibra en mezcla con excretas animales [47], pudiendo alcanzar de 6 a 91 m³ en aplicaciones domésticas y hasta 740 m³ en aplicaciones industriales [48], siendo un digestor que cumple con los requerimientos del proyecto. El diagrama y funcionamiento de este tipo de digestores se presenta en la Figura 19 [49]:

Figura 23.

Planta de Biogás tipo chino



Nota: La Figura muestra el esquema de un digestor tipo chino. Tomado de J. A. GUARDADO CHACÓN, Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas, Habana, Cuba: CUBASOLAR, 2007, pp,16

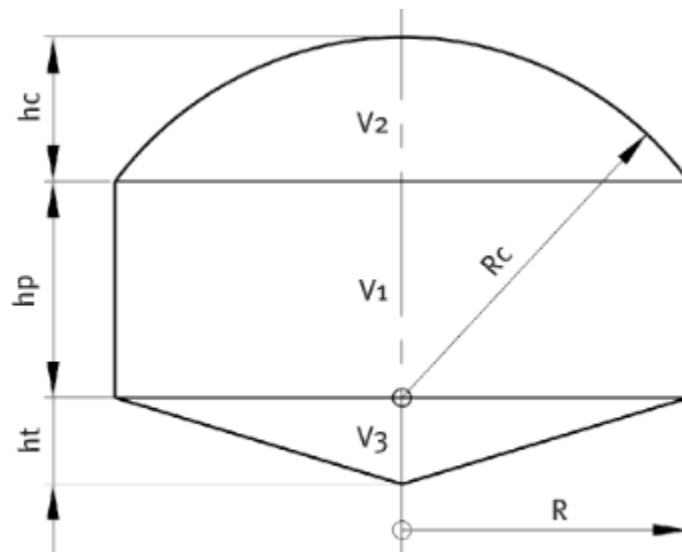
3.4.3.a. Funcionamiento digester tipo chino. Este tipo de digester pueden ser operados de forma continua o discontinua, se alimentan desde un tanque, en el que se mezcla el sustrato junto al cosustrato y el agua, para posteriormente ser alimentados al digester, a medida que se genera el biogás este se acumula en el domo del digester, mientras el líquido es empujado hacia el tanque de compensación [50], el gas es liberado por la parte superior y los lodos generados son retirados del digester de forma periódica.

3.3.4 Dimensionamiento del digester

Como lo muestra la Figura 21, la forma del digester tipo chino es compleja y no corresponde a ninguna figura geometría básica, lo que dificulta el cálculo de sus dimensiones, es posible dividir el digester en tres formas básicas, para de esta forma facilitar los cálculos a realizar, con esto se entiende, que digester estará compuesto por una zona cónica en la base, un cilindro en medio y una cúpula o semi esfera en la parte superior. El volumen total del digester será igual a la suma de cada uno de los volúmenes individuales de cada zona, la Figura 20 presenta la división al volumen del digester en las distintas secciones planteadas:

Figura 24.

Partes en que se divide un biodigester de cúpula fija



Nota: la Figura muestra la división en el volumen del digester. Adaptado de J. A. GUARDADO CHACÓN, Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas, Habana, Cuba: CUBASOLAR, 2007, pp,24

Donde V_1 , V_2 y V_3 serán los volúmenes de cada zona del digestor, h_p , h_c y h_t serán las alturas correspondientes, R_c es el radio de la cúpula y R el radio del biodigestor, se realizarán los cálculos pertinentes para el dimensionamiento de los digestores, estos cálculos serán realizados para un solo digestor de 600 m^3 , entendiendo que se propone operar tres digestores idénticos.

3.3.5 Radio del digestor

Para calcular el radio del digestor es necesario conocer su volumen total, para este caso y como se definió con anterioridad, el volumen de operación será de 600 m^3 .

El volumen total del digestor esta expresado como:

$$V_{Total} = R^3 * \pi * 1.121 \quad (32)$$

Donde 1.121 es una constante válida para el diseño de digestores de cúpula fija para la unidad de medida de metros [49].

Por tanto, el radio del digestor será de:

$$R = 5.543 \text{ m}$$

3.3.6 Unidad proporcional

La unidad proporcional (U) es una la relación que existe entre los distintos parámetros de dimensión del digestor, dicha unidad se calcula de la siguiente forma [49]:

$$U = \frac{R}{4} \quad (33)$$

Con:

$$U = 1.3859 \text{ m}$$

3.3.7 Sección cilíndrica del digestor

El volumen de esta sección está dado por la siguiente expresión:

$$V_1 = R^2 * \pi * h_p \quad (34)$$

Con

$$h_p = 3 U$$

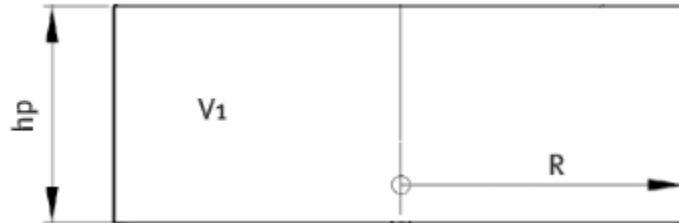
De modo que:

$$V_1 = 401.42 m^3$$

La Figura 21 muestra de forma gráfica las dimensiones de la sección cilíndrica.

Figura 25.

Sección Cilíndrica



Nota. Figura de la sección cilíndrica del digestor.

3.3.8 Sección de la cúpula

El volumen de esta sección está dado por la ecuación 35 y su representación gráfica se encuentra contenida en la Figura 22.

$$V_2 = hc^2 * \pi * R_c * \frac{hc}{3} \quad (35)$$

Con:

$$hc = 2 * U$$

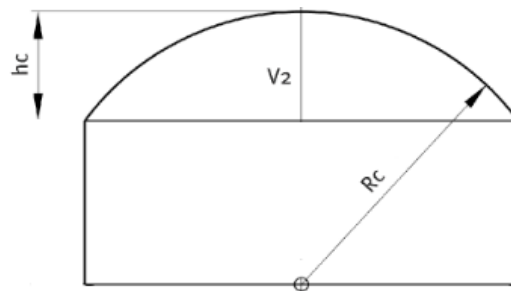
$$R_c = 5 * U$$

Se obtiene que:

$$V_2 = 154.54 m^3$$

Figura 26.

Sección Cúpula



Nota. Figura de la cúpula del digestor.

3.3.9 Sección de la base o cono

El volumen de esta sección está dado por la ecuación 36 y su representación gráfica se encuentra contenida en la Figura 23:

:

$$V_3 = R^2 * \pi * \frac{ht}{3} \quad (36)$$

Con

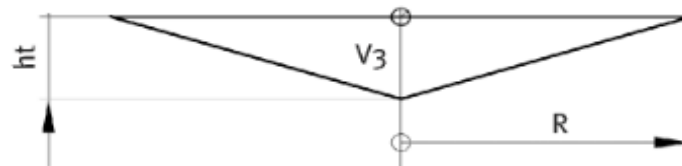
$$ht = U$$

Se obtiene que:

$$V_3 = 44.60 \text{ m}^3$$

Figura 27.

Sección de la base



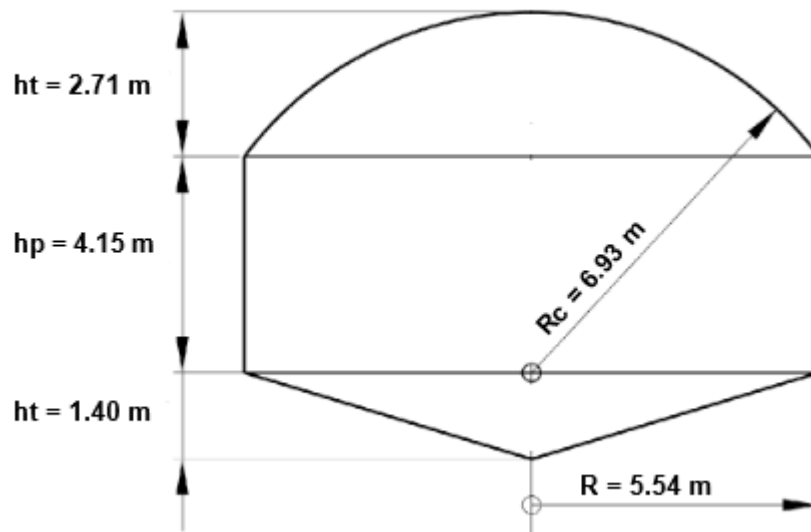
Nota. Figura de la sección del cono del digestor

3.3.10 Dimensiones del digestor

Los digestores a usar tendrán una capacidad para 600 m³, una altura de 8.26 m y un radio de 5.54 m, la Figura 28 presenta de forma gráfica las dimensiones de los digestores propuestos.

Figura 28.

Dimensiones del digestor



Nota. Figura de las dimensiones del digestor.

3.4 Diseño del tanque de compensación

El tanque de compensación es aquella unidad encargada de almacenar el líquido desplazado por el gas. Por lo general, el tanque de compensación tendrá un volumen equivalente al volumen de la cúpula [49], debido a que es en este segmento, en el cual, se acumula de forma temporal el gas generado. Este segmento puede ser descrito como un cilindrito con una radio de igual valor que el radio del digestor, por lo tanto, su volumen se expresa como:

$$V_{TC} = R^2 * \pi * h_{TC} \quad (37)$$

Con:

$$V_{TC} = V_2$$

3.4.1 Dimensiones de tanque de compensación

El tanque tendrá una capacidad de 154.54 m³. Con una altura de 1.6 m y un radio de 5.54 m, la figura 29 presenta las dimensiones propuestas para el tanque de compensación.

Figura 29.

Dimensiones del tanque de compensación



Nota. Figura del tanque de compensación.

3.5 Balance de materia

3.5.1 Alimento del proceso

El alimento de los digestores está compuesto por el sustrato, el cosustrato, el agua requerida por estequiometría para la reacción y agua necesaria para mantener la concentración de sólidos volátiles dentro de los digestores, se hace esta distinción entre el agua para distintos propósitos, dado que el agua destinada para mantener la concentración de sólidos volátiles, representa la mayor parte de la masa en el digestor y esta se alimenta únicamente al iniciar la operación de los digestores y se retira únicamente cuando estos son vaciados por completo, por el contrario, el sustrato, el cosustrato y el agua requerida por estequiometría de la reacción, son alimentados de forma diaria.

Se realiza el balance de materia para el proceso teniendo en cuenta un flujo de alimento diario de 5 toneladas de cáscaras de naranja. La tabla 35 muestra la composición del alimento diario.

Tabla 35.

Flujo de alimento del proceso.

Reactivos	Ton/día
Cáscara naranja	5
Excretas	10
Agua	0.393
Total	15.393

Nota. La tabla presenta el flujo de alimento diario al proceso.

Del flujo de alimento diario se excluye el agua destinada para mantener la concentración de sólidos volátiles, dado que esta es alimentada una única vez y se entiende que no participa en la digestión anaerobia y, por tanto, se establece que su masa se mantiene constante durante el proceso.

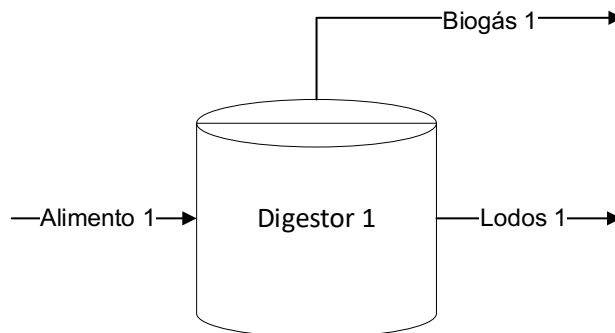
3.5.2 Balance de materia por digestor

Dado que se desean operar tres digestores de igual capacidad, los flujos de alimento reportados en la tabla 35, deben ser divididos en cantidades iguales para los tres digestores.

Los biodigestores constan de una única entrada de materia y dos salidas, una salida ubicada en la parte superior que corresponde a la salida del biogás y otra que corresponde a la salida de lodos o material orgánico en suspensión

Figura 30.

Balance materia digestor



Nota. la Figura presenta las corrientes de entrada y salida el digestor.

El balance de materia para los digestores esta expresado como:

$$F_{Alimento\ 1} = F_{Biogas\ 1} + F_{Lodos\ 1} \quad (38)$$

Donde el flujo de la corriente de alimento será igual a los flujos de las corrientes de biogás y lodos, correspondientes a las corrientes de salida. Las tablas 36 y 37 muestran los flujos de cada una de estas corrientes

Tabla 36.

Flujo corriente de alimentación.

Reactivos	Ton/día
Cáscara naranja	1.67
Excretas	3.33
Agua	0.13

Nota. La tabla presenta el flujo de alimento para un solo digestor.

Tabla 37.

Flujos de las corrientes de salida de materia.

Biogás	Ton/día	Lodos	Ton/día
Metano	0.31		
Dióxido de Carbono	0.84	Lodos	3.97
Amoniaco	0.01		
Total	1.16	Total	3.97

Nota. La tabla presenta los flujos de salida del digestor.

Teniendo los flujos de cada una de las corrientes del digestor, se realiza el balance de materia, la tabla 38 muestra este balance.

Tabla 38.

Balance de materia para un digestor.

Flujos de Entrada	Ton/día	Flujos de Salida	Ton/día
Alimento	5.13	Biogás	1.16
		Lodos	3.97
Total	5.13	Total	5.13

Nota. La tabla presenta el balance de materia para el proceso de digestión anaerobia.

