

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN DE PULPA DE CELULOSA PARA PRODUCIR
PAPEL A ESCALA LABORATORIO A PARTIR DEL PINZOTE
DE PLÁTANO (*Musa balbisiana*) CULTIVADO EN EL TRÓPICO
BOLIVIANO**

Por:

ENZO LEONARDO MUÑOZ ESTRADA

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

Octubre de 2022

TARIJA – BOLIVIA

V°B°

M.Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez

DECANO

Facultad de Ciencias y Tecnología

M.Sc. Lic. Clovis Gustavo Succu Aguirre

VICEDECANO

Facultad de Ciencias y Tecnología

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

Ing. Ignacio Velásquez Soza

Ing. Juan Carlos Vega Knez

Ing. Juan Pablo Herbas Barrancos

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 Proyecto de Grado, va dedicado a mis amados padres Mirio Muñoz y Victoria Estrada, porque son lo más sagrado que tengo en la vida, quienes siempre estuvieron a mi lado brindándome todo su amor, su apoyo constante y sus consejos para hacer de mí una persona de bien.

A mis hermanos Jorge y Pablo, por su apoyo incondicional durante toda esta etapa de mi vida.

A mi pareja Mariela Ocampo, quien compartió todos estos años de estudio conmigo, por ser un gran pilar para mí, por acompañarme durante tantos años de mi vida y brindarme todo su amor, cariño y comprensión.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme dado una familia maravillosa, quienes siempre han creído en mí, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio, enseñándome a valorar todo lo que tengo.

A mis padres Mirio Muñoz y Victoria Estrada que con su esfuerzo y dedicación fueron fundamentales para poder conseguir este logro.

A mis hermanos que me dieron el apoyo para no decaer ante la adversidad.

A mi pareja Mariela Ocampo por su amor incondicional, por su apoyo, su comprensión, por sus palabras alentadoras y por formar parte de mi vida.

A mis amigos, compañeros y docentes de la carrera de Ing. Química que fueron parte de mi formación académica, por los buenos momentos que hemos compartido.

Pensamiento

“Que la gente crea porque tiene con qué
crear”

Marcelo Gallardo

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

Antecedentes	1
Objetivos	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos.....	4
Justificación.....	5
Justificación tecnológica	5
Justificación económica	5
Justificación social	6
Justificación ambiental.....	6
Justificación personal	6

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. El plátano	7
1.2. Origen y distribución geográfica del plátano.....	7
1.3. Taxonomía del plátano.....	8
1.4. Morfología del plátano.....	8
1.4.1. La planta.....	8
1.4.2. Seudotallo.....	9
1.4.3. El rizoma	9
1.4.4. Las hojas	9
1.4.5. Las raíces.....	9

1.4.6. Hijo.....	9
1.4.7. Las flores.....	9
1.4.8. El Fruto	10
1.4.9. Pinzote.....	10
1.5. Lignocelulosa.....	11
1.6. Celulosa.....	12
1.6.1. Clasificación de la celulosa.....	12
1.7. Hemicelulosa.....	13
1.8. Holocelulosa.....	13
1.9. Lignina	13
1.10. Pulpa y papel.....	15
1.10.1. Proceso de obtención de pulpa de celulosa.....	15
1.10.1.1. Procesos mecánicos.....	15
1.10.1.3. Procesos semiquímicos	16
1.10.1.2. Procesos químicos.....	16
1.10.1.2.1. Proceso a la sosa.....	17
1.10.1.2.2. Proceso Kraft.....	19
1.10.1.2.3. Proceso al sulfito.....	20
1.11. Factores a tomar en cuenta para la producción de pulpa	22
1.11.1. Especie y calidad de la madera	23
1.11.2. Tiempo de cocción	23
1.11.3. Temperatura de cocción	23
1.11.4. Relación de los productos químicos a la madera	23

1.11.5. Concentración de los reactivos en el licor	23
1.12. Índices de Calidad de la Pulpa	24
1.12.1. Rendimiento Porcentual	24
1.12.2. Número Kappa	24
1.12.3. Alfacelulosa.....	24

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Metodología de investigación	25
2.2. Selección del proceso experimental.....	25
2.3. Equipos.....	27
2.4. Materiales de laboratorio.....	27
2.5. Reactivos	28
2.6. Diseño experimental.....	29
2.6.1. Diseño factorial a dos niveles	30
2.6.2. El modelo de regresión	30
2.7. Construcción del diseño factorial 2^k	32
2.8. Diseño del proceso experimental seleccionado para la obtención de pulpa de celulosa.....	35
2.8.1. Recolección de la materia prima	36
2.8.2. Selección de la materia prima	36
2.8.3. Limpieza del pinzote	36
2.8.4. Fermentación en seco.....	37
2.8.5. Troceado.....	38
2.8.6. Pesado	39

