

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



ELABORACIÓN DE PLÁSTICO BIODEGRADABLE

A PARTIR DE LA QUINUA BLANCA PRODUCIDA EN BOLIVIA

Por:

MARIA DE LOS ÁNGELES ESCALANTE 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.**

Septiembre de 2025

TARIJA-BOLIVIA

VºBº

MSc. Ing. Marcelo Segovia Cortez

DECANO FACULTAD DE CIENCIAS
Y TECNOLOGÍA

MSc.Ing. Fernando Erick Cortez Michel

VICEDECANO FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

Ing. Juan Carlos Kéri Mentasti

Msc. Ing. Marlene Beatriz Simons Sanchez

Ing. Luis Fernando Zenteno Benítez

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

Primeramente, a Dios por iluminar mi camino, fortaleciendo mi fé, por su protección espiritual y guiando mis pasos, por ayudarme a concluir con mi tesis y otras metas, que a pesar de los tropiezos que di.

Él estuvo siempre conmigo y a mis padres, hermanos, por estar siempre a mi lado, por su cariño y por ser mi refugio en los momentos difíciles. Los amo mucho.

Agradecimiento

Agradecer a Dios por todas las oportunidades que me ha dado, por las pruebas que me ha ayudado a superar. Gracias por constante protección, por su amor inquebrantable y por su gracia infinita. A mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. A mis docentes, amigos que estuvieron ahí conmigo para salir adelante, a quienes les doy las gracias.

“Todo lo que Dios hace es bueno, todo lo que
Dios permite es necesario”

Job 2:10

INDICE

Advertencia	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Pensamiento	v

INTRODUCCIÓN

Antecedentes	1
Objetivos	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos.....	8
Justificación.....	8
Justificación tecnológica	8
Justificación económica	9
Justificación social	9
Justificación ambiental.....	9
Justificación personal	9

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Origen de la quinua blanca.....	10
1.2 Características de la quinua blanca	11
1.2.1 Taxonomía.....	11
1.2.2 Composición Nutricional	11
1.2.3 Variedades de la quinua.....	12
1.3 Almidón.....	13

1.3.1 Estructura del almidón	13
1.3.1.1 Amilosa.....	14
1.3.1.2 Amilopectina	14
1.3.2 Gelatinización del almidón.....	15
1.3.3 Retrogradación del almidón	15
1.3.4 Solubilidad y capacidad de hinchamiento	16
1.4 Plastico Biodegradable.....	16
1.5 Plastificantes	17
1.5.1 Glicerina	17
1.5.2 Agua destilada.....	17
1.6 Ácido acético.....	18
1.7 Factores que requieren control durante la gelatinización del almidón para la obtención de plástico biodegradable	18
1.7.1 Agitación	18
1.7.2 Temperatura.....	18
1.8 Métodos para obtener plástico biodegradable.....	19
1.8.1 Método brasileño.....	19
1.8.2 Método por extrusión	19
1.8.3 Método termo mecánico.....	21
1.8.4 Método con almidón modificado por acetilación.....	24
1.8.5 Método Casting	29
1.9 Aplicaciones del plástico biodegradable	32
1.9.1 Envasado de alimentos	32
1.9.2 Embalaje textil	32
1.9.3 Envases cosméticos	32

1.9.4 Dispositivos médicos y productos farmacéuticos	32
1.10 Características a considerar para la caracterización del plástico biodegradable .	32
1.10.1 Espesor	32
1.10.2 Modulo tensil	33
1.10.3 Solubilidad	33
1.10.4 Permeabilidad de vapor de agua	34
1.10.5 Biodegradación	35
1.11 Estudios previos para la elaboración de plástico biodegradable	36
1.12 Aspectos ambientales y económicos	39
1.12.1 Aspectos ambientales del plástico biodegradable	39
1.12.2 Aspectos económicos del plástico biodegradable	40

CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Introducción marco metodológico y parte experimental.....	42
2.1.1 Método de la investigación	42
2.1.2 Método experimental (cuantitativo).....	42
2.1.3 Método documental.....	43
2.1.4 Justificación de la metodología.....	43
2.2 Muestreo	43
2.2.1 Procedencia de las muestras	44
2.2.2 Estrategia de muestreo aleatorio simple.....	44
2.2.3 Criterios de la selección de la muestra	44
2.2.4 Tamaño de la muestra.....	45
2.2.5 Justificación del muestreo	45
2.3 Selección del método de proceso para la elaboración de plástico biodegradable .	46