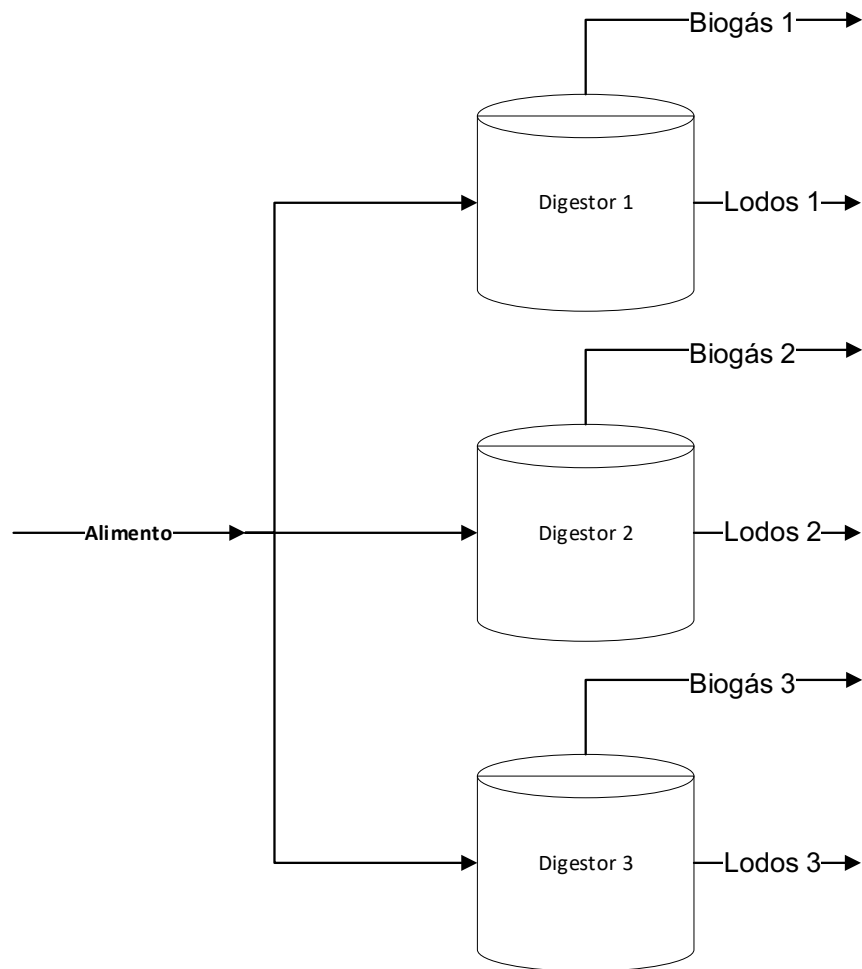
3.5.3 Balance de materia del proceso de digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobio propuesto consta de 3 digestores que operan en paralelo, de esta forma se garantiza una producción continua de biogás, la Figura 27 muestra de forma gráfica este proceso.

Dado las corrientes de carga y descarga de materia de los distintos digestores son idénticas, y ya que estas ya fueron calculadas, el modelo del proceso se puede simplificar, de modo que solo se muestre el proceso global de la forma como lo muestra la Figura 31.

Figura 31.

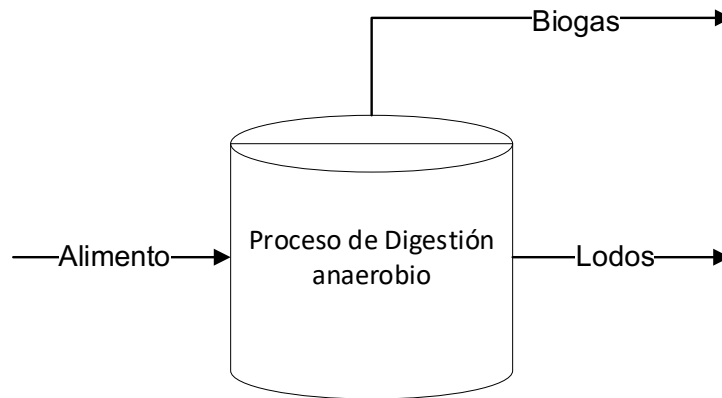
Proceso de digestión anaerobia



Nota. La figura muestra el proceso de digestión anaerobia.

Figura 32.

Proceso global de digestión anaerobia



Nota. La figura muestra los flujos de entrada y salida del proceso global de digestión anaerobia.

El balance de masa de proceso de digestión anaerobia tendrá la siguiente forma:

$$F_{Alimento} = F_{Biogas} + F_{Lodos} \quad (39)$$

Los flujos de la corriente de alimento serán iguales a los reportados en la tabla 36, por el lado de los flujos de las corrientes de biogás y lodos, estas se definen como:

$$F_{Biogas} = F_{Biogas\ 1} + F_{Biogas\ 2} + F_{Biogas\ 3} \quad (40)$$

Con:

$$F_{Biogas\ 1} = F_{Biogas\ 2} = F_{Biogas\ 3}$$

$$F_{Lodos} = F_{Lodos\ 1} + F_{Lodos\ 2} + F_{Lodos\ 3} \quad (41)$$

Con:

$$F_{Lodos\ 1} = F_{Lodos\ 2} = F_{Lodos\ 3}$$

La tabla 39 muestra los flujos de las corrientes de Biogás y de Lodos.

Tabla 39.

Flujos de salida de materia.

Biogás	Ton/día	Lodos	Ton/día
Metano	0.92		
Dióxido de Carbono	2.52	Lodos	11.91
Amoniaco	0.04		
Total	3.48	Total	11.91

Nota. La tabla presenta los flujos de salida del proceso de digestión anaerobia.

3.6 Composición del biogás

Del balance de masa global del proceso se sabe que se generan diariamente 3.48 toneladas de biogás, la composición prevista concuerda con los valores normales de composición para el biogás reportados en la literatura [6] [7]. La composición en peso del biogás se muestra en la 40.

Tabla 40.

Composición en peso del Biogás.

Biogás	%
Metano	26.36
Dióxido de Carbono	72.50
Amoniaco	1.15

Nota. La tabla presenta la composición del biogás obtenido del proceso de digestión.

3.6.1 Volumen de metano generado

Dado que se conocen la masa del gas generado, es posible calcular el volumen que ocupa por medio de la ecuación de Van der Waals, de forma similar a lo hecho en el capítulo anterior. De modo que 0.92 toneladas diarias de metano tendrán un volumen de 1457.47 m³, valor que concuerda con lo calculado anteriormente, teniendo un error de solo el 1,16% con respecto al rendimiento específico de metano calculado que tuvo un valor de 1474.65 m³.

3.7 Purificación del biogás

Como lo muestra la tabla 41, el biogás obtenido tendrá en su composición elementos que son consideradas impurezas, y por tanto disminuyen la calidad del producto obtenido y limitan las aplicaciones que pueda tener.

Si se busca que el biogás obtenido pueda ser usado como combustible en una gran variedad de procesos y que este se presente como una alternativa al uso del gas natural, el biogás debe contar con características similares a este último, de esta forma, el gas generado podrá ser usado en aplicaciones domésticas, vehiculares e inclusive alimentado a redes de distribución de gas natural.

Sobre alimentar el biogás a redes de distribución o gasoductos de gas natural, no se han establecido estándares de calidad para el biogás que se alimente a redes de gas natural [51]. La presencia de gases como el amoníaco y el H_2S en el biogás dificultan un uso extensivo, a causa de que estos compuestos son propensos a correr tuberías o equipo, y que su quema genera compuestos peligrosos para el ambiente y la salud humana [7], además que la alta concentración de CO_2 disminuye la capacidad calorífica del biogás, lo que obliga a consumos más altos.

Con lo anterior, se hace necesario retirar las impurezas presentes del gas, para de esta forma obtener un producto de mayor calidad, se plantea un proceso de refinación del biogás, tomando como base la composición normal del gas natural. La composición del gas natural se presenta en la 41 [52].

Tabla 41.

Composición gas natural.

Compuesto	%
Metano	81.86
Dióxido de carbono	3.18
Otros	14.96

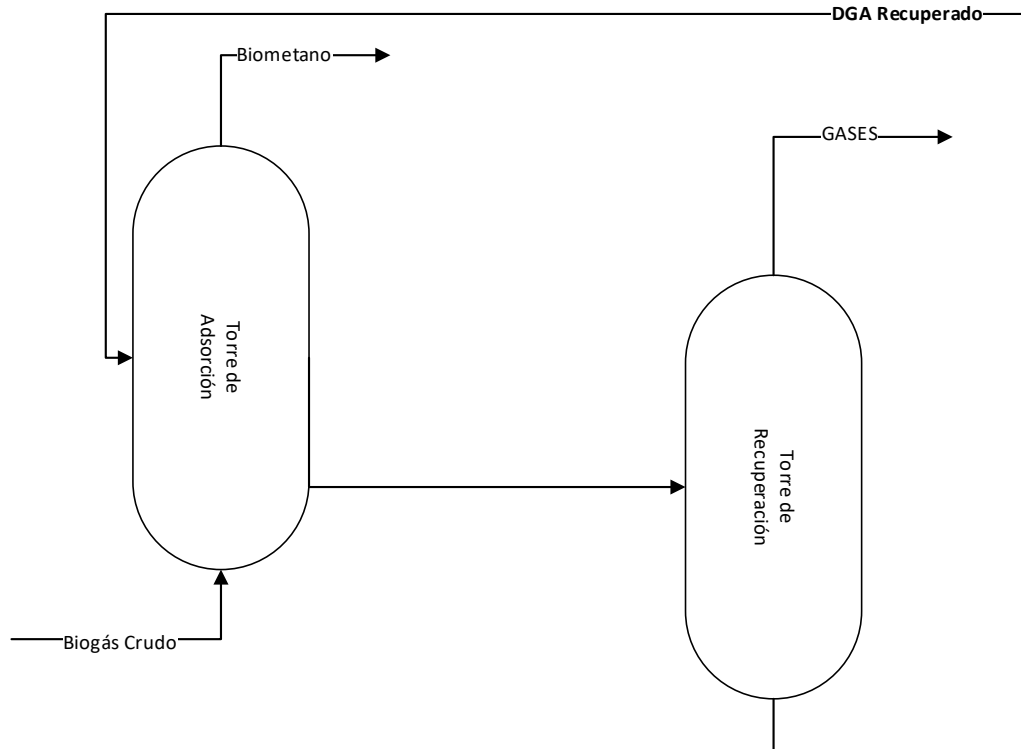
Nota. La tabla presenta la composición del gas natural domiciliario. Tomado de Vanti, «Composición típica del gas natural.» [En línea]. Available: <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>. [Último acceso: 2021 10 26]

3.7.1 Proceso de purificación

Para el proceso de purificación se eligió un proceso de adsorción con aminas, dado que este proceso presenta una alta remoción de CO_2 y de H_2S [53], el proceso de adsorción con aminas se presenta en la figura 33.

Figura 33.

Proceso de absorción



Nota. La figura muestra el proceso de adsorción con aminas.

El biogás crudo es alimentado a una primera torre de adsorción en donde entra en contacto con una amina alimentada en contra corriente, obteniendo por la parte superior un biogás refinado con una alta composición de metano y por fondos una corriente líquida compuesta principalmente de la amina y las impurezas del biogás, esta corriente pasa a una segunda torre donde se recupera la amina y la cual es recirculada a la primera torre.

3.7.2 Simulación del proceso de purificación

Para este proceso se usará como amina la Diglicolamina (DGA), dado que, a pesar que tiene en comparación un costo más elevado que otras aminas, está posee la capacidad para eliminar H_2S y CO_2 y no representa un problema de corrosión para los equipos involucrados [54].

El proceso ocurre a 700 Kpa y $25^\circ C$, debido a que es en estas condiciones, de presión alta y baja temperatura, en la cual, se favorece la adsorción del CO_2 presente en el biogás [53].

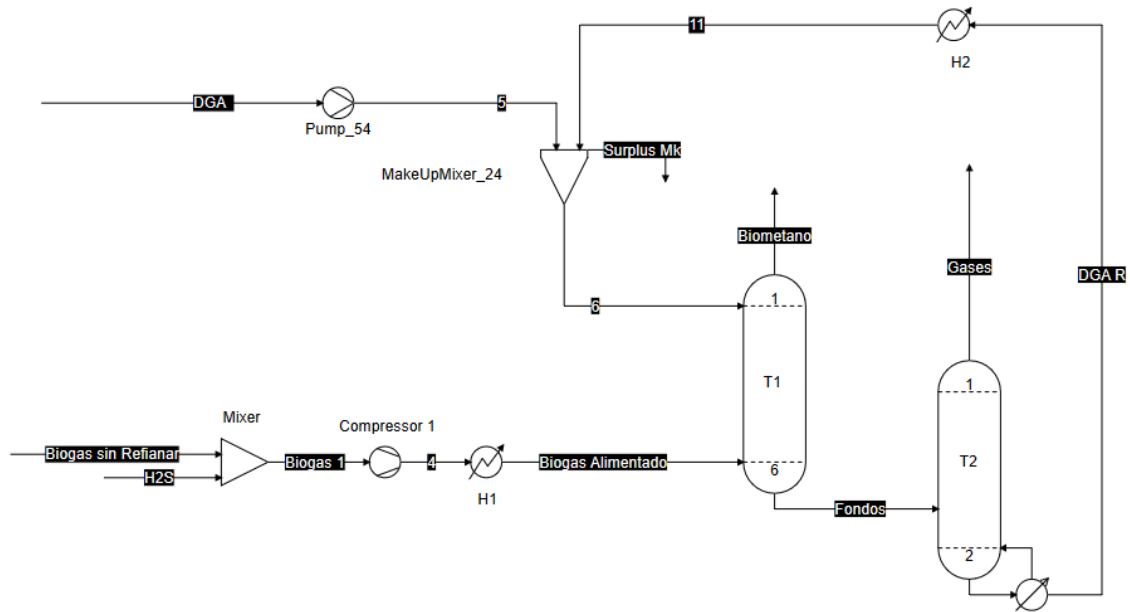
Se adiciono a la composición del biogás que sale de los digestores un 3% en peso de H_2S , dado que este compuesto es una de las principales impurezas del biogás, y sin embargo, su formación no se tuvo en cuenta en los análisis anteriores, pues, los modelos de Buswell y Boyle no lo consideran, aun así, se ha establecido que la mayoría de los biodigestores produce un biogás que contiene entre 0,3 a un 3% de H_2S [55] y por tanto, se tomara en cuenta su presencia en el biogás

Usando el simulador Coco y el módulo de destilación de Chemsep, se realizó una primera aproximación del proceso de adsorción de CO_2 del biogás crudo o sin refinar, para la obtención de biogás refinado, también conocido como biometano.

