

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
“JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**PROYECTO DE GRADO
OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE
CÁSCARA DE NUEZ (*Juglans Regia*)**

Por:

DANIELA ESPÍNDOLA CASTRO

**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.**

Julio de 2025

TARIJA-BOLIVIA

VºBº

M.Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez
DECANO FACULTAD DE CIENCIAS
Y TECNOLOGÍA

M.Sc. Ing. Fernando Cortez Michel
VICEDECANO a.i FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

ING. LUIS FERNANDO ZENTENO BENÍTEZ

ING. WALTER RODOLFO ZENTENO CRUZ

ING. ARIEL ARMANDO MAMANI 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:

A Dios todo poderoso: Por ser parte importante en mí ser, que me ha permitido culminar mi trabajo de tesis y muchas otras metas y dificultades que se me han presentado en mi vida, a través de su fortaleza y protección espiritual en todo momento. A mis padres por su esfuerzo, por haberme guiado en la vida les admiro por su gran sacrificio para que yo salga adelante, los amo mucho. A mi queridos Gus y Anita por todo su amor, amistad incondicional de muchas maneras. Por darme su apoyo, por su motivación para salir adelante.

Agradecimientos:

Le agradezco primero a Dios, porque es quien guía mi vida y quien me ha permitido superar todas aquellas circunstancias difíciles. A mi familia por haber sido siempre mi apoyo y equilibrio y por darme la comprensión que tanto necesité.

De igual forma le agradezco a Dios por presentar en mi camino a todas las personas que hicieron posible este logro y a quienes doy gracias.

Todo lo puedo en Cristo que me fortalece.

Filipenses 4:13

ÍNDICE

Advertencia.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Pensamiento.....	iv

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	1
OBJETIVO GENERAL Y ESPECIFICO.....	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos.....	9
JUSTIFICACIÓN.....	10
Justificación Económica	10
Justificación ambiental	10
Justificación social.....	11
Justificación personal	11
1. MARCO TEÓRICO	12
1.1. Carbón activado	12
1.1.1. Estructura y Propiedades de los carbones activados.....	13
1.1.1.1. Propiedades químicas.....	13
1.1.1.2. Estructura física	15
1.2. Precursores para el Carbón Activado	16
1.2.1. Propiedades de un Precursor	16
1.3. Métodos de Activación del Carbón Activado	17
1.3.1. Activación Física.....	17
1.3.2. Activación Química.....	18
1.4. Comparación de los mecanismos de los agentes activantes.....	19
1.5. Clasificación del carbón activado.....	20

1.5.1. Carbón activado granular (CAG)	21
1.5.2. Carbón activado en polvo (CAP).....	22
1.5.3. Carbón activado pelletizado	22
1.6. Mecanismos de operación como adsorbente	23
1.6.1. Adsorción física o Fisisorción	23
1.6.2. Adsorción Química o Quimisorción	25
1.7 Caracterización del carbón activado.....	26
1.7.1 Numero de yodo y área superficial	26
1.7.2. Valor del azul de metileno del carbón activado.....	27
1.7.3. Densidad aparente	27
1.7.4. Contenido de cenizas totales.....	27
1.8. Aplicaciones del Carbón Activado.....	27
1.8.1. Industria alimentaria, farmacéutica y química.....	28
1.8.2. Tratamiento de aguas.....	28
1.9. Materia Prima : Nuez (<i>Juglans regia</i>).....	29
1.9.1. Origen de la Nuez (<i>Juglans regia</i>)	29
1.9.2. Taxonomía y morfología de la Nuez (<i>Juglans regia</i>).....	30
1.9.3. Variedades y Tipos de Nueces	30
1.9.3.1. Nuez de Macadamia	30
1.9.3.2. Nuez pecan	31
1.9.3.3. Nuez de castilla.....	31
1.9.3.4. Nuez de la India	31
1.10 Cáscara de la nuez (<i>Junglans Regia</i>)	31
1.11. Ventajas del carbón activado a partir de cáscara de la nuez.....	32
2. PARTE EXPERIMENTAL	34
2.1. Materia prima	34
2.2. Descripción del método de investigación.....	34
2.2.1. Selección del método de obtención de carbón activado	36
2.3. Diseño factorial	37
2.3.1. Ecuación para el modelo 2^3	37
2.3.2. Niveles de las variables	38
2.3.3. variables dependientes e independientes	38
2.3.4. Orden de los factores en el diseño experimental	39