2.3.1 Evaluación de métodos y procesos	48
2.3.1.1 Calificación de los métodos para la elaboración del plástico biodegradable..	50
2.3.2 Equipos.....	51
2.4 Descripción del proceso de obtención de plástico biodegradable a partir del almidón de quinua blanca.....	53
2.4.1 Extracción del almidón de la quinua blanca	53
2.4.1.1 Recepción y pesado.....	54
2.4.1.2 Limpieza.....	55
2.4.1.3 Lavado.....	55
2.4.1.4 Remojo	56
2.4.1.5 Triturado y filtrado	56
2.4.1.6 Centrifugación.....	57
2.4.1.7 Secado	58
2.4.1.8 Molienda	59
2.4.1.9 Tamizado	59
2.4.1.10 Almacenado.....	60
2.4.2 Proceso de obtención del plástico biodegradable.....	61
2.4.2.1 Recepción y Pesado del Almidón de Quinua Blanca	62
2.4.2.2 Hidratación del almidón.....	62
2.4.2.3 Plastificación térmica del almidón	63
2.4.2.4 Moldeado	63
2.4.2.5 Secado	64
2.4.2.6 Enfriado y Desmoldeado.....	64
2.4.2.7 Almacenado.....	65
2.5 Selección de variables del proceso experimental.....	66
2.5.1 Desarrollo de las pruebas preliminares	66
2.5.2 Variable temperatura	67
2.5.3 Variable Ácido acético	68
2.5.4 Variable Glicerina.....	70

2.6 Diseño Experimental	73
2.7 Recolección de datos	75
2.7.1 Recopilación de datos en la plastificación térmica del almidón	76
2.7.2 Recopilación de datos en el moldeado, secado, enfriado y desmoldado.....	77
2.7.3 Recopilación de datos del módulo tensil del plástico biodegradable.....	78

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 Introducción al análisis y discusión de resultados	100
3.2 Presentación de los resultados de la caracterización de la quinua blanca	100
3.3 Presentación de los resultados del plástico biodegradable.....	101
3.3.1 Análisis sensorial del plástico Biodegradable	101
3.3.2 Resultados del Módulo Tensil del plástico biodegradable	105
3.3.3 Resultados del espesor del plástico biodegradable	109
3.3.4 Resultados de la solubilidad del plástico biodegradable	109
3.3.5 Resultados de la permeabilidad de vapor de agua del plástico biodegradable.	110
3.3.6 Resultados de la biodegradación del plástico biodegradable	115
3.3.6.1 Biodegradación en tierra	115
3.3.6.2 Biodegradación en aire.....	116
3.3.6.3 Biodegradación en agua	117
3.4 Análisis comparativo con estándares comerciales	120
3.5 Análisis estadístico.....	122
3.5.1 Influencia de la temperatura, volumen de glicerina y volumen de ácido acético en el módulo tensil	122
3.5.2 Análisis estadístico de la variable respuesta módulo tensil.....	123
3.5.3 Análisis de varianza (ANOVA).....	124
3.5.4 Ecuación de la regresión lineal de la variable respuesta modulo tensil	126
3.5.5 Diagrama Pareto	127
3.5.6 Graficas factoriales para el módulo tensil	131
3.6 Discusión preliminar	133

3.7 Resumen de los resultados	135
3.7.1 Caracterización de la materia prima.....	135
3.7.2 Caracterización del plástico biodegradable.....	135