En la simulación se logró obtener un biogás refinado con una composición molar de 99% de metano, haciendo uso de 95 kmol/h de DGA, de la cual, se recupera el 97% que se recircula a la primera torre. La figura 34 muestra la simulación realizada en el software de Coco.

Figura 34.

Simulación Adsorción con DGA



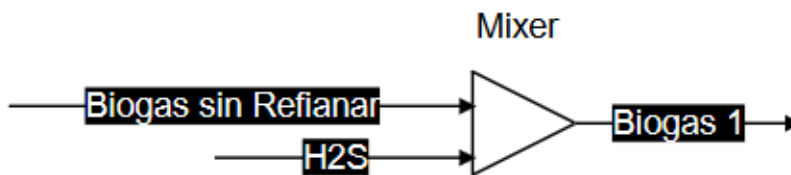
Nota. La figura muestra la simulación realizada en el software COCO.

Los datos de operación y balances de materia por equipo se presentan a continuación:

3.8.2.a. Operación Mixer. En este equipo se agrega a la corriente de biogás crudo el H2S, por tanto, este es un equipo teórico y no representa ningún equipo en la planta. Su diagrama se presenta en la Figura 35.

Figura 35.

Diagrama mixer



Nota. La Figura muestra el diagrama del equipo mixer.

Las tablas 42, 43 y 44 contienen los flujos de las corrientes involucradas.

Tabla 42.*Flujo corriente Biogás sin refinar.*

Corriente	Biogás sin Ref	Unidad
Presión	101.325	KPa
Temperatura	37	°C
Flujo Metano	2.39	kmol / h
Flujo CO ₂	2.39	kmol / h
Flujo NH ₃	0.09	kmol / h

Nota. La tabla presenta los flujos de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.**Tabla 43.***Flujos corrientes H₂S.*

Corriente	H₂S	Unidad
Presión	101.325	KPa
Temperatura	37	°C
Flujo H ₂ S	0.13	kmol / h

Nota. La tabla presenta los flujos de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.**Tabla 44.***Flujo corriente Biogás 1.*

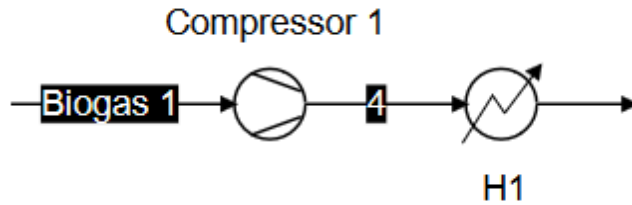
Corriente	Biogás 1	Unidad
Presión	101.325	KPa
Temperatura	36.9957	°C
Flujo Metano	2.39	kmol / h
Flujo CO ₂	2.39	kmol / h
Flujo NH ₃	0.09	kmol / h
Flujo H ₂ S	0.13	kmol / h

Nota. La tabla presenta los flujos de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.

3.8.2.b. Operación compresor 1 e intercambiador de calor H1. En estos equipos se aumenta la presión del biogás hasta los 700 kPa para luego reducir su temperatura hasta los 25 °C. El compresor requiere para su operación KW y el intercambiador debe extraer 12.25 KW. Su diagrama se presenta en la figura 36.

Figura 36.

Diagrama Compresor 1 e intercambiador H1



Nota. La figura muestra el diagrama del compresor y el intercambiador H1.

Las tablas 45 y 46 presentan las condiciones de operación de las corrientes.

Tabla 45.

Presión y Temperatura corriente 4.

Corriente	4	Unidad
Presión	700	KPa
Temperatura	237.521	°C

Nota. La tabla presenta las condiciones de operación de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.

Tabla 46.

Presión y Temperatura corriente 4.

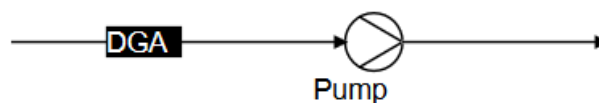
Corriente	Biogás Alimentado	Unidad
Presión	700	KPa
Temperatura	25	°C

Nota. La tabla presenta las condiciones de operación de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.

3.8.2.c. Operación Bomba. En esta unidad se aumenta la presión del DGA hasta los 700 Kpa, este equipo demanda 2 KW para operar. Su diagrama se presenta en la Figura 37.

Figura 37.

Diagrama bomba



Nota. La Figura muestra el diagrama del equipo de la bomba.

La tabla 47 contiene la información del flujo de la corriente DGA.

Tabla 47.

Flujo corriente DGA.

Corriente	DGA	Unidad
Presión	101.325	KPa
Temperatura	25	°C
Flujo DGA	95	kmol / h

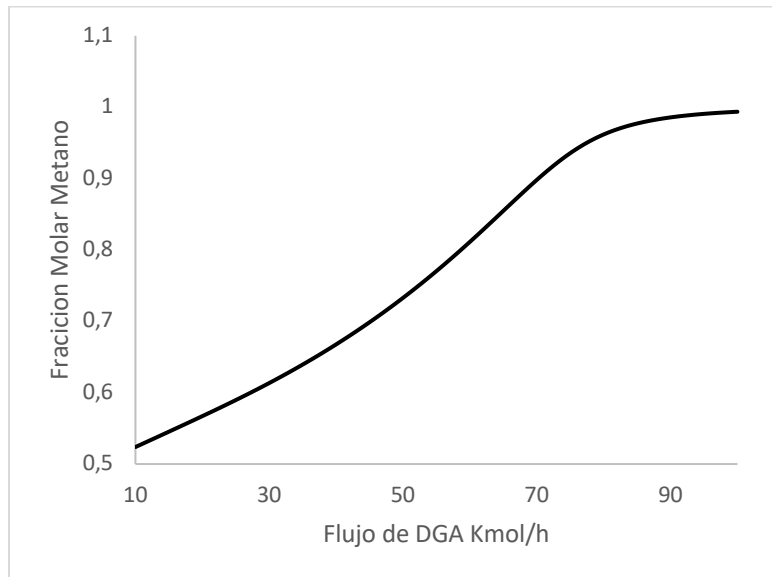
Nota. La tabla presenta las condiciones de operación de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.

El flujo de DGA se determinó mediante análisis paramétricos de la simulación, en donde se buscó un flujo molar de DGA que permitiera alcanzar concentraciones superiores al 97% de metano en la salida de la torre de adsorción, esto para tener una composición de gas semejante a la del gas natural alimentado en gasoductos [52]. La figura 38 muestra la relación entre el flujo de DGA y la composición de metano de salida.

De la información contenida en la gráfica 5 se entiende que, para alcanzar composiciones de metano altas, se requiere flujos de DGA superiores a 80 Kmol/h, para este proyecto se seleccionó un flujo de DGA de 95 Kmol/h que permite alcanzar una composición de 98% de metano en la corriente de salida del proceso, aunque, este flujo parece alto se compensa con la recuperación de DGA, siendo esta del 97%.

Figura 38.

Flujo de DGA VS Fracción molar de metano

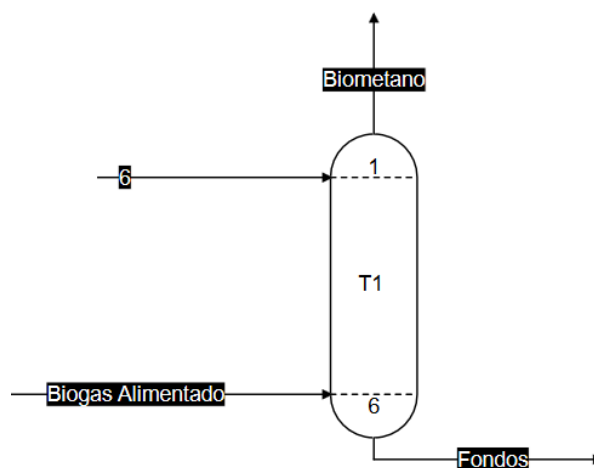


Nota. La gráfica muestra la relación entre el flujo de DGA alimentada en el proceso de purificación y la fracción molar del metano en la corriente de biometano.

3.8.2.d. Torre de adsorción T1. Torre de adsorción de 6 platos, el biogás es alimentado por el último plato a contra corriente del DGA que es alimentado por el primero, esta configuración facilita la adsorción de las impurezas por la amina. Su diagrama se presenta en la figura 39.

Figura 39.

Diagrama torre T1



Nota. La figura muestra el diagrama de la torre de adsorción.

Las tablas 48 y 49 contienen la información de los flujos de las corrientes.

Tabla 48.

Flujos corrientes de Biometano.

Corriente	Biometano	Unidad
Presión	700	KPa
Temperatura	25.0258	°C
Flujo Metano	2.13232	kmol / h
Flujo CO ₂	0.0202099	kmol / h
Flujo NH ₃	2.96E-06	kmol / h
Flujo H ₂ S	1.18E-05	kmol / h
Flujo DGA	1.72E-07	kmol / h

Nota. La tabla presenta los flujos de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.

Tabla 49.

Flujos corrientes de Fondos.

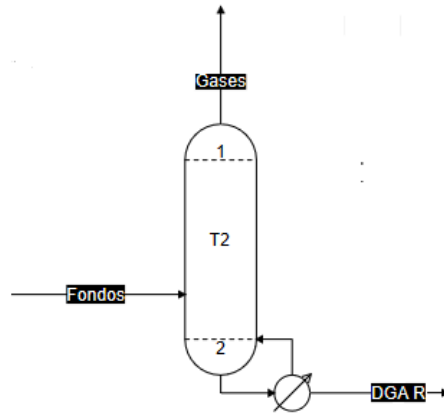
Corriente	Fondos	Unidad
Presión	700	KPa
Temperatura	26.3617	°C
Flujo Metano	0.257689	kmol / h
Flujo CO ₂	2.37017	kmol / h
Flujo NH ₃	0.090085	kmol / h
Flujo H ₂ S	0.130122	kmol / h
Flujo DGA	95	kmol / h

Nota. La tabla presenta los flujos de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.

3.8.2.e. Torre de recuperación DGA. En esta torre se recupera la amina, logrando recuperar el 97% de esta, la torre posee 3 platos y solo cuenta con un rehervidor, es alimentada por los fondos de la primera columna por el plato 2, por la cima se obtiene una mezcla de gases a alta temperatura. Su diagrama se presenta en la figura 40.

Figura 40.

Diagrama Torre T2



Nota. La figura muestra el diagrama de la torre de recuperación.

Las tablas 50 y 51 contienen la información de los flujos de las corrientes

Tabla 50.

Flujos corrientes DGA R.

Corriente	DGA R	Unidad
Presión	700	KPa
Temperatura	344.851	°C
Flujo Metano	1.17E-05	kmol / h
Flujo CO ₂	0.000378669	kmol / h
Flujo NH ₃	8.80E-05	kmol / h
Flujo H ₂ S	0.000133883	kmol / h
Flujo DGA	92.955	kmol / h

Nota. La tabla presenta los flujos de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.

Tabla 51.

Flujo corriente Gases.

Corriente	Gases	Unidad
Presión	700	KPa
Temperatura	25	°C
Flujo Metano	0.257677	kmol / h
Flujo CO ₂	2.36979	kmol / h
Flujo NH ₃	0.089997	kmol / h
Flujo H ₂ S	0.129988	kmol / h
Flujo DGA	2.04495	kmol / h

Nota. La tabla presenta los flujos de las corrientes involucradas en el proceso de purificación.

3.8.2.f. Unidad make up mixer. Esta es una unidad matemática propia del simulador, que permite calcular el reflujo de DGA. La cantidad de DGA a reponer será la diferencia entre las 95 Kmol/h de alimento necesarias y la cantidad de amina recuperada por los fondos de la segunda torre.

3.8 Almacenamiento biogás refinado

Para almacenar el biogás se debe establecer una presión de gas a la cual se realiza esta operación, teniendo en cuenta que a mayores presiones la densidad del gas disminuye y, por tanto, se necesitarían equipos de mayor tamaño, pero con una tolerancia a la presión muy alta, caso contrario pasa con el almacenamiento de biogás de baja presión, los cuales, requieren equipos de gran volumen para almacenarlo, pero con una baja tolerancia a la presión.

En Colombia la presión de gas natural alimentado a los gasoductos es de 60 psi o 417.8 Kpa, al llegar a las instalaciones domésticas la presión se disminuye hasta 0.25 psi [56]. Se tomará presión como estándar la presión de 60 psi para almacenar el biogás, dado que a esta condición se facilita el uso del biogás refinado en instalaciones que operan normalmente con gas natural.

Se propone una capacidad de almacenamiento de biogás equivalente a 1 día de operación, entendiendo que se espera que el gas sea consumido poco tiempo después de su generación. La tabla 52 contiene los datos del gas a almacenar.

Tabla 52.

Datos de biometano para un día de operación.