2.8.7. Cocción alcalina	39
2.8.8. Escurrido y lavado.....	40
2.8.9. Blanqueado.....	41
2.8.10. Escurrido y lavado.....	41
2.8.11. Desfibrado	42
2.8.12. Elaboración de mezcla	42
2.8.13. Formación y secado de la hoja.....	43
2.8.14. Almacenamiento	44
2.9. Caracterización de la materia prima.....	44
2.9.1 Determinación de humedad	45
2.9.2. Determinación de pH	45
2.9.3. Determinación de densidad.....	45
2.9.4. Determinación de cenizas	46
2.9.5. Determinación de solubles en alcohol-benceno.....	46
2.9.6. Determinación de lignina	46
2.9.7. Determinación de α -celulosa.....	47
2.9.8. Determinación de holocelulosa.....	48
2.10. Caracterización del producto: Pulpa de celulosa	48
2.10.1. Determinación del contenido de humedad.....	49
2.10.2. Determinación de cenizas	49
2.10.3. Determinación de Alfa, Beta y Gamma celulosa.....	50
2.10.4. Determinación del número Kappa y porcentaje de lignina.....	51
2.11. Balance de materia	53

2.11.1. Etapa de limpieza de pinzote.....	53
2.11.2. Etapa de fermentación en seco.....	54
2.11.3. Etapa de lavado	55
2.11.4. Etapa de troceado	55
2.11.5. Etapa de cocción alcalina	56
2.11.6. Etapa de escurrido.....	58
2.11.7. Etapa de lavado	59
2.11.8. Etapa de blanqueado	59
2.11.9. Etapa de escurrido y lavado	60
2.11.10. Etapa de desfibrado.....	62
2.11.11. Etapa de elaboración de mezcla	62
2.11.12. Etapa de formación y secado de la hoja.....	63
2.12. Balance de energía	65
2.12.1. Balance de energía del recipiente de cocción	65
2.12.2. Balance de energía del agua de lavado	69
2.13. Instrumentalización del proceso de obtención de pulpa de celulosa para producir papel	70

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Caracterización de la materia prima.....	71
3.2 Ensayos de obtención de pulpa de celulosa de pinzote de plátano	71
3.2.1 Rendimiento	72
3.3. Análisis estadístico del diseño experimental.....	72
3.3.1. Análisis de Varianza Univariante.....	73

3.3.2. Determinación del Modelo Matemático.....	75
3.4. Caracterización del producto: Pulpa de celulosa	79
3.4.1. Caracterización fisicoquímica.....	79
3.4.2. Humedad	79
3.4.3. Cenizas	79
3.4.4. Alfa, Beta y Gamma celulosa.....	79
3.4.5. Número Kappa y porcentaje de lignina.....	79
3.4.6. Propiedades fisicoquímicas de la pulpa de celulosa	80
3.5. Gramaje del papel	80
3.6. Resultados del balance de materia y energía.....	80
3.7. Análisis de Costos	82
3.7.1. Costo del Estudio	82
3.7.2. Costo de producción.....	84

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y REOMENDACIONES

4.1. Conclusiones	87
4.2. Recomendaciones.....	89

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía	90
--------------------	----

ANEXOS

Anexo I: Especificaciones de los equipos

Anexo II: Galería de fotos

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Producción de pulpa a partir de fibras no maderables (2019)	2
Tabla 2: Importaciones nacionales de pulpa y papel (2017 – 2021).....	5
Tabla I-1: Taxonomía del plátano	8
Tabla I-2: Características morfológicas y químicas de <i>Musa balbisiana</i> y <i>Musa acuminata</i>	11
Tabla II-1: Escala de calificación por puntuación del 1 al 10.....	25
Tabla II-2: Matriz de decisión para la selección del proceso de obtención de pulpa de celulosa.....	26
Tabla II-3: Descripción del material utilizado	27
Tabla II-4: Signos para los contrastes en un experimento factorial 2^2	32
Tabla II-5: Niveles y factores que intervienen.....	33
Tabla II-6: Matriz de experimentos.....	34
Tabla II-7: Normas aplicadas para la caracterización fisicoquímica del pinzote de plátano	44
Tabla II-8: Normas aplicadas para la caracterización fisicoquímica de la pulpa de celulosa.....	49
Tabla II-9: Factor “f” corregido a diferentes porcentajes de KMnO_4 0.1N consumidos	53
Tabla III-1: Caracterización fisicoquímica del pinzote de plátano	71
Tabla III-2: Resultados de rendimiento en base seca de las muestras de pulpa de celulosa.....	72
Tabla III-3: Datos de la parte experimental	73
Tabla III-4: Factores inter-sujetos.....	73
Tabla III-5: Pruebas de efectos inter-sujetos.....	74