CAPITULO IV

BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA

4.1 Balance de materia para el proceso de obtención de plástico biodegradable.....	137
4.1.1 Balance de materia en la etapa de limpieza.....	139
4.1.2 Balance de materia en la etapa de lavado.....	139
4.1.3 Balance de materia en la etapa de remojo	141
4.1.4 Balance de materia en la etapa de triturado y filtrado.....	142
4.1.5 Balance de materia en la etapa de centrifugación	143
4.1.6 Balance de materia en la etapa de secado	144
4.1.7 Balance de materia en la etapa de molienda	145
4.1.8 Balance de materia en la etapa de tamizado.....	146
4.1.9 Balance de materia en la etapa de hidratación del almidón	149
4.1.10 Balance de materia en la plastificación térmica del almidón	150
4.1.11 Balance de materia en la etapa de moldeado.....	152
4.1.12 Balance de materia en el secado.....	153
4.1.13 Balance de materia en la etapa de enfriado y desmoldado.....	155
4.2 Balance de energía.....	156
4.2.1 Balance de energía en la etapa de triturado.....	158
4.2.2 Balance de energía en la etapa de centrifugado	158
4.2.3 Balance de energía en la etapa de secado del almidón.....	159
4.2.4 Balance en la etapa de hidratación del almidón	160
4.2.5 Balance de energía en la etapa de plastificación térmica del almidón	160
4.2.6 Balance de energía en la etapa de secado.....	161
4.3 Determinación del rendimiento	162
4.4 Evaluación de costos	162
4.4.1 Costos directos	162
4.4.2 Costos indirectos	165

4.4.3 Costo total	165
-------------------------	-----

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones	166
5.2 Recomendaciones.....	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cantidad importada en toneladas de los principales países importadores	6
Tabla 2 Cantidad exportada en toneladas de los principales países exportadores	6
Tabla I-1 Taxonomía de la Quinua	11
Tabla I-2 Composición Nutricional de la Quinua	12
Tabla I-3 Aditivos y funciones para elaborar bioplástico.....	27
Tabla I-4 Cuadro comparativo de alternativas	39
Tabla II-1 Ventajas y Desventajas	46
Tabla II-2 Escala de Calificación del 1-10.....	48
Tabla II-3 Ponderación de los factores considerados para la elaboración de plástico biodegradable mediante el método clásico y método almidón modificado por acetilación	49
Tabla II-5 Especificaciones de los equipos utilizados en el desarrollo experimental .	51
Tabla II-6 Variable temperatura.....	67
Tabla II-7 Variable ácido acético.....	69
Tabla II-8 Variable glicerina.....	71
Tabla II-9 Factores y dominio experimental	74
Tabla II-10 Matriz de Experimentos	74
Tabla II-11 Codificación de los experimentos de obtención del plástico biodegradable a partir de la quinua blanca	75
Tabla II-12 Datos en la plastificación térmica del almidón	76
Tabla II-13 Datos de moldeado, secado, enfriado y desmoldado	77
Tabla II-14 Datos de espesor y área	78
Tabla II-15 Datos del modulo tensil del plastico biodegradable	79

Tabla II-16 Datos del módulo tensil del plástico biodegradable.....	80
Tabla II-17 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable.....	81
Tabla II-18 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable.....	82
Tabla II-19 Datos del módulo del plástico biodegradable	83
Tabla II-20 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable.....	84
Tabla II-21 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable.....	85
Tabla II-22 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable.....	86
Tabla II-23 Datos del módulo tensil de cada replica.....	99
Tabla III-1 Caracterización fisicoquímica de la quinua blanca.....	100
Tabla III-2 Escala de calificación.....	102
Tabla III-3 Evaluación de las formulaciones	102
Tabla III-4 Puntuación de los atributos organolépticos.....	103
Tabla III-5 Resultados del Módulo Tensil del Plástico Biodegradable	107
Tabla III-6 Propiedades mecánicas del plástico biodegradable del experimento 2 en base a los rangos establecidos	108
Tabla III-7 Resultados de la medición del espesor.....	109
Tabla III-8 Resultados de la solubilidad.....	110
Tabla III-9 Datos para la determinación de la permeabilidad de vapor de agua	112
Tabla III-10 Resultados del flujo de vapor de agua	114
Tabla III-11 Resultados de la permeabilidad de vapor de agua	115
Tabla III-12 Resultados de la pérdida de peso de la biodegradación en tierra.....	116
Tabla III-13 Resultados de la pérdida de peso de la biodegradación en aire	117
Tabla III-14 Resultados de la biodegradación en agua	118
Tabla III-15 Comparación del porcentaje de biodegradación Tierra-Agua-Aire	119
Tabla III-16 Comparación con estándares comerciales	121
Tabla III-17 Diseño factorial variable respuesta rendimiento	123
Tabla III-18 Coeficientes codificados variable respuesta modulo tensil	124
Tabla III-19 Coeficientes codificados variable respuesta modulo tensil 2	125
Tabla III-20 Resumen del modelo.....	125
Tabla III-21 Análisis de varianza (ANOVA) para el módulo tensil con un nivel de significancia de 5 %	126
Tabla III-22 Resultados de la variable respuesta modulo tensil.....	129

