

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROYECTO DE GRADO



**OBTENCIÓN DE BIOETANOL A ESCALA LABORATORIO A
PARTIR DE YUCA (*Manihot esculenta* Crantz)**

Por:

LOIDA ABIGAIL BRAVO BENITEZ

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

Julio de 2024

TARIJA – BOLIVIA

V°B°

MSc. Ing. Marcelo Segovia Cortez

DECANO

Facultad de Ciencias y Tecnología

MSc. Lic. Clovis Gustavo Succi Aguirre

VIDECANO

Facultad de Ciencias y Tecnología

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

MSc. Ing. Ignacio Edwin Velásquez Soza

Ing. Karina Cervantes Cabilmonte

MSc. Ing. Adrian Waldemar Daroca Aparicio

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.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación es dedicado a Dios y a mis padres. A Dios por ser mi guía y por brindarme salud, sabiduría, y fortaleza para alcanzar esta meta. A mis padres quienes me inculcaron valores, velan por mi bienestar y educación y por ser mi apoyo incondicional en la vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la voluntad y la fuerza para seguir adelante en todo este proceso de realización profesional.

A mis padres Grover Bravo y Rosmery Benitez por ser un apoyo incondicional.

A mis hermanos Herlan, Alvaro, Lindalba y Maritza con su presencia, respaldo y cariño me impulsaron a salir adelante, hacen de mis días más especiales y que mis logros también son suyos.

A la Prof. Fatima Torrejon por compartir sus conocimientos, siempre recordaré con gratitud el tiempo que pase durante sus clases e impulsarme a ser mejor cada día.

Al plantel docente de la carrera de Ing. Química por todas las enseñanzas y conocimientos compartidos.

A la Ing. Irina Justiniano Ayarde a quien agradezco por su apoyo en la orientación y crítica durante la realización del presente trabajo y así cumplir con las metas trazadas, de la misma manera a la Ing. Elizabeth Aramayo Colque.

A mis amigos gracias por los momentos compartidos, en los que aprendimos a trabajar en equipo, apoyarnos mutuamente y a crecer juntos, los llevare en mi corazón.

Pon en manos del Señor todas tus obras, y tus proyectos se cumplirán.

Proverbios 16:3

"Soy de las que piensan que la ciencia tiene una gran belleza. Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico: también es un niño colocado ante fenómenos naturales que lo impresionan como un cuento de hadas".

Marie Curie

ÍNDICE INTRODUCCIÓN

Antecedentes.....	1
Objetivos	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
Justificación.....	5
Justificación económica.....	5
Justificación ambiental	5
Justificación tecnológica.....	6
Justificación personal	7

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

1.1. Bioetanol	9
1.1.1. Definición de bioetanol.....	9
1.1.2. Propiedades fisicoquímicas del bioetanol	9
1.1.3. Usos y aplicaciones del bioetanol.....	10
1.1.4. Materias primas para la obtención de bioetanol	12
1.1.5. Clasificación de materias primas	13
1.1.5.1. <i>Materias primas azucaradas</i>	13
1.1.5.2. <i>Materias primas amiláceas</i>	13
1.1.5.3. <i>Materias primas lignocelulósicas</i>	13
1.2. Yuca	14
1.2.1. Taxonomía.....	14
1.2.2. Descripción botánica.....	15
1.2.3. Composición química y valor nutricional de la yuca	16
1.3. Almidón	17
1.3.1. Composición del almidón	17
1.4. Proceso de obtención de bioetanol	19
1.4.1. Tipos de procesos	19
1.4.2. Diagrama de flujo del proceso.....	20
1.4.3. Etapas del proceso	22
1.4.3.1. Hidrólisis del almidón.....	22
1.4.3.1.1. <i>Hidrólisis ácida</i>	22
1.4.3.1.2. <i>Hidrólisis enzimática</i>	23
1.4.3.2. Fermentación.....	28
1.4.3.2.1. <i>Levadura Saccharomyces cerevisiae</i>	28
1.4.3.2.2. <i>Hidrólisis y fermentación independiente (HFI)</i>	29
1.4.3.2.3. <i>Sacarificación y fermentación simultánea (SFS)</i>	29
1.4.3.2.4. <i>Hidrólisis y co-fermentación simultáneas (HCS)</i>	30
1.4.3.2.5. <i>Mecanismo de fermentación</i>	30
1.4.3.2.6. <i>Factores que inciden en la fermentación alcohólica</i>	32
1.4.3.2.7. <i>Cinética de crecimiento celular</i>	34
1.4.3.3. Destilación.....	35
1.4.3.3.1. <i>Destilación en equilibrio o instantánea</i>	36