2.3.5. Codificación de los experimentos.....	39
2.4 Descripción del proceso de obtención de carbón activado.....	40
2.4.1 Recepción de la materia prima	42
2.4.2 Caracterización de la materia prima	42
2.4.2.1 Determinación del contenido de humedad.	42
2.4.2.1.1 Procedimiento	42
2.4.2.1.2 Determinación del contenido de cenizas	43
2.4.3. Limpieza.....	43
2.4.4 Secado	44
2.4.5 Trituración	45
2.4.5.1 Procedimiento	45
2.4.6 Tamizado de la cáscara de nuez	46
2.4.6.1 Procedimiento	46
2.4.7 Pruebas preliminares de concentración y temperatura	47
2.4.7.1 Determinación de la Concentración de Ácido Fosfórico	47
2.4.8 Impregnación.....	48
2.4.8.1 Procedimiento	49
2.4.9 Carbonización- Activación.....	50
2.4.9.1 Procedimiento	51
2.4.10 lavado	52
2.4.10.1 Procedimiento	52
2.4.11 Secado	53
2.5 Caracterización del Producto Obtenido.....	54
2.5.1 Determinación del Índice de azul de metileno	55
2.5.1.1 Curva de calibración de la solución de azul de metileno.....	55
2.5.1.1.1 Procedimiento	55
2.5.1.2 Decoloración de la solución de azul de metileno	56
2.5.2 Determinación del índice de yodo	58
2.5.2.1 Procedimiento	58
2.6 Aplicación del carbón activado en una muestra de agua.....	62
2.6.1 Determinación de conductividad eléctrica.....	62
2.6.1.1 Principio del método.....	63
2.6.1.2 Preparación de la muestra.....	63
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66

3.1 Resultados de la caracterización de la cáscara de nuez.....	66
3.1.1. Resultados del % humedad de la cáscara de nuez.....	66
3.1.2 Resultados de la determinación del contenido de cenizas.....	67
3.2. Resultados del índice de azul de metileno	68
3.2.1. Curva de calibración de la solución de azul de metileno	68
3.2.1.1 Procedimiento	68
3.2.2 Ecuaciones para el cálculo del índice de azul de metileno.....	70
3.2.3. Resultados de análisis del índice de azul de metileno	71
Ejemplo de la muestra M ₇	71
3.3 Resultados de la determinación de índice de yodo.....	76
3.3.1 Ecuaciones utilizadas para el cálculo del índice de yodo.....	76
3.3.2. Resultados de análisis del índice de yodo	77
3.3.3 Resultados de área superficial	82
3.4. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA.....	85
3.4.1. Balance de materia	85
3.4.1.1 Balance de materia en la etapa de lavado.....	90
3.4.1.2 Balance de materia en la etapa de secado.....	91
3.4.1.3 Balance de materia en la etapa de molienda.....	92
3.4.1.4 Balance de materia en la etapa de tamizado	93
3.4.1.5 Balance de materia en la etapa de impregnación.....	93
3.4.1.6 Balance de materia en la etapa de filtración	95
3.4.1.7 Balance de materia en la etapa de activación	96
3.4.1.8 Balance de materia en la etapa de lavado y secado	97
3.5. BALANCE DE ENERGÍA.....	98
3.5.1 Balance de energía en la etapa de secado de la materia prima	98
3.5.2. Balance de energía en la etapa de molienda.....	99
3.5.3. Balance de energía en la etapa de tamizado	99
3.5.4. Balance de energía en la etapa filtración	100
3.5.5 Balance de energía en la etapa de activación	101
3.5.6 Balance de energía en la etapa de secado.....	101
3.5.7 Balance de energía en la etapa de agitación	102
3.6 Determinación del Rendimiento del Proceso	103
3.7 Expresión de los resultados en la aplicación del carbón activado.....	104
3.7.1 Resultados de la conductividad eléctrica.....	105