Corriente	Biometano	Unidad
Presión	413.686	KPa
Temperatura	25.0258	°C
Flujo	51.6611	kmol / día
Flujo Metano	51.1758	kmol / día
Volumen	306.75	m ³

Nota. La tabla presenta las condiciones de operación de la corriente del biometano crudo producido en el proceso.

Como lo muestra la tabla 52, se requiere de una capacidad mínima para almacenar 306.75 m³ de biogás refinado o biometano, el almacenamiento de estos gases puede hacerse en tanque horizontales de más 10,000 L [57] .

Se propone almacenar el biogás refinando en tanques horizontales de 100 m³, por tanto, se obtendría una capacidad instalada de 400 m³, teniendo un aumento del 30% con respecto a la capacidad mínima requerida. Las dimensiones y especificaciones del tanque fueron tomadas del modelo de tanque CLW de la empresa china Chengli Special Automobile Co., Ltd [58] y se presentan en las tablas 53 y 54.

Tabla 53.

Información básica Tanque CLW.

No. De Modelo	CLW	Función	Almacenamiento a presión
Presión	1.6 Mpa a 10 Mpa	Material	Acero al carbono

Nota. La tabla presenta la información básica del tanque CLW. Tomado de Chengli Special Automobile Co., Ltd, «Chengli Special Automobile Co., Ltd,» [En línea]. Available: <https://www.chenglispecialautomobile.com/>. [Último acceso: 28 10 2021].

Tabla 54.*Dimensiones Tanque CWL.*

Peso Vacío	Kg	20410		
Peso llenado medio	Kg	39900		
Grosor	Placas de Extremos Carcasa	Mm	16	
		Mm	18	
Diámetro nominal	mm	3100		
Dimensión global	mm	Largo 13866	Diámetro 3132	Alto 3722

Nota. La tabla presenta las características del tanque CWL. Tomado de Chengli Special Automobile Co., Ltd, «Chengli Special Automobile Co., Ltd,» [En línea]. Available: <https://www.chenglispecialautomobile.com/>. [Último acceso: 28 10 2021].

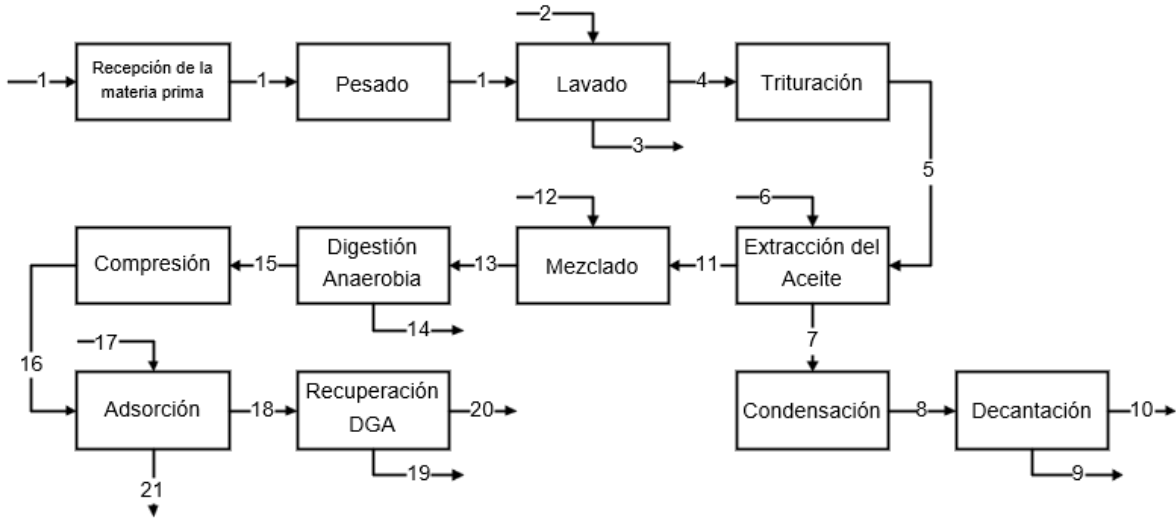
3.9 Proceso global de digetion anaerobia

Teniendo en cuenta las variables definidas durante este capítulo, se procede a establecer la estructura global del proceso, incluyendo los pretratamientos de la materia prima, el proceso de digestión que permite lograr la transformación de la biomasa en biogás y el proceso de purificación con el cual, se alcanza un producto de valor agregado como lo es el biogás refinado o biometano.

El proceso proyecto propuesta consta de 12 etapas, en las cuales, la biomasa es transformada desde los sustratos (cáscaras de naranja y excretas bovinas) hasta productos de valor agregado como: los lodos, el aceite esencial presente en las cáscaras y el biometano, la lógica y orden para el proceso se presenta en la Figura 41.

Figura 41.

Proceso de digestión anaerobia



Corrientes del proceso:

- | | |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1 = Cáscaras de naranja | 11 = Cáscaras de naranja sin Aceite |
| 2 = Agua | 12 = Excretas Bovinas |
| 3 = Agua con suciedad | 13 = Cáscaras de naranja y Excretas Bovinas |
| 4 = Cáscaras de naranja | 14 = Lodos |
| 5 = Cáscaras de naranja trituradas | 15 = Biogás |
| 6 = Vapor de Agua 90°C | 16 = Biogás |
| 7 = Vapor de Agua 90°C y Aceite esencial | 17 = DGA |
| 8 = Agua y Aceite esencial | 18 = DGA e impurezas |
| 9 = Agua | 19 = impurezas |
| 10 = Aceite esencial | 20 = DGA recuperado |
| | 21 = Biometano |

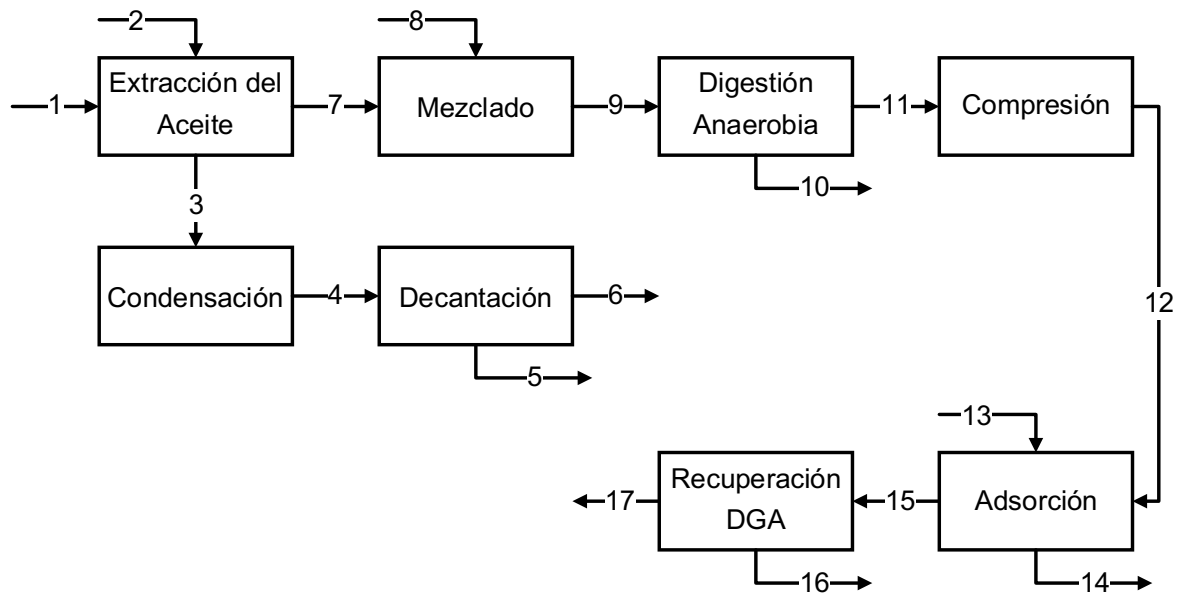
Nota. La figura muestra el proceso de digestión anaerobia.

3.9.1 Balance de masa del proceso

En el análisis del balance de masa, se decide excluir del balance las etapas de Recepción de materia prima, pesado, lavado y trituración, dado que en estas etapas no ocurren cambios o una transformación de la materia, de esta forma el proceso para construir el balance se presenta en la Figura 42.

Figura 42.

Proceso de digestión anaerobia para el balance de masa



Corrientes del proceso:

- | | |
|--------------------------------------------|----------------------|
| 1 = Cáscaras de naranja | 10 = Lodos |
| 2 = Vapor de Agua 90°C | 11 = Biogás |
| 3 = Vapor de Agua 90°C y Aceite esencial | 12 = Biogás |
| 4 = Agua y Aceite esencial | 13 = DGA |
| 5 = Agua | 14 = Biometano |
| 6 = Aceite esencial | 15 = DGA e impurezas |
| 7 = Cáscaras de naranja sin Aceite | 16 = impurezas |
| 8 = Excretas Bovinas | 17 = DGA recuperado |
| 9 = Cáscaras de naranja y Excretas Bovinas | |

Nota. La figura muestra el proceso de digestión anaerobia.

Las tablas 55 y 56, presentan los flujos de materia para cada una de las corrientes involucradas en el proceso para la producción de biogás.

Tabla 55.*Flujos de materia del proceso de producción de biogás.*

Corrientes	Masa (Ton/día)				Total
	Cáscaras	Excretas	Agua	Aceite	
1	5.00	-	-	0.15	5.15
2	-	-	1.00	-	1.00
3	-	-	1.00	0.15	1.15
4	-	-	1.00	0.15	1.15
5	-	-	1.00	-	1.00
6	-	-	-	0.15	0.15
7	5.00	-	-	-	5.00
8	-	10.00	0.39	-	10.39
9	5.00	10.00	0.39	-	15.39

Nota. La tabla presenta los flujos de materia del proceso de producción de biogás.**Tabla 56.***Flujos de materia del proceso de producción de biogás.*

Corrientes	Masa (Ton/día)					Total
	Lodos	CH4	CO2	NH3	DGA	
10	11.91	-	-	-	-	11.91
11	-	0.92	2.52	0.04	-	3.48
12	-	0.92	2.52	0.04	-	3.48
13	-	-	-	-	240	240.00
14	-	0.84	-	-	-	0.84
15	-	0.08	2.52	0.04	240.00	242.64
16	-	-	2.52	0.04	5.46	8.02
17	-	-	-	-	234.54	234.54

Nota. La tabla presenta los flujos de materia del proceso de producción de biogás.

El balance de materia del proceso se establece como la relación entre la entrada y la salida de materia del proceso, dado que en este no se acumula la materia, los flujos de entrada y salida deben ser idénticos, para esto, del proceso presentado en la Figura 37, se identifican 4 corrientes de entrada de materia y 6 corrientes de salida, la tabla 57 presenta el balance de masa del proceso, indicando los flujos de entrada y salida del proceso.

Tabla 57.*Balance de materia del proceso.*

Entrada de materia		Salida de materia	
Corriente	Masa (Ton/día)	Corriente	Masa (Ton/día)
1	5.15	5	1.00
2	1.00	6	0.15
8	10.39	10	11.91
13	240.00	14	0.84
		16	9.84
		17	232.80
Total	256.54	Total	256.54

Nota. La tabla presenta el balance de materia del proceso de producción de biogas.

3.9.2 Balance de energía proceso de digestion

Anteriormente se estableció una temperatura óptima para el proceso de digestión de 37°C, por tal motivo, se entiende que la temperatura interna de los digestores debe mantenerse a esta temperatura en todo momento, de esta forma, se garantiza una correcta digestión. Dado que la temperatura establecida es superior a la temperatura normal o ambiente, es necesario conocer la cantidad de energía requerida, para aumentar la temperatura de la mezcla en el digestor desde la temperatura ambiente hasta los 37°C. La siguiente expresión permite calcular la cantidad de energía para dicho aumento de temperatura:

$$Q = cp_{Mezcla} * m * \Delta T \quad (42)$$

Donde:

Q = Energía en forma de calor [KJ]

Cp_{Mezcla} = Capacidad calorífica de la mezcla de materia dentro del digestor [KJ/Kg * K]

m = Masa dentro del digestor [Kg]

ΔT = diferencia de temperaturas [K]

3.9.2.a. Masa dentro del digestor. Para los análisis a realizar, se presentan la carga inicial de materia prima para un solo digestor, dichos datos se encuentran contenidos en la tabla 58.

Tabla 58.

Carga inicial para un digestor.

Alimento	Ton	X
Cascara naranja	150	0.16
Excretas	300	0.32
Agua	475.13	0.51
Total	925.13	1.00

Nota. La tabla presenta la carga inicial de materia para un digestor.

3.9.2.b. Capacidad calorfica de la mezcla (Cp). Dentro de los digestores se encuentra una mezcla entre agua, cascara de naranja y excretas bovinas, aunque, durante y después de la digestión se pueden encontrar otras sustancias en esta mezcla, se decide realizar los cálculos de energía basados en la mezcla de la materia prima, esto entendiendo que, la digestión solo inicia después de elevar la temperatura de estos. Dado que en la literatura consultada no se encontró un Cp específico para la mezcla, se decide aproximar un Cp de la forma que:

$$Cp_{Promedio} = Cp_{Naranja} * X_{Naranja} + Cp_{Excretas} * X_{Excretas} + Cp_{H2O} * X_{H2O} \quad (43)$$

Los calores específicos se consultaron en la literatura, siendo para las cascara de naranja de 3.75 KJ / Kg K y para el agua de 4.18 KJ / Kg K [59], el cp promedio para las excretas bovinas es de 4.00 KJ / Kg K [60], la tabla 59 resume estos valores.

Tabla 59.

Calores Específicos.