Tabla IV-1 Nomenclatura utilizada en el balance de materia.....	137
Tabla IV-2 Corrientes del balance de materia para cada experimento y replica	147
Tabla IV-3 Corrientes del balance de materia para cada experimento y replica	148
Tabla IV-4 Masa promedio de la mezcla de plástico biodegradable obtenido	150
Tabla IV-5 Masa promedio de la mezcla de plástico biodegradable	152
Tabla IV-6 Masa promedio del plástico biodegradable luego del secado	154
Tabla IV-7 Masa promedio del plástico biodegradable final	155
Tabla IV-8 Costos de materia prima y reactivos	163
Tabla IV-9 Costos de materiales.....	163
Tabla-10 IV Análisis fisicoquímicos	164
Tabla IV-11 Costos de energía eléctrica	164
Tabla IV-12 Resumen costos directos	165
Tabla IV-13 Costos indirectos	165
Tabla IV-14 Resumen costo total	165
Tabla V-1 Caracterización de la mejor muestra (Experimento N° 2).....	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Producción Mundial de Bioplásticos 2024-2029	2
Fig. 2 Distribución mundial de producción de bioplásticos.....	3
Fig. 3 Producción de Quinua en Bolivia, 2019-2023 (En toneladas).....	7
Fig. 4 Participación de la producción de quinua, por departamento	7
Fig. I-1 La Quinua.....	10
Fig. I-2 Almidón.....	13
Fig. I-3 Amilosa	14
Fig. I-4 Amilopectina	15
Fig. I-5 Bioplástico	16
Fig. I-6 Diagrama por el método por extrusión.....	19
Fig. I-7 Diagrama del proceso termo mecánico	22
Fig. I-8 Diagrama del método con almidón modificado por acetilación	25
Fig. I-9 Reacción química del almidón modificado por acetilación	26

Fig. I-10 Diagrama del Método Casting	29
Figura II-1 Diagrama de flujo de extracción de almidón de la quinua blanca.....	54
Fig. II-2 Diagrama de flujo de elaboración de plástico biodegradable a partir del almidón de quinua blanca.....	61
Fig. II-3 Variación del módulo tensil frente a la temperatura	68
Fig. II-4 Variable ácido acético	70
Figura II-5 Variable Glicerina	72
Fig. II-6 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y1	87
Fig. II-7 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y9	87
Fig. II-8 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y17	88
Fig. II-9 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y2	88
Fig. II-10 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y10	89
Fig. II-11 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y18.....	89
Fig. II-12 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y3	90
Fig. II-13 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y11	90
Fig. II-14 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y19	91
Fig. II-15 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y4	91
Fig. II-16 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y12	92
Fig. II-17 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y20	92
Fig. II-18 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y5	93
Fig. II-19 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y13	93
Fig. II-20 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y21	94
Fig. II-21 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y6	94
Fig. II-22 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y14	95
Fig. II-23 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y22	95
Fig. II-24 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y7	96
Fig. II-25 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y15	96
Fig. II-23 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y23	97
Fig. II-24 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y8	97
Fig. II-25 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y17	98
Fig. II-26 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y24	98