3.7.1.1	Solidos disueltos totales de la muestra de agua antes de tratar ...	107
3.7.1.2	Solidos disueltos totales de la muestra de agua tratada	107
3.8	Análisis Estadístico del Diseño Factorial	107
3.8.1.	Análisis del área superficial en función al índice de yodo	108
3.8.1.1	Análisis estadístico del área superficial	109
3.8.1.2.	Análisis de varianza para el área superficial.....	109
3.8.1.3	Ecuación de regresión lineal variable área superficial.....	112
3.8.1.4	Diagrama de Pareto para el área superficial	112
3.8.1.5.	Gráficas factoriales para el área superficial.	113
3.8.2.	Análisis estadístico del % de remoción del azul de metileno.....	117
3.8.2.1	Ecuación de regresión lineal del % de remoción del azul de metileno	119
3.8.2.2	Diagrama de Pareto para el % de remoción del azul de metileno	120
3.8.2.3.	Gráficas factoriales % remoción del azul de metileno	120
3.9	Análisis de la determinación de humedad de cáscara de nuez.....	125
4.	COSTOS DEL PROYECTO	126
4.1.	Evaluación de Costos	126
4.2.	Costos de elaboración del carbón activado de cáscara de nuez.....	129
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	130
5.1.	Conclusiones	130
6.	BIBLIOGRAFIA	133
7.	ANEXOS.....	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Principales exportadores de carbón activado a nivel mundial (2022)..	4
Tabla II. Principales exportadores de carbón activado en Latinoamérica (2021-2022).....	5
Tabla III. Principales importadores de carbón activado en Latinoamérica	5
Tabla I-1 Propiedades de precursores agroindustriales.....	17
Tabla I-2. Taxonomía de la nuez	30
Tabla I-3. Composición cáscara de nuez (g/100 g de nuez)	32
Tabla II-1. Escala de Calificación Likert	34
Tabla II-2. Factores a evaluar	35
Tabla II-3. Selección del proceso de activación para la obtención	36
Experimental	36
Tabla II-4. Niveles de las variables para la obtención de carbón activado	38
Tabla II-5. Tabla de variables	38
Tabla II-6. Orden de los factores en el diseño experimental.....	39
Tabla II-7. Codificación de los experimentos	40
Tabla III-1. Determinación del % humedad de cáscara de nuez.....	66
Tabla III-2. Determinación del % promedio de humedad.	67
Tabla III-3. Lecturas de absorbancia para la curva patrón.....	68
Tabla III-4. Resultados del % de remoción del azul de metileno, réplica 1	73
Tabla III-5. Resultados del % de remoción del azul de metileno, réplica 2	74
Tabla III-6. Resultados promedio de remoción del azul de metileno	75
Tabla III-7. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 1.....	79
Tabla III-8. Resultados del cálculo del índice de yodo réplica 2.....	80
Tabla III-9. Resultados promedio del índice de yodo.....	81

Tabla III-10. Área superficial del carbón activado replica 1	83
Tabla III-11. Área superficial del carbón activado replica 2	83
Tabla III-12. Promedio área superficial	84
Tabla III-13. Corrientes del balance de materia y replica	88
Tabla III-14. Corrientes del balance de materia y replica	89
Tabla III-15. Rendimiento en masa, réplica 1.....	103
Tabla III-16. Rendimiento en masa, réplica 2.....	104
Tabla III-17. Promedio del carbón activado obtenido	104
Tabla III-18. Datos para el cálculo del Área superficial	108
Tabla III-19. Resumen del diseño factorial.....	109
Tabla III-20. Análisis de varianza, respuesta área superficial	110
Tabla III-21. Resumen del modelo	111
Tabla III-22. Coeficientes codificados variable respuesta área superficial.....	111
Tabla III-23. Resultados de la variable respuesta área superficial.....	115
Tabla III-24. Análisis de varianza variable respuesta % de remoción del azul de metileno	117
Tabla III-25. Modelo variable respuesta % de remoción del azul de metileno	118
Tabla III-26. Coeficientes codificados del % de remoción del azul de metileno	118
Tabla III-27. Resultados del % remoción del azul de metileno	123
Tabla III- 28 Estadística del % de humedad	125
Tabla IV-1. Detalle de costos de reactivos utilizados en la parte experimental y análisis del proceso de obtención de carbón activado a partir de la cáscara de nuez.....	126
Tabla IV-2. Detalle de costos de materiales	127