Alimento	CP (KJ / Kg K)
Cascara naranja	3.75
Excretas	4.00
Agua	4.18

Nota. La tabla presenta los distintos cp para las materias primas del proceso.

Con los datos de la tabla 60 se puede encontrar un valor para el cp promedio de la mezcla de modo que:

$$Cp_{Promedio} = 4.01 \frac{KJ}{Kg K}$$

3.9.2.c. Calor requerido. Con los datos de las tablas 58 y 59 es posible dar solución al modelo de balance de energía antes planteado, de modo que para el aumento de temperatura de 20°C a 37°C para un solo digestor se requiere de 63,085,555 KJ, por tanto, para los tres digestores se requiere un total de 189,256,665 KJ.

3.10 Lodos de digestión

Como subproducto del proceso de digestión, se obtiene materia orgánica rica en minerales, conocida como lodos, estos se producen en gran medida, representando más del 70% de la masa final del proceso, por tanto, es un material de gran producción rico en elementos orgánicos, estas caracterizadas lo hacen un excelente abono orgánico.

La aplicación de este sustrato orgánico en el suelo permite mejorar la estructura de este, reduciendo problemas de compactación y susceptibilidad a la erosión [6], además, de aumentar la retención del agua, incrementar el intercambia gaseoso y servir como sustrato para las plantas.

Dado sus caracterizadas fisicoquímicas, estos lodos no representan una amenaza para el medioambiente, siendo de fácilmente digeridos por actividad microbiana aerobia, algunos de los usos más comunes de estos lodos son [6]:

- Biofertilizante
- Acondicionamiento de suelos
- Cubierta vegetal para rellenos sanitarios
- Biorremediación de suelos
- Mulch

Como se ve los lodos poseen una gran cantidad de aplicaciones relacionadas a la agricultura y el tratamiento de suelos, siendo un subproducto que puede ser comercializado de forma directa.

4. ANÁLISIS DE COSTOS INICIAL

En este capítulo se realizara un plan de inversión inicial para llevar a cabo un posible montaje de la planta de producción descrita en los capítulos anteriores: donde se tomaron distintos criterios para la estimación de un valor inicial, entre estos tenemos: costo de terreno, adquisición de equipos y reactivo necesario, gastos asociados (estos comprenderán en el costo de mano de obra referente a la instalación y adecuación para el montaje de los equipos necesarios), transporte de materia prima y servicios industriales. Todo esto se resumirá en una tabla, la cual indicará el valor total estimado para el montaje de la planta.

4.1 Ubicación

Para realizar este proyecto se tiene un espacio a usar de 2000 m², se toma esta área debido a que los equipos a utilizar son bastante robustos o en su defecto se deben utilizar más de uno para ciertas etapas del proyecto. Por motivos locativos, transporte y potenciales clientes o compradores para el producto, se determinó que un terreno ubicado en Ceuta, Cundinamarca. Este limita con municipios con una industrialización importante en todo el departamento de Cundinamarca como los son: Funza, Madrid, Mosquera y propiamente con Bogotá. Observando mediante la aplicación Google Maps [61].

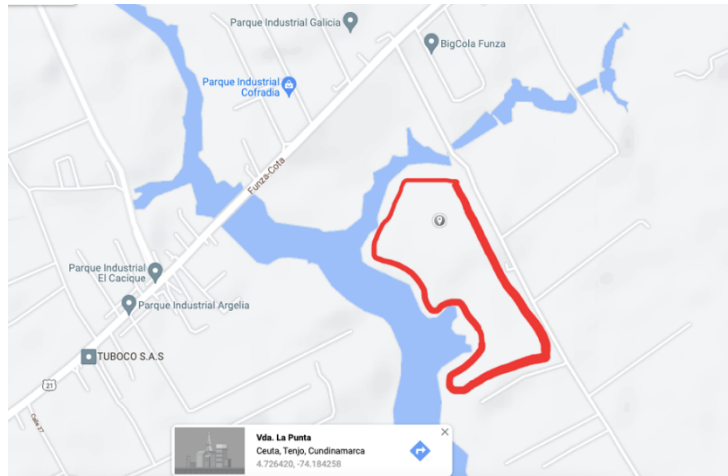
Esta área demarcada en la figura 43, comprendería el área necesaria para la realización de este proyecto. Se puede observar que se tendría potenciales compradores en la región, entre ellos tenemos: Big Cola, TUBOCO S.A.S (empresa productora de tubos en PVC) y parques industriales. Más alejadas encontramos empresas como Productos Alimenticios Doria, Harinas El Lobo, Purina S.A, entre otras. También es una zona favorable para el transporte y recolección de las excretas bovinas esto a que alrededor de la zona también hay fincas productoras de leche y por último se tendría un transporte de trayecto corto para la cáscara de naranja que proviene de Bogotá.

Para la realización del cálculo para la compra de este terreno se tuvo en cuenta un valor aproximado de \$1.300.000 por metro cuadrado (m²) [62], este valor se observa en un

artículo publicado en metro cuadrado, teniendo un valor total para el terreno de \$2.600.000.000.

Figura 43.

Localización Planta



Nota. La imagen muestra la ubicación propuesta para la planta de producción del biogás. Tomada de: Google, «Google maps,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.google.com.co/maps/@4.7260347,-74.1889479,15z/data=!5m1!1e4?hl=es-419>. [Último acceso: 27 10 2021].

4.2 Equipos y reactivo requeridos

4.2.1 Lavadora Industrial

Se utilizará el modelo ZD-XL 4500 de la compañía SHRIMP Machine, esta máquina proveniente de China, es una maquina en la cual tiene la capacidad de procesar o lavar un caudal de materia prima entre el rango de 2000 a 3000 Kg/h, para cumplir con la meta de procesamiento diario del proyecto se plantea el uso de 2 de estas máquinas, ya que se tendría que realizar el lavado a 5000 Kg de cáscaras de naranja.

Se tiene un precio estimado de U\$10.000 por maquina (valor obtenido de página web de venta de equipos industriales China, de máquina de características similares a la propuesta [63]) este valor correspondería a \$ 37.760.000, tomando en referencia el valor TRM de \$3.776. Teniendo un valor total para las dos máquinas de \$ 75.520.000.

4.2.2 Molino de cuchillas

Se plantea el uso de la Trituradora TT-160/200 H de la compañía JOVISA, S.L., maquina proveniente de España, la cual ofrece un caudal de molienda de 15 toneladas de materia orgánica por hora. Con lo mencionado anteriormente se realizaría uso de una sola unidad ya que proporciona un caudal adecuado para la producción diaria de cáscara de naranja.

El precio estimado de esta máquina es de U\$ 20.000 este valor es proporcionado por un sitio web de ventas (máquina de características similares a la propuesta) [64]. Este valor corresponde a \$75.520.000, considerando un valor TRM de \$3.776.

4.2.3 Unidad de pasteurización

Se sugiere el uso de la unidad de pasterización de gran capacidad, esto debido a las altas cantidades que se manejara de cáscaras de naranja (teniendo la primera instancia el tratamiento de 150 toneladas). El equipo es de origen chino del fabricante Mars, teniendo un valor comercial que se estima en U\$25.000 [65], considerando el valor TRM de \$3.776 este quipo tendría un costo de \$94.400.000. Este siendo un equipo de altas capacidades presentado un flujo entre 5 y 20 toneladas por hora. A continuación, se mostrará el equipo sugerido:

Figura 44.

Unidad de pasteurización



Nota. La figura muestra esta unidad de pasteurización como ejemplo. Tomada de: Mars, «Made in China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_marspacking/product_Plate-Type-Juice-Pasteurizer-HTST-3-_hreounnyy.html. [Último acceso: 30 Octubre 2021].

4.2.4 Digestor

Se requiere el uso de 3 digestores de 600 m³ para así cumplir con la meta de producción de biogás. El precio de estas máquinas dependerá según: su material de fabricación, tipo, tamaño, etc.

Estos digestores tienen un precio que oscila entre U\$20.000 y U\$150.000 [66], considerando el valor de TRM se estima el costo de los digestores entre \$75.520.000 y \$566.400.000. Para la realización del plan de inversión inicial se tomara un valor promedio, ya que, no se tiene el valor exacto del digestor para las características previamente descritas en el capítulo 3, siendo el valor promedio de \$320.960.000 por digestor, para los tres digestores planteados para el uso se tendrá un valor total de \$962.880.000.

Figura 45.

Modelo de digester [67]



Nota. La figura muestra un ejemplo de biodigestor usa como referencia para el precio del proceso. Tomada de: S. M. N. E. Technology, «sdmsenergy,» [En línea]. Available: <https://www.sdmsenergy.com/es/anaerobic-digester-plant-for-chicken-manure-treatment.html>. [Último acceso: 30 Octubre 2021].

4.2.5 Tanque de compensación

Por el número de digestores que se plantean para el proceso, así mismo se utilizarán 3 tanques de compensación los cuales tendrán una capacidad de 160 m³. El valor comercial está dado por varios factores como lo son: material de construcción, dimensiones (Volumen necesario), uso destinado, etc. Debido esto el valor comercial cambiara según las especificaciones que se deseen tener para los tanques.

Figura 46.

Tanque de compensación [68]



Nota. La Figura muestra un ejemplo de tanque de compensación. Tomada de: CLW, «Made in China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_cn-truck/product_Factory-Sales-100m3-120m3-150m3-200m3-LPG-Bullet-Tank-LPG-Storage-Tank_oyshyguug.html. [Último acceso: 30 Octubre 2021].

Teniendo en cuenta precio presentado, este puede variar de U\$7.200 hasta los U\$62.500 [68], realizando el respectivo cambio de moneda con valor TRM de \$3.776 el valor de cada uno de los tanque correspondería a un rango de \$27.187.200 a \$236.000.000. Para poder seleccionar un valor el cual pueda establecerse dentro del plan de inversión se realizaría un promedio los valores mencionados, el cual es \$131.593.600. El valor total de los 3 tanques necesarios es \$394.780.800.

4.2.6 Torre de adsorción

Esta torre contará con 6 platos, en la cual se realizará la purificación del biometano o biogás. Según el simulador Chemsep, este equipo teniendo en cuenta su base de datos tendría un costo comercial de U\$1.800, realizando el cambio de moneda considerando un valor TRM de \$3.776, este equipo tendría un valor de \$6.796.800.

4.2.7 Torre de recuperación DGA

De igual modo que la torre de adsorción, el valor comercial según lo reportado por el simulador Chemsep es de U\$1.600, este valor correspondería a \$6.041.600 considerando el valor TRM de \$3.776.

4.2.8 Compresor

Este equipo deberá tener una potencia 11,5 kW correspondientes a 15,42 HP se considera el uso de una de 16 HP para mayor comodidad en el momento de su compra.

Figura 47.

COMPRESOR LUBRICADO UT100 HP 16 DIESEL [69]



Nota. La figura muestra un ejemplo de compresor. Tomada de: S. compresores, «sfm compresores,» [En línea]. Available: <https://sfmcompresores.com/product/compresor-de-piston-lubricado-sfm-39-5-ut100-hp-16-diesel/>. [Último acceso: 31 Octubre 2021].

Teniendo un valor referencia de \$25.608.372 [70], este valor es tomado de un sitio web, el cual tiene características similares al presentado en la Figura 47.

4.2.9 Bomba

Este equipo requiere una potencia de 2 kW, correspondientes a 2,68 HP. Para facilidad de compra en el equipo se considera la compra de una bomba de 3 HP.

Figura 48.

Bomba industrial 3 HP 5IME0300 [71]



Nota. La figura muestra un ejemplo de bomba. Tomada de: EVANS, «EVANS Colombia,» [En línea]. Available: <https://www.evans.com.co/producto/bomba-industrial-3-hp-5ime0300-2/>. [Último acceso: 31 Octubre 2021].

Este equipo tendría un costo de \$2.158.388 [71]. Este valor tomado directamente del sitio web del fabricante.

4.2.10 Intercambiador de calor

Para el proceso de intercambio de calor del biogás, se plantea el uso de un intercambiador de tubo-coraza, esto debido a la gran baja en la temperatura que se debe realizar (enfriamiento en el biogás de 212,5 °C aproximadamente).

El valor comercial de este equipo es de U\$ 1.000 [72], considerando el valor TRM \$3.776, valor del equipo sería de \$3.776.000.

Figura 49.

Intercambiador de calor QLB325.1200.08-50K [73]



Nota. La figura muestra un ejemplo de intercambiador de calor. Tomada de: Qinglei, «Laucvz,» [En línea]. Available: <https://www.laucvz.pl/Mar/galvanized-steel-tube-shaping-and-winding-machine-manufacturer-in-mali.html>. [Último acceso: 31 Octubre 2021].

4.2.11 Tanque de almacenamiento de Biometano

El almacenamiento requiere de 4 tanques, esto asociado a la producción de biogás que, esperada, será plantea el uso de tanques de 100 m³ cada uno. El valor comercial está dado por varios factores como lo son: material de construcción, recubrimientos, dimensiones (Volumen necesario), etc. Debido esto el valor comercial cambiara según las especificaciones que se deseen tener para los tanques.

Teniendo en cuenta los factores presentados, este tiene un precio que puede varian entre U\$28.000 hasta U\$42.000 [74], realizando el respectivo cambio de moneda con valor TRM de \$3.776 el valor de cada uno de los tanque corresponderia a un rango de \$90.624000 a \$158.592.000. Para poder seleccionar un valor el cual pueda se establecer dentro del plan de inversion sera \$158.592.000 (este valor es un promedio del rango que se menciono anteriormente).

Figura 50.

Tanque de almacenamiento CLW [74]



Nota. La tabla muestra un ejemplo de tanque de almacenamiento para el biometano. Tomada de: CLW, «Made In China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_chenglitruck/product_100-M3-LPG-Storage-Tank-50mt-Propane-Tanker_ruonunuyg.html. [Último acceso: 31 Octubre 2021].