Fig. III-1 Representación gráfica del análisis sensorial	104
Fig. III-2 Peso vs tiempo de la muestra Y2.....	113
Fig. III-3 Peso vs tiempo de la muestra Y10.....	113
Fig. III-4 Peso vs tiempo de la muestra Y18.....	114
Fig. III-5 Comparación biodegradación Tierra-Agua-Aire	120
Fig. III-3 Diagrama de Pareto del proceso de elaboración de plástico biodegradable	127
Fig. III-4 Gráfica de probabilidad normal.....	128
Fig. III-5 Comparación gráfica del módulo tensil experimental y el módulo tensil ajustado	130
Fig. III-6 Efectos principales para el módulo tensil.....	131
Fig. III-7 gráfica de interacción AB	132
Fig. III-8 gráfica de interacción BC	132
Fig. III-9 Gráfica de cubos (medias ajustadas) del módulo tensil.....	133
Fig. IV-1 Diagrama del balance de materia del proceso de obtención del plástico biodegradable	138
Fig. IV-2 Diagrama de flujo en la etapa de limpieza	139
Fig. IV-3 Diagrama de flujo en la etapa de lavado.....	140
Fig. IV-4 Diagrama de flujo en la etapa de remojo	141
Fig. IV-5 Diagrama de flujo en la etapa de triturado y filtrado.....	142
Fig. IV-6 Diagrama de flujo en la etapa de centrifugado	143
Fig. IV-7 Diagrama de flujo en la etapa de secado	144
Fig. IV-8 Diagrama de flujo en la etapa de molienda	145
Fig. IV-9 Diagrama de flujo en la etapa de tamizado.....	146
Fig. IV-10 Diagrama de flujo en la etapa de hidratación del almidón	149
Fig. IV-11 Diagrama de flujo en la etapa de plastificación térmica del almidón.....	151
Fig. IV-12 Diagrama de flujo en la etapa de moldeado	153
Fig. IV-13 Diagrama de flujo en la etapa de secado	154
Fig. IV-14 Diagrama de flujo en la etapa de enfriado y desmoldado.....	155
Fig. IV-15 Diagrama del balance de energía del proceso de obtención del plástico biodegradable a partir de la quinua blanca.....	157

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía II-1 Recepción de la Quinua Blanca.....	55
Fotografía II-2 Limpieza de la Quinua Blanca	55
Fotografía II-3 Lavado	56
Fotografía II-4 Remojo de la Quinua Blanca.....	56
Fotografía II-5 Triturado y Filtrado	57
Fotografía II-6 Centrifugación	58
Fotografía 2-7 Secado	58
Fotografía II-8 Molienda.....	59
Fotografía II-9 Tamizado	60
Fotografía II-10 Almacenado	60
Fotografía II-11 Pesado del Almidón de Quinua Blanca	62
Fotografía II-12 Mezcla de Insumos	62
Fotografía II-13 Agitación de la Mezcla	63
Fotografía II-14 Moldeado.....	63
Fotografía II-15 Secado.....	64
Fotografía II-16 Desmoldeado del Plastico Biodegradable	64
Fotografía II-17 Plastico Biodegradable	65
Fotografía II-18 Experimentos realizados.....	65
Fotografía III-1 Análisis sensorial del plástico biodegradable.....	101
Fotografía III-2 Determinación de las propiedades mecánicas del plástico biodegradable	106
Fotografía III-3 Biodegradación en tierra-aire-agua del plástico biodegradable	119

ANEXOS

Anexo 1 Análisis fisicoquímico de la quinua blanca	179
Anexo 2 Test sensorial del plástico biodegradable	180
Anexo 3 Medición del espesor.....	181
Anexo 4 Determinación de la solubilidad.....	182
Anexo 5 Determinación de la permeabilidad de vapor de agua.....	183
Anexo 6 Tabla de presión de vapor saturado	184

ABREVIATURAS

Centro de Análisis Investigación y Desarrollo	CEANID
Imperial Chemical Industries	ICI
Parque Industrial Latinoamericano	PILAT
Departamento	Dpto
Food and Agriculture Organization	FAO
Antes de Cristo	A.C.
Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras	MDRyT
Instituto Nacional de Estadística	INE
Laboratorio de Operaciones Unitarias	L.O.U
Instituto Tecnológico del Plástico	IMPLAS
Agua	H ₂ O
Grupo hidroxilo	-OH
Ácido Acético	CH ₃ -COOH
Glicerina	C ₃ H ₈ O ₃
American National Standards Institute	ASTM
International Organization for Standardization	ISO
Instituto Ecuatoriano de Normalización	INEN

UNIDADES

Grados Celsius	°C
Gramo	g
Hora	h
Minutos	min
Mililitros	mL
Porcentaje	%
Revoluciones por minuto	rpm
Mega pascal	Mpa
Kilo pascal	Kpa
Kilogramo	kg
Kilojoule	kJ
Kilocalorías	kcal
Centímetros	cm
Gramo por mililitro	g/mL
Metro	m
Kilovatio	kW-h
Kilovato-hora	kW
Bolivianos	Bs
Litros	L
Metro cuadrado	m ²