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro I. Empresas productoras de carbón activado para 2022.....	3
Cuadro II. Principales consumidores de carbón activado en Bolivia.....	8
Cuadro I-1. Principales aplicaciones industriales del Carbón Activado	29
Cuadro I-2. Ventajas del carbón activado a partir de cáscara de la nuez.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1. Estructura de un carbón activado.....	13
Figura I-2. Representación esquemática de la estructura de un carbón.....	13
activado.....	13
Figura I-3. Principales grupos funcionales presentes en la superficie de un	14
carbón activado	14
Figura I-4. Estructura cristalina del grafito.....	15
Figura I-5. Gránulo de carbón activado	15
Figura I-6. Obtención de carbón activado.....	18
Figura I-7. Obtención de carbón activado a través de activación Química	19
Figura I-8. Tipos de carbones activados	21
Figura I-9. Carbón Activado granular.....	21
Figura I-10. Carbón Activado en polvo	22
Figura I-11. Carbón Activado pelletizado.....	23
Figura I-12. Adsorción Física	24
Figura I-13. Fisisorción en multicapas.....	25
Figura I-14. Adsorción Química	25
Figura I-15. Cáscara de la nuez.....	31
Figura II.1 Diagrama de flujo general obtención de carbón activado de cáscara de nuez	41

Figura II-2. Recepción de nuez.....	42
Figura II-3. Secador infrarrojo.....	43
Figura II-4. Lavado.....	43
Figura II-5. Secado de la cáscara de nuez.....	44
Figura II-6. Cáscara de nuez seca	44
figura II-7. Molino de discos	45
Figura II-8. Molienda de la cáscara de nuez	45
Figura II-9. Tamiz ORTO-ALRESA.....	46
Figura II-10. Tamizado de la cáscara de nuez molida	47
Figura II.11. Prueba de concentración al 85%.....	47
Figura II.12. Prueba de concentración al 60 %.....	48
Figura II-13. Impregnación.....	49
Figura II-14. Cáscara de nuez impregnada	49
Figura II-15. Cáscara de nuez impregnada	50
Figura II-16. Carbonización.....	51
Figura II-17. Cáscara de nuez carbonizada.....	52
Figura II-18. Lavado.....	53
Figura II-19. Lectura de pH.....	53
Figura II-20. Secado del Carbón activado	54
Figura II-21. Pesado del carbón activado	54
Figura II-22. Curva de calibración.....	55
Figura II-23. Espectrofotómetro.....	56
Figura II-24. Agitación	57
Figura II-25. Filtrado	57
Figura II-26. Decoloración del azul de metileno	58

Figura II-27. Ebullición del HCl con carbón activado	59
Figura II-28. filtración	59
Figura II-29. llenado de Bureta con tiosulfato de sodio.....	60
Figura II-30. Solución de almidón.....	61
Figura II-31. Tonalidad de color azul	61
Figura II-32. Titulación.....	62
Figura II-33. Acondicionamiento de la muestra	63
Figura II-34. Carbón activado de cáscara de nuez.....	64
Figura II- 35. Carbón activado en la muestra de agua	64
Figura II-36. Agitación del carbón.....	65
Figura II-37. Medida de la Conductividad.....	65
Figura. III-1. Curva de Calibración y ecuación de concentración.....	69
Figura III-2. Diagrama de flujo del balance de materia general para la obtención experimental de carbón activado de cáscara de nuez.....	87
Figura III-3. Diagrama de flujo en la etapa de selección de la materia prima ..	90
Figura III-4. Diagrama de flujo en la etapa de secado.....	91
Figura III-5. Diagrama de flujo en la etapa de molienda.....	92
Figura III-6. Diagrama de flujo en la etapa de tamizado	93
Figura III-7. Diagrama de flujo en la etapa de impregnación.....	94
Figura III-8. Diagrama de flujo en la etapa de filtración	95
Figura III-9. Diagrama de flujo en la etapa de activación	96
Figura III-10. Diagrama de flujo en la etapa de lavado y secado del carbón activado de cáscara de nuez.....	97
Figura III-11 Tabla de conductividad eléctrica y solidos disueltos totales.....	105
Figura III-12 Resultado de la conductividad eléctrica	106