4.2.12 Costo de instalación

En la instalación de equipos de producción, se debe tener en cuenta el costo de instalación, el cual consiste en el pago a una mano de obra bien sea extranjera o nacional siempre y cuando sea calificada, en algunas ocasiones los proveedores o los fabricantes de los equipos se hacen responsables de este costo, para el caso de este proyecto no se cuenta con esa primicia o no se especifica ya no que no hubo comunicación directa con el proveedor y/o fabricante; en estos casos y cuando no existen valores disponibles estos de instalación se pueden estimar como el 20% del costo del equipo [75]. El valor asociado se representará en la tabla resumen del plan de inicial de inversión.

4.2.13 Diglicolamina (DGA)

Este reactivo de esencial uso para la purificación del biogás, se requiere el uso de 95 kmol, que corresponde a:

$$\text{Masa DGA (kg)} = 95 \text{ kmol DGA} * 105,14 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \text{ DGA} = 9.988,3 \text{ kg DGA} \quad (42)$$

El valor comercial de este reactivo se estima en U\$3,90 por kilogramo [76], realizando la estimación a 10.000 kilogramos del reactivo con un exceso del 25% previniendo alguna pérdida para un total de 15.000 kilogramos de DGA. Se tendría un valor de U\$48.750, considerando un valor de TRM de \$3.776 el costo para 15.000 kg de DGA sería de \$184.080.000.

4.3 Transporte materia prima

En este ítem se tendrá en cuenta lo correspondiente al transporte de la materia prima, esto en primer parte a que los sustratos a utilizar son netamente residuos orgánicos con un valor muy bajo o casi nulo en el mercado. El trayecto que se comprende para dicho transporte será de Bogotá hasta el municipio de Ceuta, Cundinamarca con un tiempo de recorrido de aproximadamente 2 horas.

En Bogotá se tomará como puntos de acopio para dichos residuos orgánicos, el relleno sanitario Doña Juana. Debido a que el ministerio de transporte expide las correspondientes tablas con valores del precio por tonelada transportada a grandes ciudades, se tomara como precio base la ciudad (de referencia) con menor distancia a Bogotá para así tener un valor estimado de transporte. El costo de transporte por tonelada para tracto camión, tendría un costo de \$20.045 entre el trayecto que comprende Bogotá – Villavicencio (ciudad de referencia para la estimación), esto según lo reportado por el ministerio de transporte [77].

Para el proyecto se prevé en primera instancia movilizar 450 toneladas de materia orgánica (150 toneladas de cáscara de naranja y 300 tonelada de excretas bovinas), teniendo así un valor total de transporte de \$9.020.250.

4.4 Servicio industrial

Para llevar a cabo el proceso se requiere el uso de agua la cual proviene de un servicio industrial de acueducto de Funza, Cundinamarca.

La carga necesaria de agua para el inicio del proceso es de 1.425 Toneladas, teniendo en cuenta el valor de densidad para el agua de 997 Kg/m³, teniendo así un volumen de

agua de 1.429,3 m³. Según la resolución EAAMF E.S.P No. 0149 del 3 de junio de 2021 [78], donde se muestran las tarifas para el servicio de acueducto. El valor comercial por metro cubico de acueducto se estima en \$4.541,88. El valor total del servicio de acueducto sería de \$6.491.709.

4.5 Plan de inversión inicial

La inversión inicial para llevar a cabo el proceso se presenta en la tabla 60, en dicha tabla podemos notar que el costo de inversión total para lo especificado a lo largo del documento sería de \$5.543.621.845, este valor se verá afectado al cambio constante del valor TRM.

Tabla 60.

Plan de inversión Inicial.

PLAN DE INVERSIONES			
Maquinaria y Reactivo	U	VALOR (U)	VALOR TOTAL
Lavadora industrial	2	37.760.000	75.520.000
Molino de cuchillas	1	75.520.000	75.520.000
Unidad de pasteurización	1	94.400.000	94.400.000
Digestor	3	320.960.000	962.880.000
Tanque de compensación	3	131.593.600	394.780.800
Torre de Adsorción	1	6.796.800	6.796.800
Torre de Recuperación	1	6.041.600	6.041.600
Compresor 11.5 KW	1	25.608.372	25.608.372
Bomba 2 KW	1	7.000.000	7.000.000
Intercambiador 1 12.25 KW	1	3.776.000	3.776.000
Tanque de almacenamiento Biometano	4	158.592.000	634.368.000
Diglicolamina (DGA) (kg)	12.500	14.726	184.080.000
Total, Maquinaria Y Reactivo			2.470.771.572
Transporte Materia Prima			
Carga pesada (Valor por tonelada)	450	20.045	9.020.250
Total, Transporte Materia Prima			9.020.250
Capital de trabajo			
Terreno (m ²)	2.000	1.300.000	2.600.000.000
Servicio Industrial - Acueducto (m ³)	1.429	4.542	6.491.709
Mano de obra instalación equipos	20%		457.338.314
Total, Capital de Trabajo			3.063.830.023
Total, Plan de Inversiones			5.543.621.845

5. CONCLUSIONES

Se calculó la relación que se debe tener entre las cáscaras y las excretas para aumentar los niveles de nitrógeno y permitir una correcta digestión, al final, se optó por las excretas de origen bovino, las cuales, deben estar en una relación de 2:1 con respecto a las cáscaras de naranja.

Mediante el estudio cinético del proceso para el sustrato se determinó, que este se favorece al extraer los aceites esenciales de la naranja, reduciendo el tiempo necesario para alcanzar la máxima producción del biogás.

Se determinó que el tiempo de retención hidráulica debe ser de 30 días con régimen de temperatura mesofílica, por último, se determinó la producción específica de metano para el proceso de digestión anaerobia de cáscaras de naranja y excretas bovinas de 1474.65 m³ al día, el proceso se lleva a cabo a una presión atmosférica y una temperatura que ronda entre los 35 a 42 °C.

Se planteó un proceso para tratar 5 toneladas diarias de cáscaras de naranja como sustrato, junto con 10 toneladas de excretas bovinas como cosustrato, para este proceso se determinó las distintas etapas involucradas; inicialmente se requiere realizar tratamientos previos a las materias primas, que consisten en lavado, triturado y extracción de los aceites esenciales presentes en las cáscaras de naranja por medio de arrastre con vapor, para las excretas se requiere una pasteurización previa a la digestión. Seguido a los pretratamientos se inicia el proceso de digestión anaerobia, para el cual, se definió el uso de tres (3) digestores de tipo chino con volumen igual a 600 m³, de los cuales, se obtienen el biogás crudo como producto principal y lodos que pueden ser usados como fertilizante, el biogás generado tiene una composición molar 50% en metano, este pasa a un proceso de purificación que tiene como objetivo eliminar las impurezas presentes, el proceso consiste en una adsorción con aminas (Diglicolamina) que permite alcanzar un biogás refinado rico en metano, con una composición molar mayor al 90%, esto permite al biogás ser utilizado como combustible en usos domésticos e industriales, presentándose como alternativa sostenible al uso de combustibles fósiles.

Para la realización de este proyecto se debe contar con \$5.543.621.845, esto debido a los altos costos comerciales de los equipos que se requieren para llevar a cabo el proceso para la producción de biogás y así mismo por su costo de instalación. Se estableció como una potencial ubicación el municipio de Ceuta, Cundinamarca, esto debido, a que es una zona altamente industrial; con un área para la estructuración de la planta que se determinó en 2000 m²

BIBLIOGRAFIA

- [1] Instituto Nacional Agropecuario, «ICA,» 2018 Febrero 8. [En línea]. [Último acceso: 2021 Agosto 20].
- [2] T. L. Alvarado Dávila y A. T. Hernán, «Revisión de alternativas sostenibles para el aprovechamiento del orujo de naranja,» *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales* , vol. 5, nº 2, p. 9–32, 2018.
- [3] Alcaldía Mayor de Bogotá, «Especiales UASP relleno sanitario Doña juana,» [En línea]. Available: <https://www.uaesp.gov.co/especiales/relleno/>. [Último acceso: 5 11 2021].
- [4] Subdirección de Aprovechamiento , «AVANCES DEL ACUERDO 344 DE 2008 “POR EL CUAL SE DISPONE DISEÑA Y EJECUTA UN PROGRAMA PARA LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES”,» Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, Bogotá D.C, 2019.
- [5] L. E. Bernal Patiño y L. S. Suárez ramírez, «Diseño conceptual de un biodigestor partiendo de estiércol vacuno y avícola, producido en la finca el guarumal, para la obtención de biogás,» Fundación universidad de américa, Bogotá D.C., 2018.
- [6] M. T. Varnero Moreno, «MANUAL DE BIOGÁS,» “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”., Santiago de Chile, 2011.
- [7] D. Deublein y A. Steinhauser, *Biogas from waste and renewable resources.*, Wiley –VCH, 2008.
- [8] M. A. Forero Carrasco y A. C. Sánchez Quevedo, *Desarrollo de la ingeniería conceptual del proceso de producción de biogás mediante los residuos orgánicos provenientes de la plaza distrital de mercado siete de agosto*, Bogotá D.C: Fundación Universidad de América, 2017.
- [9] R. A. Parra Huertas, «Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria,» *Producción + Limpia*, vol. 10, pp. 142-159, 2015.
- [10] K. F. Adekunle y J. A. Okolie, «A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion,» *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6, 205-212, vol. 6, pp. 205-212, 2015.

- [11] B. S. Moraes , M. Zaiat y A. Bonomi , «Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 888-903, 2015.
- [12] L. C. Corrales, D. M. Antolínez Romero, M. Bohórquez , A. Johanna y A. M. Corredor Vargas, «Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta,» *Nova*, vol. 13, pp. 55-81, 2015.
- [13] N. L. Gajardo Alarcón, Estudio de la producción de biogás en función de la temperatura, en un biodigestor tipo chino, Santiago, Chile: Universidad de Chile, 2013.
- [14] M. C. Canales García, L. A. Rivas Oliva y R. J. Sorto Cruz, Estudio del proceso bioquímico de fermentación en digestores para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos orgánicos provenientes del campus de la universidad de El Salvador, Ciudad Universitaria: Universidad de El Salvador, 2010.
- [15] J. A. Hilbert, «INTA - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria,» [En línea]. Available: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf. [Último acceso: 30 09 2021].
- [16] I. Corona Zuñiga, «Repositorio Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,» 2007. [En línea]. Available: <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10722/Biodigestores.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 13 Octubre 2021].
- [17] Moreiras y col, «NARANJA,» de *Frutas*, 2013, p. 270 .
- [18] A. K. Tovar Arce, VALORIZACIÓN INTEGRAL DE CÁSCARAS DE NARANJA MEDIANTE EXTRACCIÓN DE PECTINA Y ELABORACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO, Santiago de Querétaro: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA, S.C., 2017.
- [19] D. C. Martínez Hernández y D. M. Yase, «Utilización de pre-tratamientos básicos y específicos para la producción de biogás. Revisión y análisis,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 25, n° 3, pp. 81-92, 2016.
- [20] K. J. Escarraga parra y n. Espinosa gonzalez , evaluación de la obtención de biogás mediante la digestión anaerobia de los residuos de fruta generados por una empresa de alimentos a escala laboratorio, Bogotá d.c: fundación universidad de América, 2019.
- [21] E. A. Reyes Aguilera y E. Pérez Castellón, «Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y

- gallinaza para la generación de biogás,» *Medio ambiente tecnología y desarrollo humano*, vol. 31, nº 8, 2019.
- [22] F. Valladares Carnero , Modelamiento del proceso de digestión anaeróbica de estiércol y cáscara de cacao, Piura, Peru: Universidad de Piura, 2017.
- [23] R. I. Rodriguez Pimentel y A. Hernandez Reyes, «Efecto de diferentes tipos de estiércol en la codigestión de residuos cítricos,» *Revista de Investigación y Desarrollo* , vol. 4, nº 14, pp. 29-35, 2018.
- [24] N. B. Monsalve, «Con cáscaras de naranja, quieren mejorar la industria y el ambiente colombiano,» *La Opinión*, Viernes, 11 Marzo 2016.
- [25] E. Rosas Moreno, Siete Naranja, Aprovechamiento de la cáscara, Bogotá D.C: Universidad El Bosque, 2019.
- [26] Asociación interamericano de ingeniera sanitaria ambiental, Séptimo congreso interamericano de residuos solidos, Cuenca, Ecuador, 2017.
- [27] J. C. Solarte Toro, J. P. Mariscal Moreno y B. H. Aristizábal Zuluaga, «Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio,» *Revista ION*, vol. 30, nº 1, pp. 105-116, 2017.
- [28] C. A. de Lemos Chernicharo, *Anaerobic Reactors Biological Wastewater Treatment*, Londres: IWA Publishing, 2007.
- [29] R. F. Sancho Mamani, Ajuste de modelos matemáticos de crecimiento de bacterias lácticas en queso tipo paria en condiciones isotérmicas y no isotérmicas, Puno, Peru: Universidad nacional del altiplano, 2015.
- [30] J. Monod , «The Growth of Bacterial Cultures,» *Annual Reviews of Microbiology*, pp. 371-394, 1949.
- [31] V. Manuel Trejos, J. Fontalvo Alzate y M. A. Gómez Garcia, «Descripción matemática y análisis de estabilidad de procesos fermentativos,» *DYNA*, vol. 76, nº 158, pp. 111-121, 2009.
- [32] H.M. Lo , T.A. Kurniawan , M.E.T. Sillanpää, T.Y. Pai , C.F. Chiang , K.P. Chao , M.H. Liu , S.H. Chuang, C.J. Banks, S.C. Wang , K.C. Lin, C.Y. Lin, W.F. Liu, P.H. Cheng, C.K. Chen, H.Y. Chiu y H.Y. Wu , «modeling biogas production from organic fraction of msw co-digested with mswi ashes in anaerobic bioreactors,» *Bioresource Technology*, vol. 101, p. 6329–6335, 2010.