1.4.3.3.2.	<i>Destilación simple por lotes o diferencial</i>	36
1.4.3.3.3.	<i>Destilación simple con arrastre de vapor</i>	37
1.4.3.3.4.	<i>Destilación con reflujo</i>	37

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.	Parte experimental	40
2.1.	Descripción y caracterización de la materia prima.....	40
2.2.	Metodología.....	42
2.2.1.	Descripción del método de investigación	42
2.3.	Selección del proceso para la hidrólisis del almidón.....	42
2.3.1.	Aplicabilidad del proceso	42
2.3.2.	Influencia de temperatura, pH y tiempo	43
2.3.3.	Confiabilidad del proceso	43
2.3.4.	Generación de subproductos y residuos	44
2.3.5.	Disponibilidad de reactivos	44
2.4.	Diseño experimental para el proceso de obtención de bioetanol	45
2.4.1.	Proceso de obtención de bioetanol de yuca con hidrólisis enzimática.....	45
2.4.2.	Diseño factorial.....	47
2.4.2.1.	Diseño factorial para el proceso de hidrólisis enzimática	47
2.4.2.1.1.	Modelo de regresión para el proceso de hidrólisis enzimática	49
2.4.2.2.	Diseño factorial para el proceso de fermentación alcohólica.....	50
2.4.2.2.1.	Modelo de regresión para el proceso de fermentación alcohólica	51
2.4.3.	Diseño para el proceso de destilación	52
2.5.	Procedimientos y técnicas empleados para la obtención de los resultados	52
2.5.1.	Equipos y materiales de laboratorio	52
2.5.2.	Utensilios e insumos.....	53
2.6.	Desarrollo del proceso experimental	55
2.6.1.	Descripción del proceso a partir de yuca mediante hidrólisis enzimática	55
2.6.1.1.	Pretratamiento de la materia prima.....	55
2.6.1.1.1.	Recepción de la materia prima	55
2.6.1.1.2.	Pesado	55
2.6.1.1.3.	Pelado.....	56
2.6.1.1.4.	Lavado	56
2.6.1.1.5.	Cortado.....	57
2.6.1.1.6.	Secado.....	57
2.6.1.1.7.	Molienda	58
2.6.1.1.8.	Tamizado.....	59
2.6.1.2.	Hidrolisis del almidón.....	60
2.6.1.2.1.	Dilución.....	60
2.6.1.2.2.	Gelatinización.....	61
2.6.1.2.3.	Licuefacción	61
2.6.1.2.4.	Sacarificación	62
2.6.1.2.5.	Prueba del yodo	63
2.6.1.3.	Preparación del mosto.....	63
2.6.1.4.	Fermentación alcohólica	64

2.6.1.5.	Filtración	65
2.6.1.6.	Destilación.....	66

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.	Resultados y discusión	70
3.1.	Resultados obtenidos en la parte experimental	70
3.1.1.	Resultados obtenidos en el pretratamiento de la materia prima	70
3.1.1.1.	Secado	70
3.1.1.2.	Tamizado	73
3.1.2.	Resultados obtenidos en la hidrólisis enzimática.....	73
3.1.2.1.	Análisis estadístico del diseño factorial de la hidrólisis enzimática .	74
3.1.3.	Resultados obtenidos en la etapa de fermentación alcohólica	80
3.1.3.1.	Análisis estadístico del diseño factorial de la fermentación	82
3.1.4.	Resultados obtenidos en la etapa de filtrado.....	88
3.1.5.	Resultados obtenidos en la etapa de destilación	88
3.2.	Balance de materia del proceso de obtención de bioetanol de yuca.....	89
3.2.1.	Balance de materia del pretratamiento de la materia prima	91
3.2.1.1.	Balance de materia del pelado	91
3.2.1.2.	Balance de materia del lavado	92
3.2.1.3.	Balance de materia del cortado	94
3.2.1.4.	Balance de materia del secado	94
3.2.1.5.	Balance de materia de la molienda	98
3.2.1.6.	Balance de materia del tamizado	98
3.2.2.	Balance de materia de la hidrólisis enzimática	99
3.2.2.1.	Balance de materia de la dilución.....	100
3.2.2.2.	Balance de materia de la gelatinización.....	101
3.2.2.3.	Balance de materia de la licuefacción.....	102
3.2.2.4.	Balance de materia de la sacarificación	103
3.2.3.	Balance de materia para la fermentación alcohólica.....	104
3.2.5.	Balance de materia de la fermentación alcohólica.....	105
3.2.6.	Balance de materia de la filtración.....	107
3.2.7.	Balance de materia de la destilación	108
3.4.	Balance de Energía	112
3.4.1.	Balance de energía del secado	113
3.4.2.	Balance de energía de la gelatinización.....	118
3.4.3.	Balance de energía de la licuefacción	120
3.4.4.	Balance de energía de la sacarificación.....	122
3.4.5.	Balance de energía de la destilación	123
3.4.6.	Consumo de energía	126
3.5.	Caracterización del producto obtenido	128
3.6.	Rendimiento	129
3.6.1.	Rendimiento en la fermentación alcohólica	129

CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.	Conclusiones y recomendaciones	133
----	--------------------------------------	-----

4.1.	Conclusiones	133
4.2.	Recomendaciones	134
	Bibliografía.....	136
	Anexos	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Materias primas para la producción de bioetanol	3
Tabla 2 Producción nacional y regional de yuca	4
Tabla I- 1 Propiedades fisicoquímicas del bioetanol	9
Tabla I- 2 Principales mezclas del bioetanol.....	11
Tabla I- 3Características técnicas de calidad del Etanol Anhidro	14
Tabla I- 4 Taxonomía de la yuca	15
Tabla I- 5 Composición química de la raíz de yuca	16
Tabla I- 6 Factores que inciden en la fermentación alcohólica	33
Tabla II- 1 Análisis fisicoquímico de yuca	40
Tabla II- 2Análisis de la cantidad de almidón presente en la yuca	41
Tabla II- 3 Análisis Microbiológico de yuca.....	41
Tabla II- 4 Matriz de decisión para la selección del método experimental	45
Tabla II- 5 Niveles de variación de los factores en proceso de hidrólisis enzimática	48
Tabla II- 6 Matriz de diseño experimental en el proceso de hidrólisis enzimática	49
Tabla II- 7 Niveles de variación de los factores en proceso de fermentación.....	51
Tabla II- 8 Matriz de diseño experimental en el proceso de fermentación alcohólica	51
Tabla II- 9 Descripción del material de laboratorio utilizado	53
Tabla II- 10 Utensilios utilizados	54
Tabla II- 11 Insumos utilizados	54
Tabla II- 12 Número de tamices utilizados en el tamizado de la yuca	59
Tabla III- 1 Resultados de la variación de peso en la etapa de secado	70
Tabla III- 2 Resultados del secado en el secador infrarrojo	72
Tabla III- 3 Resultados de la etapa de tamizado.....	73
Tabla III- 4 Resultados de las réplicas de la hidrólisis enzimática.....	74
Tabla III- 5 Matriz de diseño experimental para la etapa de hidrólisis enzimática	74
Tabla III- 6 Pruebas de los Efectos Inter-sujetos.....	75
Tabla III- 7 Análisis de Varianza de regresión lineal	76
Tabla III- 8 Coeficientes del Modelo Matemático	76
Tabla III- 9 Resumen del Modelo de Regresión Lineal.....	77
Tabla III- 10 Errores entre valores observados y ajustados del modelo	79
Tabla III- 11 Resultados de pH y °Brix en la fermentación alcohólica	80
Tabla III- 12 Resultados de las réplicas de la fermentación	81
Tabla III- 13 Matriz de diseño experimental para la fermentación	82
Tabla III- 14 Prueba de Efectos Inter-Sujetos	83
Tabla III- 15 Análisis de Varianza de Regresión Lineal.....	84
Tabla III- 16 Coeficientes del Modelo Matemático	84
Tabla III- 17 Resumen del Modelo de Regresión Lineal.....	85
Tabla III- 18 Errores entre valores observados y ajustado del modelo	86
Tabla III- 19 Resultados del filtrado	88
Tabla III- 20 Resultados de la destilación.....	89