Figura III-13. Diagrama de Pareto	112
figura III-14. Diagrama de efectos principales de área superficial	113
Figura III-15. Gráfica normal de efectos estandarizados para área superficial	114
Figura III-16. Probabilidad normal variable respuesta área superficial	114
Figura III-17. Grafica de series de tiempo de ajustes	116
Figura III-18. Gráfica de cubos (medias ajustadas) del área superficial	116
Figura III-19. Gráfica normal para el % de remoción del.....	119
Figura III-20. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	120
Figura III-21. Efectos principales del % de remoción del azul de metileno	121
Figura III-22. Residuo vs orden.....	122
Figura III-23. Grafica de probabilidad normal	122
Figura III-24. % de remoción del azul de metileno vs ajustes	124
Figura III-25. Gráfica de cubos.....	124
Figura III- 26. Histograma del % humedad	125

ANEXOS

Anexo 1: Especificación de equipos y materiales utilizados en la parte experimental	141
Anexo 2: Método de prueba estándar para la determinación de índice de yodo del carbón activado (ASTM D 4607-14).....	145
Anexo 3: (NORMA NTE INEN 1988, 2013), productos químicos industriales. Carbón activado para uso industrial. Determinación del número de yodo	149
Anexo 4: Determinación del índice de yodo.....	152
Anexo 5: Tabla de factor de corrección para el número de yodo	154
Anexo 6: Determinación de índice de azul de metileno	155
Anexo 7: Resultados del CEANID de contenido de cenizas de la cáscara de nuez.	156
Anexo 8 Galería de fotos	157

SIGLAS Y/O ABREVIACIONES

CA= Carbón activado

CAG = Carbón activado granular

CAP = Carbón activado en polvo

ΔH_{ads} = Delta H de adsorción

ΔH_{Hans} = Delta H de adsorción para la primera capa

ΔH°_{ads} = Delta H estándar de adsorción

ASTM = American Society for Testing and Materials (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales).

BET = (Método de Brunauer - Emmett -Teller)

Mosh = Escala de Mohs de dureza mineral.

Bs = bolivianos.

CEANID = Centro de Análisis Investigación y Desarrollo, dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología perteneciente a la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” (UAJMS) Tarija – Bolivia.

CEVITA = Centro Vitivinícola Tarija.

ISO = International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización o Estandarización).

ITC = International Trade Centre (Centro de Comercio Internacional).

IUPAC = Unión Internacional de Química Pura y Aplicada.

LOU = Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química.

UAJMS = Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

INIAF= Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal

USD = Dólar estadounidense.

N = Concentración Normal.

$\mu mho/cm$ = micromhos por centímetro

$\mu\text{S/m}$ = microsiemens por metro

SI = Sistema Internacional de unidades.

$^{\circ}\text{C}$ = Grado Celsius.

% = Porcentaje.

h = Hora.

min = Minuto.

Rpm = Revolución por minuto.

l = Litro.

ml = Mililitro.

cm = Centímetro.

cm^3 = Centímetro cúbico.

m^2 = Metro cuadrado.

m^3 = Metro cúbico.

mm = Milímetro.

nm = Nanómetro.

g = Gramo.

kg = Kilogramo.

mg = Miligramo.

p/v = Gramo de soluto/mililitro de solución.

kcal/mol = Kilocaloría por mol.

kW = kilovatios.

kWh = Kilovatio hora

kJ = Kilojulios.

H_2 = Hidrógeno molecular.

H_2O = Agua.

H_3PO_4 = Ácido fosfórico.

HCl = Ácido clorhídrico.

K = Potasio.

KCl = Cloruro de potasio

KOH = Hidróxido de potasio.

N_2 = Nitrógeno molecular.

Na = Sodio.

NaOH = Hidróxido de sodio.

O_2 = Oxígeno molecular.

ZnCl_2 = Cloruro de zinc.

SDT = sólidos disueltos totales