- [33] G. De Gioannis, A. Muntoni, G. Cappai y S. Milia, «Landfill gas generation after mechanical biological treatment of municipal solid waste. estimation of gas generation rate constants,» *Waste Management*, vol. 29, p. 1026–103, 2009.
- [34] Chenlin Li y Herbert H.P. Fang, «Inhibition of heavy metals on fermentative hydrogen production by granular sludge,» *Chemosphere*, vol. 67, n° 4, pp. 668-673, 2007.
- [35] A. Echeverri Arias , Determinación del potencial de producción de biogás y bioetanol del residuo de naranja, Bogota: Universidad de los Andes, 2019.
- [36] Yeqing Li, Ruihong Zhang, Chang Chen, Guangqing Liu, Yanfeng He y Xiaoying Liu, «Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions,» *Bioresource Technology*, vol. 149, pp. 406-412, 2013.
- [37] G. Don W y P. Robert H, Manual del ingeniero químico 8TH Edicion, McGraw-Hill, 2007.
- [38] M. L. Pinzon Bedoya y A. M. Cardona Tamayo, «Caracterizacion de la cascara de naranja para su uso como material bioadsorbente,» *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Basicas*, vol. 6, n° 1, pp. 1-23, 2008.
- [39] M. NOWICKI, «NOWICKI,» [En línea]. Available: <https://metalbud.com/es/productos/carne/lavadoras/lavadora-industrial-a-doble-linea-de-contenedores-tipo-mp-3000>. [Último acceso: 27 09 2021].
- [40] S. Machine, «SHRIMP Machine,» [En línea]. Available: <https://www.shrimpmachine.com/washing-machine-raw-shrimp-fish/>. [Último acceso: 27 09 2021].
- [41] Y. Garcia Lopez, «Utilización de pre-tratamientos basicos y especificos para la producción de biogás. Revisión y análisis,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 25, n° 3, pp. 81-92, 2016.
- [42] VEYCO, «VEYCO Molinos y Mezcladoras,» [En línea]. Available: <https://molinosymezcladoras.com.mx/molinos-de-cuchillas.html#prettyPhoto>. [Último acceso: 27 09 2021].
- [43] JOVISA, «JOVISA,S.L. Maquinaria E Hidraulica,» [En línea]. Available: <http://jovisa.eu/destruccion-confidencial/>. [Último acceso: 27 09 2021].
- [44] E. Rothstein Gutierrez y J. C. Roldan Villegas, «Factibilidad del proyecto de extraccion de aceites esenciales de la naranja en Antioquia,» *Revista Soluciones de Postgrado EIA*, n° 5, pp. 119-133, 2010.

- [45] I. Ceron Salazar y C. Cardona Alzate, «Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cascara de naranja,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 7, nº 13, p. 65–86, 2011.
- [46] API-ASME, *Diseño y Construcción de Tanques*, API-ASME, 2003.
- [47] R. Sosa, Y. M. Díaz, Tamara Cruz y J.L. de la F, «Diversification and overviews of anaerobic digestion of Cuban pig breeding,» *Cuban Journal of Agricultural Science*, vol. 48, nº 1, pp. 67-72, 2014.
- [48] J. D. H. S. D. T. H. K. H. v. L. Charles Nzila, «Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya,» *Applied Energy*, vol. 93, pp. 496-506, 2012.
- [49] J. A. GUARDADO CHACÓN, *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*, Habana, Cuba: CUBASOLAR, 2007.
- [50] E. L. Barrera-Cardoso, L. Odales Bernal, A. Carabeo Pérez, Y. Alba Reyes y F. O. Hermida García, «Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural,» *Tecnología Química*, vol. 40, nº 2, pp. 303-321, 2020.
- [51] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Comisión de Regulación*, CREG, 2009.
- [52] Vanti, «Composición típica del gas natural,» [En línea]. Available: <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/que-es/>. [Último acceso: 2021 10 26].
- [53] C. Zimmermann, «Purificación de biogás Básicos, tecnologías, ejemplos,» *Congreso Latinoamericano BioRefinerías*, Concepción, 2017.
- [54] S. V. C.E. Londoño, *Evaluación del efecto de diferentes formulaciones de aminas sobre el desempeño de una planta de endulzamiento*, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2015.
- [55] J. Souza y L. Schaeffer(, «Sistema de Compresión de Biogás y Biometano,» *Información Tecnológica*, vol. 24, nº 6, pp. 3-8, 2013.
- [56] Vanti, «Construcción de la Instalación,» Vanti, [En línea]. Available: <https://www.grupovanti.com/conocenos/el-gas-natural/proceso-de-instalacion/construccion-de-la-instalacion/>. [Último acceso: 28 10 2021].
- [57] Ministerio de Minas y Energía, *Resolucion número40278 de 2017*, Bogota, 2017.

- [58] Chengli Special Automobile Co., Ltd, «Chengli Special Automobile Co., Ltd,» [En línea]. Available: <https://www.chenglispecialautomobile.com/>. [Último acceso: 28 10 2021].
- [59] Y. A. Çengel y M. A. Boles, TERMODINAMICA 7a. ed., MEXICO: MCGRAW-HILL. , 2012.
- [60] A. M. García Rodríguez y J. D. Gómez Franco , Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de bogotá mediante digestión anaerobia, Bogota D.C: fundación universidad de america, 2016.
- [61] Google, «Google maps,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.google.com.co/maps/@4.7260347,-74.1889479,15z/data=!5m1!1e4?hl=es-419>. [Último acceso: 27 10 2021].
- [62] M. Cuadrado, «metrocuadrado.com,» 28 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.metrocuadrado.com/noticias/guia-de-compra-y-venta/parques-industriales-y-bodegas-un-mercado-en-crecimiento-3673/>. [Último acceso: 27 Octubre 2021].
- [63] M. I. China, «Made in China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_guanfeng/product_2000kg-Industrial-Bubble-Washing-Machine-Washer-for-Cleaning-Food-Process_eryhnigoy.html. [Último acceso: 30 10 2021].
- [64] Alibaba, «Alibaba.com,» [En línea]. Available: https://spanish.alibaba.com/product-detail/pulverizer-wood-crusher-tree-stump-grinder-tree-root-crusher-wholesale-wood-crusher-making-sawdust-grinding-62467020383.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.25af54a2AasKLk&s=p. [Último acceso: 30 10 2021].
- [65] Mars, «Made in China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_marspacking/product_Plate-Type-Juice-Pasteurizer-HTST-3-_hreounnyy.html. [Último acceso: 30 Octubre 2021].
- [66] L. Shandong Mingshuo New Energy Technology Co., «Made In China,» [En línea]. Available: <https://mingshuo.en.made-in-china.com/product/pSaJOgYTRHrA/China-Integrated-Double-Membrane-Biogas-Digester-for-Kitchen-Waste-Treatment.html>. [Último acceso: Octubre 30 2021].

- [67] S. M. N. E. Technology, «sdmsenergy,» [En línea]. Available: <https://www.sdmsenergy.com/es/anaerobic-digester-plant-for-chicken-manure-treatment.html>. [Último acceso: 30 Octubre 2021].
- [68] CLW, «Made in China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_cn-truck/product_Factory-Sales-100m3-120m3-150m3-200m3-LPG-Bullet-Tank-LPG-Storage-Tank_oyshyguug.html. [Último acceso: 30 Octubre 2021].
- [69] S. compresores, «sfm compresores,» [En línea]. Available: <https://sfmcompresores.com/product/compresor-de-piston-lubricado-sfm-39-5-ut100-hp-16-diesel/>. [Último acceso: 31 Octubre 2021].
- [70] EVANS, «EVANS Colombia,» [En línea]. Available: <https://www.evans.com.co/producto/compresor-tornillo-15-hp-220v-ct430me1500/>. [Último acceso: 31 Octubre 2021].
- [71] EVANS, «EVANS Colombia,» [En línea]. Available: <https://www.evans.com.co/producto/bomba-industrial-3-hp-5ime0300-2/>. [Último acceso: 31 Octubre 2021].
- [72] Qinglei, «Made In China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_qlkj2012/product_Industrial-Stainless-Steel-Spiral-Shell-and-Tube-Heat-Exchanger-for-Water-Liquid-Oil-Cooler-Heater-Reboiler-Evaporator-Condenser_uosunsuesy.html. [Último acceso: 31 Octubre 2021].
- [73] Qinglei, «Laucvz,» [En línea]. Available: <https://www.laucvz.pl/Mar/galvanized-steel-tube-shaping-and-winding-machine-manufacturer-in-mali.html>. [Último acceso: 31 Octubre 2021].
- [74] CLW, «Made In China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_chenglitruck/product_100-M3-LPG-Storage-Tank-50mt-Propane-Tanker_ruonunuyg.html. [Último acceso: 31 Octubre 2021].
- [75] T. 10845, «Tesis USON MEXICO,» [En línea]. Available: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/18045/Capitulo3.pdf>. [Último acceso: 4 Diciembre 2021].
- [76] L. Shandong Richnow Chemical Co., «Alibaba.com,» [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-quality-diglycolamine-2-2-aminoethoxy-ethanol-cas-number-929-06-6-1600280013617.html>. [Último acceso: 31 Octubre 2021].

- [77] M. d. transporte, «Mintransporte,» [En línea]. Available: <https://mintransporte.gov.co/descargar.php?id=1143>. [Último acceso: 1 Noviembre 2021].
- [78] a. y. a. d. F. Empresa municipal de acueducto, «EAAMF E.S.P,» 2021. [En línea]. Available: https://www.emaafesp.gov.co/images/RAesoluci%C3%B3n_149_del_3_Junio_de_2021_Tarifas.pdf. [Último acceso: 1 Noviembre 2021].
- [79] J. Siles, F. Vargas, M. Gutiérrez y A. Chica, «Integral valorisation of waste orange peel using combustion, biomethanisation,» *Bioresource*, 2016.
- [80] A. Diaz, «REPOSITORIO INSTITUCIONAL INTEMA UNMDP,» 2019. [En línea]. Available: <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/123456789/345/ADiaz-TFG-IQ-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 19 03 2021].
- [81] INOXPA, «INOXPA SOURCE OF SOLUTIONS,» [En línea]. Available: https://www.inoxpa.co/uploads/document/Fitxa%20tecnica/Equips/Pasteuritzador/FTsolHTST.2_ES.pdf. [Último acceso: 27 09 2021].

ANEXOS

ANEXO 1.

RELACIÓN CARBONO – NITRÓGENO

Se calculó la masa necesaria de distintos cosustratos para lograr una relación Carbono – Nitrógeno igual a 30 a 1, en mezcla con 100 Kg de sustrato, para esto se usó la información aportada por la tabla 10 y la ecuación número 1.

$$K = \frac{C_1 Q_1 + C_2 Q_2 + \dots C_n Q_n}{N_1 Q_1 + N_2 Q_2 + \dots N_n Q_n} \quad (1)$$

Donde:

K: C/N de la mezcla de sustratos.

C: % de carbono contenido en el sustrato

N: % de nitrógeno contenido en el sustrato

Q: Peso fresco del sustrato.

Con K iguala 30, C₁ igual a 0.44, N₁ igual a 0.008 y Q₁ a 100 Kg, obteniendo la siguiente expresión:

$$30 = \frac{(0.44 * 100 \text{ Kg}) + C_2 Q_2}{(0.008 * 100 \text{ Kg}) + N_2 Q_2}$$

Los valores de C₂ y N₂ corresponden a composición de carbono y nitrógeno respectiva a cada excreta, siendo Q₂ la variable de interés, a continuación, se presenta el cálculo de carbono nitrógeno para los distintos tipos de excreta animal.

Excretas Bovinas:

$$30 = \frac{(0.44 * 100 \text{ Kg}) + (0.3 * Q_2)}{(0.008 * 100 \text{ Kg}) + (0.013 * Q_2)}$$

Excretas Porcinas:

$$30 = \frac{(0.44 * 100 \text{ Kg}) + (0.25 * Q_2)}{(0.008 * 100 \text{ Kg}) + (0.015 * Q_2)}$$

Excretas de Conejo:

$$30 = \frac{(0.44 * 100 \text{ Kg}) + (0.35 * Q_2)}{(0.008 * 100 \text{ Kg}) + (0.015 * Q_2)}$$

Excretas de Gallina:

$$30 = \frac{(0.44 * 100 \text{ Kg}) + (0.35 * Q_2)}{(0.008 * 100 \text{ Kg}) + (0.015 * Q_2)}$$

Excretas Humanas:

$$30 = \frac{(0.44 * 100 \text{ Kg}) + (0.025 * Q_2)}{(0.008 * 100 \text{ Kg}) + (0.0085 * Q_2)}$$

Para encontrar el valor de Q_2 se recurrió a la herramienta solver del software Excel para dar valor a esta variable, los resultados obtenidos se reportaron en la tabla 11.

ANEXO 2.

RELACIÓN COSUSTRATO – SUSTRATO

Al calcular la masa necesaria de distintos cosustratos para lograr una relación Carbono – Nitrógeno igual a 30, en una mezcla con 100 Kg de sustrato, se calculó la relación de masa que existe entre estos, para esta forma calcular la cantidad de cosustrato necesario para cualquier masa de sustrato.

