

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS
VEGETALES Y ESTIÉRCOL VACUNO A ESCALA
LABORATORIO EN EL DEPARTAMENTO DE TARIJA**

Por:

VLADIMIR LOPEZ FLORES

Modalidad de graduación: Proyecto de Grado Investigación Aplicada presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química.

Diciembre 2021

TARIJA – BOLIVIA

V°B°

M.Sc. Ing. José Navia Ojeda

DECANO

Facultad de Ciencias y Tecnología

Lic. Deysi B. Arancibia Márquez

VICEDECANA

Facultad de Ciencias y Tecnología

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

Ing. Zenteno Benitez L. Fernando

Ing. Michel Cortez Rene Emilio

Ing. Herbas Barrancos Juan Pablo

ADVERTENCIA

El tribunal calificador del presente trabajo no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

DEDICATORIAS

El presente “Trabajo de Grado” va dedicado a mi padre Juan C. Lopez y madre Martha Flores, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a esta etapa tan importante en mi formación académica.

A mis cuatro hermanos, que me han apoyado y alentado en todo momento.

A mis amigos con mucho cariño, ya que sin ellos, la sensación de haber llegado tan lejos no sería la misma.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Química, quienes me formaron y apoyaron durante mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por bendecir mi vida, por guiarme a lo largo de mi vida, dándome fuerzas para seguir adelante en todo momento.

A mis padres Juan C. Lopez y Martha Flores, que son los responsables principales de que este realizando este trabajo. Espero que estén muy orgullosos de su hijo.

A todos mis amigos, y generalizo, pues el pequeño espacio en esta hoja no alcanzaría para nombrar a todas las personas que me alentaron y acompañaron durante mi formación académica.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Química, que me han visto crecer como persona, y gracias sus conocimientos inculcados hoy pudo decir que tuve una buena formación académica.

PENSAMIENTO

“Todos los triunfos nacen cuando nos
atrevernos a empezar”

Eugene Ware

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

| | |
|--------------------------------|---|
| Antecedentes..... | 1 |
| Objetivos..... | 5 |
| Objetivo general. | 5 |
| Objetivos específicos..... | 5 |
| Justificaciones..... | 6 |
| Justificación tecnológica..... | 6 |
| Justificación económica..... | 6 |
| Justificación social..... | 6 |
| Justificación ambiental. | 7 |
| Justificación personal. | 7 |

CAPITULO I

MARCO TEORICO

| | |
|--|----|
| 1.1 Estiércol vacuno. | 8 |
| 1.1.1. Contaminación por el estiércol. | 8 |
| 1.1.2. Composición del estiércol. | 8 |
| 1.2. Residuos sólidos vegetales. | 9 |
| 1.3. Definición de biomasa. | 10 |
| 1.4. Digestión anaeróbica. | 10 |
| 1.4.1. Etapas de la digestión anaeróbica. | 11 |
| 1.5. Biogás. | 12 |
| 1.5.1. Composición y características del biogás..... | 12 |
| 1.5.2. Usos del biogás. | 13 |
| 1.6. Biol. | 14 |

| | |
|---|----|
| 1.7. Biodigestor. | 15 |
| 1.7.1. Tipos de biodigestores. | 15 |
| 1.7.1.1. Biodigestores continuos..... | 15 |
| 1.7.1.2. Biodigestores semi-continuos..... | 15 |
| 1.7.2. Características de un biodigestor para que opere correctamente,..... | 16 |
| 1.8. Compost..... | 16 |
| 1.9. Factores a tomar en cuenta para la producción de biogás. | 16 |
| 1.9.1. Temperatura..... | 16 |
| 1.9.2. pH y alcalinidad..... | 18 |
| 1.9.3. Tiempo de retención. | 19 |

CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

| | |
|--|----|
| 2.1. Metodología de la parte experimental. | 20 |
| 2.1.1. Selección del proceso. | 20 |
| 2.2. Construcción del biodigestor. | 23 |
| 2.2.1. Materiales usados. | 23 |
| 2.2.1.3. Olla a presión..... | 24 |
| 2.2.1.4. Termómetro digital..... | 24 |
| 2.2.1.5. Manómetro. | 25 |
| 2.2.1.6. Equipo para suero. | 25 |
| 2.2.3. Ensamblado del biodigestor..... | 26 |
| 2.3. Materiales de laboratorio. | 27 |
| 2.4. Diseño factorial. | 27 |
| 2.4.1. Construcción del diseño factorial 2^k | 28 |

| | |
|---|----|
| 2.5. Descripción del proceso de obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol de vaca a escala laboratorio. | 32 |
| 2.5.1. Recolección de la materia prima | 33 |
| 2.5.2. Selección de la materia prima..... | 34 |
| 2.5.3. Pesado y triturado de los residuos sólidos vegetales. | 35 |
| 2.5.4. Mezclado. | 36 |
| 2.5.5. Biodigestor. | 38 |
| 2.5.6. Recolección de biogás. | 38 |
| 2.5.7. Recolección de los residuos..... | 39 |
| 2.6. Balance de materia. | 40 |
| 2.7. Balance de energía..... | 58 |