Tabla III-6: Variables para la regresión	75
Tabla III-7: Resumen del modelo matemático.....	75
Tabla III-8: Resultados del análisis Anova	76
Tabla III-9: Coeficientes del modelo matemático.....	76
Tabla III-10: Resultados del volumen ajustado y el error.....	78
Tabla III-11: Caracterización fisicoquímica de la pulpa de celulosa.....	80
Tabla III-12: Gramaje del papel.....	80
Tabla III-13: Resultados del balance de materia.....	80
Tabla III-14: Resumen del balance de energía.....	81
Tabla III-15: Detalle de costos de materia prima y reactivos	82
Tabla III-16: Detalle de costos de materiales.....	82
Tabla III-17: Detalle de costos de reactivos para la realización de los análisis de materia prima y producto	83
Tabla III-18: Detalle de costos material de apoyo	83
Tabla III-19: Detalle de costos de energía de los equipos utilizados.....	84
Tabla III-20: Detalle de costos totales del estudio	84
Tabla III-21: Detalle de costos de materia prima.....	85
Tabla III-22: Detalle de costos de energía de los equipos utilizados.....	85
Tabla III-23: Detalle del costo de consumo de agua.....	85
Tabla III-24: Detalle del costo del consumo de gas licuado de petróleo	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1: Esquema de una planta de plátano	8
Figura I-2: Fragmentos del pinzote de plátano	11
Figura I-3: Estructura de la celulosa	12
Figura I-4: Estructura de la lignina	14
Figura I-5: Diagrama de flujo del proceso de pulpeado a la sosa	18
Figura I-6: Esquema del ciclo de licores Kraft	20
Figura I-7: Diagrama de flujo del proceso de pulpeado al sulfito con base amonio... 21	
Figura II-1: Diagrama de bloques del proceso de obtención de pulpa de celulosa para producir papel.....	35
Figura II-2: Selección del pinzote de plátano	36
Figura II-3: Limpieza del pinzote de plátano	37
Figura II-4: Fermentación del pinzote de plátano	38
Figura II-5: Troceado del pinzote de plátano	38
Figura II-6: Pesado del pinzote de plátano.....	39
Figura II-7: Cocción alcalina	40
Figura II-8: Escurrido y lavado de pulpa de celulosa	40
Figura II-9: Blanqueado de la pulpa de celulosa.....	41
Figura II-10: Escurrido y lavado de la pulpa de celulosa blanqueada	41
Figura II-11: Desfibrado de pulpa de celulosa.....	42
Figura II-12: Elaboración de mezcla.....	42
Figura II-13: Formación y secado de la hoja	43
Figura II-14: Hojas de papel	44

Figura II-15: Principales rupturas de enlaces en la lignina durante su despolimerización y conversión en monómeros de tipo aromático	57
Figura II-16: Resumen del balance de materia	64
Figura II-17: Diagrama de flujo del proceso de obtención de pulpa de celulosa para producir papel.....	70
Figura III-1: Modelo lineal.....	77
Figura III-2: Rendimiento observado, ajustado y error.....	78

ABREVIATURAS

% p/p	Porcentaje peso a peso
ρ	Densidad
ΔT	Variación de temperatura
ANOVA	Análisis de varianza
ANSI	American National Standards Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
Bs.	Bolivianos
$(C_6H_{10}O_5)_n$	Celulosa
$CaCO_3$	Carbonato de calcio
CaO	Óxido de calcio
CEANID	Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo
CODETAR	Corporación de Desarrollo de Tarija
C_p	Capacidad calorífica
DS	Decreto supremo
Ec.	Ecuación
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
GLP	Gas licuado de petróleo
H_2O	Agua
IPTASA	Industria Papelera Tarija Sociedad Anónima
$KMnO_4$	Permanganato de potasio

m	Masa
\dot{m}	Flujo másico
Mg(OH)_2	Hidróxido de magnesio
N°	Número
NaClO	Hipoclorito de sodio
Na_2CO_3	Carbonato de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
Na_2S	Sulfuro de sodio
NH_3	Amoniac
NH_4OH	Hidróxido de amonio
P	Potencia
PAPELBOL	Empresa Pública Productiva Papeles de Bolivia
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Potencial hidrógeno
Q	Calor
SO_2	Dióxido de azufre
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences (Paquete estadístico para ciencias sociales)
t	Tiempo
T	Temperatura
TAPPI	Technical Association of Pulp and Paper Industry (Asociación Técnica de la Industria de la Celulosa y el Papel)
UAJMS	Universidad Autónoma Juan Misael Saracho
V	Volumen

UNIDADES

A	Amper
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
°C	Grado centígrado
g	Gramo
h	Hora
ha	Hectárea
Hz	Hertz
HP	Caballo de fuerza
J	Julio
K	Grados kelvin
kg	Kilogramo
kJ	Kilojulio
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
l	Litro
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
min	Minutos
ml	Mililitro

N	Normalidad
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundos
TM	Tonelada métrica
V	Voltio
W	Vatio