Para este cálculo se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{Masa_{Cosustrato}}{Masa_{Sustrato}} \quad (43)$$

Donde R será la relación de masas entre la masa del cosustrato y la masa del sustrato, usando los valores de masa para cosustrato de la 11 se realizó el cálculo para cada excreta, simplificando el valor obtenido al entero más cercano.

Excretas Bovinas:

$$R = \frac{222.21 \text{ Kg}}{100 \text{ Kg}}$$

$$R = 2.22$$

$$R_{Simplificado} = 2$$

Excretas Porcinas:

$$R = \frac{100 \text{ Kg}}{100 \text{ Kg}}$$

$$R = 1$$

Excretas de Conejo y Gallina:

$$R = \frac{199.97 \text{ Kg}}{100 \text{ Kg}}$$

$$R = 1.99$$

$$R_{Simplificado} = 2$$

Excretas Humanas:

$$R = \frac{86.96 \text{ Kg}}{100 \text{ Kg}}$$

$$R = 0.86$$

$$R_{\text{Simplificado}} = 1$$

ANEXO 3.

COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA MEZCLA SUSTRATO – COSUSTRATO

Para calcular la composición elemental de la mezcla, se tomó como base de cálculo una masa de sustrato de 35 toneladas acompañada de 70 toneladas de excretas bovinas, para un total de 105 toneladas.

Usando los porcentajes en peso por elemento reportadas en la tabla 13, se calculó la masa de cada elemento para el sustrato y cosustrato de la siguiente forma:

$$Masa_X = Masa_{Sustancia} * Composición_X \quad (44)$$

Cáscaras de naranja

$$Masa_{Carbono} = 35 \text{ Ton} * 0.4433 = 15.52 \text{ Ton}$$

$$Masa_{Hidrogeno} = 35 \text{ Ton} * 0.059 = 2.07 \text{ Ton}$$

$$Masa_{oxigeno} = 35 \text{ Ton} * 0.4466 = 16.22 \text{ Ton}$$

$$Masa_{Nitrogeno} = 35 \text{ Ton} * 0.27 = 0.27 \text{ Ton}$$

Excretas bovinas

$$Masa_{Carbono} = 70 \text{ Ton} * 0.3 = 21.00 \text{ Ton}$$

$$Masa_{Hidrogeno} = 70 \text{ Ton} * 0.05 = 3.50 \text{ Ton}$$

$$Masa_{oxigeno} = 70 \text{ Ton} * 0.2884 = 20.19 \text{ Ton}$$

$$Masa_{Nitrogeno} = 70 \text{ Ton} * 0.013 = 0.91 \text{ Ton}$$

Calculo la masa de cada elemento de las cáscaras de naranja se sumó con su par de las excretas bovinas, de esta forma se encontró la masa de cada elemento para la mezcla entre sustrato y cosustrato.

De modo que:

$$Masa_{X \text{ Mezcla}} = Masa_{X \text{ Naranja}} + Masa_{X \text{ Excretas}} \quad (45)$$

Obteniendo:

$$Masa_{Carbono\ Mezcla} = 36.52\ Ton$$

$$Masa_{Hidrogeno\ Mezcla} = 5.57\ Ton$$

$$Masa_{oxigeno\ Mezcla} = 36.40\ Ton$$

$$Masa_{Nitrogeno\ Mezcla} = 1.18\ Ton$$

Por último, se calculó el porcentaje en peso de cada elemento en la mezcla de cáscara de naranja y excretas bovinas, con la siguiente expresión:

$$\%X_{Mezcla} = \frac{Masa_{X\ Mezcla}}{75\ Ton} * 100\ \% \quad (46)$$

Obteniendo los valores reportados en la tabla 14:

$$\%Carbono_{Mezcla} = 34.78\ \%$$

$$\%Hidrogeno_{Mezcla} = 5.30\ \%$$

$$\%Oxigeno_{Mezcla} = 34.67\ \%$$

$$\%Nitrogeno_{Mezcla} = 1.12\ \%$$

ANEXO 4.

COEFICIENTES DEL MODELO DE BOYLE

Para calcular los coeficientes de Boyle se hizo uso de la siguiente expresión [20]:

$$\text{Coeficiente}_{a,b,c,d} = \frac{\text{Masa} \times \text{Mezcla}}{\text{PM}_x * 2} \quad (47)$$

Los pesos moleculares para cada uno de los elementos involucrados se presentan a continuación:

Elemento	PM
C	12
H	1
O	16
N	14

Se calcularon los valores de los coeficientes de Boyle para cada elemento:

$$\text{Coeficiente}_a = 1.52$$

$$\text{Coeficiente}_b = 2.78$$

$$\text{Coeficiente}_c = 1.14$$

$$\text{Coeficiente}_d = 0.04$$

Por último, se dividió el valor de todos los coeficientes entre el valor del coeficiente a, operación que no afecta la relación matemática que existe entre los coeficientes, estos valores fueron registrados en la tabla 16.

$$\text{Coeficiente}_a = 1.00$$

$$\text{Coeficiente}_b = 1.83$$

$$\text{Coeficiente}_c = 0.75$$

$$\text{Coeficiente}_d = 0.03$$

ANEXO 5.

RENDIMIENTO TEÓRICO DE BIOGÁS Y METANO

Para el cálculo de los rendimientos teóricos se usaron las ecuaciones 8 y 9 junto con los coeficientes de Boyle para mezcla de sustrato y cosustrato.

$$RTB \left[\frac{m^3}{Kg_{sustrato}} \right] = \frac{22.415 a}{12 a + b + 16 c + 14 d} \quad (8)$$

$$RTM \left[\frac{m^3}{Kg_{sustrato}} \right] = \frac{\left(\frac{4 a + b - 2c - 3d}{8} \right) * 22.415}{12 a + b + 16 c + 14 d} \quad (9)$$

Al reemplazar:

Rendimiento teórico de biogás:

$$RTB \left[\frac{m^3}{Kg_{sustrato}} \right] = \frac{22.415}{12 + 1.83 + (16 * 0.75) + (14 + 0.03)}$$

Rendimiento teórico de metano

$$RTM \left[\frac{m^3}{Kg_{sustrato}} \right] = \frac{\left(\frac{4 + 1.83 - (2 * 0.75) - (3 * 0.75)}{8} \right) * 22.415}{12 + 1.83 + (16 * 0.75) + (14 + 0.03)}$$

Los valores de RTB y RTM fueron reportados en la tabla 17.

ANEXO 6.

MODELO DE CRECIMIENTO DE GOMPERTZ

El modelo de crecimiento se calculó gracias a la ecuación 23 y los datos de la tabla 19.

$$y = A \exp \left(- \exp \left[\frac{\mu e}{A} (\lambda - t) \right] + 1 \right) \quad (23)$$

Al reemplazar los datos de la tabla 19 con un tiempo de retención de 30 días, se encontraron los siguientes valores:

Días	y Cáscaras	y sin aceite	sin pectina	aceite pe
0	18.77557584	17.23739472	18.39152547	17.43205943
1	95.38848998	70.27825444	75.07346002	79.14203533
2	183.359327	138.5520813	147.9996277	154.7968338
3	238.4553994	192.3067039	205.3542389	208.4277396
4	265.0223801	225.3009777	240.5154288	237.8169821
5	276.5200809	243.2078491	259.5761372	252.1421142
6	281.2821065	252.3596021	269.3070204	258.7673358
7	283.219706	256.9023427	274.1323034	261.7605531
8	284.0024713	259.1256329	276.4915705	263.0988711
9	284.3177903	260.2063384	277.6372851	263.6944997
10	284.4446624	260.7299204	278.1918458	263.9590465
11	284.4956871	260.983182	278.4598447	264.0764376
12	284.516204	261.1055927	278.5892597	264.1285082
13	284.5244533	261.1647362	278.6517304	264.1516008
14	284.5277699	261.1933067	278.6818805	264.1618412
15	284.5291034	261.2071071	278.6964306	264.1663822
16	284.5296395	261.2137728	278.703452	264.1683958
17	284.5298551	261.2169923	278.7068403	264.1692886
18	284.5299417	261.2185473	278.7084753	264.1696846
19	284.5299766	261.2192984	278.7092642	264.1698601
20	284.5299906	261.2196611	278.709645	264.169938
21	284.5299962	261.2198363	278.7098287	264.1699725
22	284.5299985	261.2199209	278.7099173	264.1699878
23	284.5299994	261.2199618	278.7099601	264.1699946
24	284.5299998	261.2199816	278.7099807	264.1699976
25	284.5299999	261.2199911	278.7099907	264.1699989
26	284.53	261.2199957	278.7099955	264.1699995
27	284.53	261.2199979	278.7099978	264.1699998

28	284.53	261.219999	278.709999	264.1699999
29	284.53	261.2199995	278.7099995	264.17
30	284.53	261.2199998	278.7099998	264.17

Se procedió a graficar los crecimientos para cada tipo de sustrato, estas graficas corresponden a las gráficas 1, 2, 3, 4 del documento.

ANEXO 7.

RENDIMIENTO ESPECÍFICO DE METANO PARA LAS EXCRETAS BOVINAS

El rendimiento específico de metano se calculó mediante la ecuación 24, para dar solución a la ecuación antes mencionada fue necesario calcular los coeficientes de Boyle para las excretas bovinas.

$$REM = \frac{22.4 * 1000 * \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8}\right)}{12a + b + 16c + 14d} \quad (24)$$

Los coeficientes de Boyle fueron calculados de la misma forma que en el anexo D, haciendo uso de la masa por elemento para las excretas bovinas reportadas en la tabla 14.

$$Coeficiente_{a,b,c,d} = \frac{Masa_{X\ Excretas}}{PM_X * 2} \quad (48)$$

Los valores de los coeficientes de Boyle para las excretas bovinas fueron reportados en la tabla 21, al reemplazar en la ecuación 24 se obtiene:

$$REM = \frac{22.4 * 1000 * \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{8} - \frac{0.72}{4} - \frac{(3 * 0.03)}{8}\right)}{12 + 2 + (16 * 0.72) + (14 * 0.03)}$$
$$REM = 477.83 \frac{L}{Kg\ SV}$$

ANEXO 8.

Se presenta la relación entre el DGA alimentado al proceso y la composición de metano en el biogás refinado.

Mole flow DGA kmol / h	Mole fraction Methane
10	0.523835105
10.9	0.527712721
11.8	0.531580325
12.7	0.535447978
13.6	0.539320894
14.5	0.543201289
15.4	0.547089962
16.3	0.550987434
17.2	0.554894671
18.1	0.558813434
19	0.56274636
19.9	0.566696861
20.8	0.57066893
21.7	0.574666922
22.6	0.578695345
23.5	0.582758702
24.4	0.586861365
25.3	0.591007506
26.2	0.595201055
27.1	0.599445693
28	0.603744856
28.9	0.608101756
29.8	0.612519404
30.7	0.617000636
31.6	0.621548141
32.5	0.626164488
33.4	0.630852144
34.3	0.635613498
35.2	0.640450875
36.1	0.645366553
37	0.650362768
37.9	0.655441733
38.8	0.660605634
39.7	0.665856639

40.6	0.671196897
41.5	0.676628544
42.4	0.682153691
43.3	0.687774425
44.2	0.693492801
45.1	0.699310831
46	0.70523047
46.9	0.711253601
47.8	0.717382016
48.7	0.723617386
49.6	0.729961238
50.5	0.736414913
51.4	0.742979528
52.3	0.74965592
53.2	0.756444587
54.1	0.763345617
55	0.770358594
55.9	0.777482505
56.8	0.784715611
57.7	0.792055308
58.6	0.799497958
59.5	0.807038694
60.4	0.814671193
61.3	0.822387414
62.2	0.830177315
63.1	0.83802851
64	0.845925944
64.9	0.853851502
65.8	0.861783691
66.7	0.869697295
67.6	0.877563211
68.5	0.885348373
69.4	0.893015967
70.3	0.900525998
71.2	0.907836239
72.1	0.914903651
73	0.921686262
73.9	0.9281453
74.8	0.934247435
75.7	0.939966778
76.6	0.94528632
77.5	0.950198631
78.4	0.95470564

79.3	0.958817709
80.2	0.962552035
81.1	0.965930906
82	0.968979823
82.9	0.971725904
83.8	0.974197741
84.7	0.976417906
85.6	0.978416291
86.5	0.980214641
87.4	0.981834426
88.3	0.983295064
89.2	0.984613974
90.1	0.985806686
91	0.986886983
91.9	0.987867068
92.8	0.988757725
93.7	0.989568471
94.6	0.990313857
95.5	0.990992049
96.4	0.991600479
97.3	0.992166358
98.2	0.992685634
99.1	0.993162856
100	0.993602069

ANEXO 9.

RECOMENDACIONES

En el desarrollo de este trabajo se contempló la idea de suministrar el biogás a líneas de transporte de gas natural, aunque en la actualidad no existe una regulación para este proceso, se recomienda realizar estudios sobre el tema, para determinar su factibilidad, dado que esto permitiría extender el uso del biogás.

Para realizar los análisis cinéticos del proceso se contó con datos experimentales encontrados en la literatura consultada, se recomienda contrastar los datos teóricos obtenidos en esta tesis con datos experimentales de la biodigestión descrita.

Dentro del trabajo se estudió un proceso de digestión anaerobia de cáscaras de naranja con excretas bovinas como agente corrector de la relación carbono nitrógeno, se recomienda indagar sobre el uso de cosustratos distintos a las excretas bovinas y el impacto que estos tengan sobre el proceso.

Para futuras investigaciones, se debe tener en cuenta realizar una distribución de la planta para así disminuir costos correspondientes al área para la construcción o estructuración de la planta, además de tener presente valores actualizados para la adquisición de los distintos equipos, reactivos y servicios industriales.