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

| | |
|--|----|
| 3.1. Caracterización de la materia prima. | 61 |
| 3.1.1. Estiércol Vacuno..... | 61 |
| 3.1.1.1. Densidad. | 61 |
| 3.1.1.2. Potencial de hidrogeno, pH. | 61 |
| 3.1.1.3. Humedad..... | 61 |
| 3.1.1.4. Cenizas (Materia Inorgánica) | 61 |
| 3.1.1.5. Sólidos totales..... | 61 |
| 3.1.1.6. Sólidos Volátiles..... | 62 |
| 3.1.1.7. Nitrógeno Total. | 62 |
| 3.1.1.8. Tabla resumen..... | 62 |
| 3.1.2. Residuos Sólidos Vegetales..... | 62 |
| 3.1.2.1. Densidad. | 62 |

| | |
|--|----|
| 3.1.2.2. Potencial de hidrogeno, pH. | 63 |
| 3.1.2.3. Humedad..... | 63 |
| 3.1.2.4. Cenizas (Materia Inorgánica) | 63 |
| 3.1.2.5. Sólidos totales..... | 63 |
| 3.1.2.6. Sólidos Volátiles..... | 63 |
| 3.1.2.7. Nitrógeno Total. | 64 |
| 3.1.2.8. Tabla resumen..... | 64 |
| 3.2. Caracterización del biogás..... | 64 |
| 3.2.1. Densidad. | 64 |
| 3.2.2. Prueba de combustión..... | 65 |
| 3.2.3. Olor..... | 66 |
| 3.2.4. Composición del biogás. | 66 |
| 3.2.5. Poder calorífico superior. | 66 |
| 3.3. Caracterización de los residuos. | 67 |
| 3.3.1. Densidad. | 67 |
| 3.3.2. Potencial de hidrogeno, pH. | 67 |
| 3.3.3. Humedad..... | 67 |
| 3.3.4. Cenizas (Materia Inorgánica) | 67 |
| 3.3.5. Sólidos totales..... | 67 |
| 3.3.6. Sólidos Volátiles..... | 68 |
| 3.3.7. Nitrógeno Total. | 68 |
| 3.3.8. Conductividad Eléctrica. | 68 |
| 3.3.9. Tabla resumen..... | 68 |
| 3.4. Análisis estadístico del diseño experimental..... | 69 |
| 3.4.1. Análisis de varianza univariante..... | 69 |

| | |
|--|----|
| 3.4.2. Determinación del modelo matemático..... | 72 |
| 3.5. Influencia de la Temperatura..... | 77 |
| 3.6. Cálculo del Rendimiento..... | 81 |
| 3.7. Condiciones de operación óptimas de máxima degradación de la materia prima..... | 82 |
| 3.8. Análisis de Costos..... | 83 |
| 3.8.1. Costos Indirectos..... | 83 |
| 3.8.2. Costo de producción..... | 85 |