Tabla III- 21 Propiedades psicométricas del aire	97
Tabla III- 22 Composición fisicoquímica de la yuca.....	117
Tabla III- 23 Condiciones de operación de los equipos utilizados.....	127
Tabla III- 24 Energía consumida de los equipos utilizados	127
Tabla III- 25 Propiedades fisicoquímicas del producto	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Variación, tendencia y producción mundial (miles de m ³) de bioetanol	1
Figura 2 Distribución porcentual de producción de bioetanol mundial 2021	2
Figura 3 Variación, tendencia y consumo mundial (miles de m ³) de bioetanol.....	2
Figura 4 Consumo anual de bioetanol en Bolivia (en m ³)	4
Figura 1- 1 Materias óprimas para la obtención de bioetanol	12
Figura 1- 2 Segmento de la estructura de la amilosa	18
Figura 1- 3 Enrollamiento helicoidal de la amilosa	18
Figura 1- 4 Segmento de la estructura de la amilopectina	19
Figura 1- 5 Rutas tecnológicas para la producción de bioetanol.....	20
Figura 1- 6 Diagrama de flujo del proceso de obtención de bioetanol	21
Figura 1- 7 Esquema del proceso de glucolisis	32
Figura 1- 8 Curva de crecimiento microbiano.....	34
Figura 1- 9 Destilación en equilibrio o instantánea	36
Figura 1- 10 Destilación simple por lotes o diferencial	37
Figura 1- 11 Flujo del proceso para una torre fraccionadora	38
Figura 2- 1 Diagrama de flujo proceso de obtención de bioetanol a partir de yuca ...	46
Figura 2- 2 Recepción de la materia prima	55
Figura 2- 3 Pesado de yuca	55
Figura 2- 4 Cáscaras de yuca.....	56
Figura 2- 5 Lavado de yuca.....	56
Figura 2- 6 Cortado de yuca.....	57
Figura 2- 7 Secado de yuca	58
Figura 2- 8 Molienda de la yuca seca usando el molino de rodillo	58
Figura 2- 9 Molienda de la yuca seca usando el molino de martillos.....	59
Figura 2- 10 Tamizado de la yuca seca molida	60
Figura 2- 11 Dilución de yuca seca	60
Figura 2- 12 Gelatinización.....	61
Figura 2- 13 Licuefacción	62
Figura 2- 14 Sacarificación	62
Figura 2- 15 Prueba del yodo a medida que avanza la hidrólisis enzimática.....	63
Figura 2- 16 Preparación del mosto.....	63
Figura 2- 17 Activación de la levadura	64
Figura 2- 18 Levaduras en el mosto.....	65
Figura 2- 19 Fermentación alcohólica	65
Figura 2- 20 Filtración	66
Figura 3- 1 Variación del peso en función del tiempo en la etapa de secado	71
Figura 3- 2 Variación de la humedad extraída en el secador infrarrojo.....	72
Figura 3- 3 Modelo Lineal	78
Figura 3- 4 Valores observados y ajustados al modelo.....	79
Figura 3- 5 Error de los valores observados y generados de la concentración de sólidos solubles (°Brix).....	80
Figura 3- 6 Variación del pH y °Brix en la fermentación alcohólica	81

Figura 3- 7 Modelo Lineal	86
Figura 3- 8 Valores observados y ajustados al modelo.....	87
Figura 3- 9 Error entre el grado alcohólico observado y generado	87
Figura 3- 10 Diagrama de flujo para la obtención de bioetanol de yuca	89
Figura 3- 11 Balance de materia del pretratamiento	91
Figura 3- 12 Balance de materia del pelado de yuca	91
Figura 3- 13 Balance de materia del lavado	93
Figura 3- 14 Balance de materia del cortado.....	94
Figura 3- 15 Balance de materia del secado.....	95
Figura 3- 16 Balance de materia de la molienda	98
Figura 3- 17 Balance de materia del tamizado	99
Figura 3- 18 Balance de materia de la hidrólisis enzimática.....	100
Figura 3- 19 Balance de materia de la dilución.....	100
Figura 3- 20 Balance de materia de gelatinización.....	101
Figura 3- 21 Balance de materia en la licuefacción.....	102
Figura 3- 22 Balance de materia de la sacarificación	103
Figura 3- 23 Balance de materia para la fermentación alcohólica	104
Figura 3- 24 Balance de materia en la preparación del mosto	104
Figura 3- 25 Balance de materia de la fermentación alcohólica	105
Figura 3- 26 Balance de materia de la filtración	107
Figura 3- 27 Balance de materia de la destilación.....	108
Figura 3- 28 Balance de materia total del proceso	110
Figura 3- 29 Balance de energía del secado	113
Figura 3- 30 Balance de energía de la gelatinización	118
Figura 3- 31 Balance de energía de la licuefacción	120
Figura 3- 32 Balance de energía de la sacarificación	122
Figura 3- 33 Balance de energía de la destilación	124