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|---------------------------|----|
| 4.1. Conclusiones..... | 86 |
| 4.2. Recomendaciones..... | 88 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Producción de biogás en Europa (2019) | 2 |
| Figura 2: Biodigestor (La Paz, Bolivia) | 3 |
| Figura I-1: Proceso de la digestión anaeróbica..... | 10 |
| Figura I-2: Variación de temperatura en el interior de un biodigestor con respecto a la cantidad de biogás generado..... | 17 |
| Figura I-3: Composición del biogás en función del pH de la mezcla de materias primas. .. | 18 |
| Figura II-1: Olla a presión | 24 |
| Figura II-2: Termómetro digital | 25 |
| Figura II-3: Manómetro | 25 |
| Figura II-4: Equipo para suero | 26 |
| Figura II-5: Biodigestor | 26 |
| Figura II-6: Esquema del proceso de obtención de biogás a partir de residuos sólidos vegetales y estiércol vacuno | 32 |
| Figura II-7: Ubicación de la zona de recolección de los residuos sólidos vegetales..... | 33 |
| Figura II-8: Ubicación de la zona de recolección del estiércol vacuno..... | 34 |
| Figura II-9: Residuos sólidos vegetales seleccionados. | 34 |
| Figura II-10: Selección del estiércol vacuno..... | 35 |
| Figura II-11: Pesado de los residuos sólidos vegetales. | 35 |
| Y se procedió a triturar en una licuadora. (Ver Figura II-12) | 35 |
| Figura II-12: Triturado de los residuos sólidos vegetales. | 36 |
| En la Figura II-13 se observa como se llevó a cabo el pesando del estiércol vacuno. | 36 |
| Figura II-13: Pesado del estiércol vacuno. | 37 |
| Figura II-14: Mezclado de los RSV, EV y agua..... | 37 |
| Figura II-15: Recolección del biogás formado. | 38 |
| Figura II-16: Recolección de los residuos. | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura II-17: Diagrama de bloques del proceso. | 41 |
| Figura II-18: Balance de materia para la obtención de biogás. | 55 |
| Figura III-1: Prueba de combustión del biogás obtenido | 65 |
| Figura III-2: Modelo Lineal..... | 74 |
| Figura III-3: Volumen Observado, Calculado y Error | 76 |
| Figura III-4: Comportamiento del volumen de biogás producido vs el tiempo. | 81 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla I-1: Composición media de estiércoles frescos de diferentes animales domésticos (% materia seca)..... | 9 |
| Tabla I-2: Composición y características del biogás | 13 |
| Tabla I-3: Características y composición del biol | 15 |
| Tabla I-4: Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica | 17 |
| Tabla I-5: Tiempo de retención hidráulico de estiércol de ganado en distintas regiones..... | 19 |
| Tabla II-1 Descripción de factores | 20 |
| Tabla II-2 Matriz de enfrentamiento | 21 |
| Tabla II-3: Escala de calificación por puntuación del 1 al 10 | 21 |
| Tabla II-4: Evaluación de alternativas de materia prima para la producción de biogás..... | 22 |
| Tabla II-5: Tabla de materiales..... | 27 |
| Tabla II-6: Niveles y factores que intervienen. | 28 |
| Tabla II-7: Matriz de experimentos..... | 29 |
| Tabla II-8: Resumen de las cantidades en masa que se usaron para los cuatro experimentos. | 36 |
| Tabla II-9: Nomenclatura utilizada en el balance de materia..... | 40 |
| Tabla II-10: Resumen del curso de las corrientes. | 41 |
| Tabla II-11: Corrientes del proceso..... | 42 |
| Tabla II-12: Valores de parámetros para la corriente C | 44 |
| Tabla II-13: Valores de parámetros para la corriente D | 46 |
| Tabla II-14: Valores de algunos parámetros del agua potable utilizados en el proyecto. | 48 |
| Tabla II-15: Valores de parámetros para la corriente H..... | 52 |
| Tabla II-16: Valores para la corriente G..... | 53 |
| Tabla II-17: Resultados de corrientes en el balance de materia | 56 |
| Tabla II-18: Resultado de fracciones en cada corriente del balance de materia | 56 |

| | |
|--|----|
| Tabla II-19: Capacidades caloríficas. | 59 |
| Tabla III-1 Características del estiércol vacuno. | 62 |
| Tabla III-2: Características de los residuos sólidos vegetales | 64 |
| Tabla III-3 Composición del biogás obtenido | 66 |
| Tabla III-4: Características de los residuos. | 68 |
| Tabla III-5 Datos de la parte experimental..... | 69 |
| Tabla III-6: Factores Inter Sujetos..... | 70 |
| Tabla III-7: Pruebas de los efectos Inter-Sujetos. | 70 |
| Tabla III-8: Variables para la regresión..... | 72 |
| Tabla III-9 Resumen del modelo matemático. | 72 |
| Tabla III-10: Resultados del análisis Anova. | 73 |
| Tabla III-11: Coeficientes del modelo matemático..... | 73 |
| Tabla III-12 resultados del volumen ajustado y el error..... | 75 |
| Figura III-3: Volumen Observado, Calculado y Error. | 76 |
| Tabla III-13: Datos del experimento 4. | 77 |
| Tabla III-14: Datos del experimento 8. | 77 |
| Tabla III-15: Datos de temperatura y volumen obtenidos del experimento número 4..... | 78 |
| Tabla III-16: Datos de temperatura y volumen obtenidos del experimento número 8..... | 79 |
| Tabla III-17: Datos para el análisis de la influencia de la temperatura. | 80 |
| Tabla II-18: Detalle de los costos de construcción del biodigestor..... | 83 |
| Tabla II-19: Detalle de los costos del material de laboratorio..... | 83 |
| Tabla II-20: Detalle de costos material de apoyo..... | 84 |
| Tabla II-21: Detalle del costo de investigación..... | 84 |
| Tabla II-22: Detalle de costos totales. | 84 |
| Tabla II-23: Detalle de los costos de la materia prima..... | 85 |

Tabla II-24: Detalle de los costos de la energía. 85

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

| | |
|------------------|--|
| U.A. "J.M.S." | Universidad Autónoma Juan Misael Saracho |
| IIDEPROQ | Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos |
| CEANID | Centro de análisis investigación y desarrollo |
| MI | Materia Inorgánica |
| EV | Estiércol Vacuno |
| RSV | Residuos Sólidos Vegetales |
| SV | Sólidos Volátiles |
| ST | Sólidos Totales |
| MI | Materia Inorgánica |
| g | Gramos |
| Kw | Kilovatio |
| Kwh | Kilovatio hora |
| h | Hora |
| °C | Grado centígrado |
| ml | Mililitro |
| C.E. | Conductividad Eléctrica |
| kJ | Kilo Julios |
| Cp | Capacidad calorífica |
| ρ | Densidad |
| H ₂ O | Agua |
| CH ₄ | Metano |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| Bs. | Bolivianos |