

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES.

El desarrollo histórico de técnicas de extracción a escala industrial y laboratorio del almidón de yuca ha sido una parte fundamental en la evolución de este proceso. Inicialmente, se empleaban métodos tradicionales de extracción, como la maceración y el prensado, utilizados por diversas culturas para obtener almidón de yuca de forma rudimentaria. Con el tiempo, se ha avanzado hacia el desarrollo de técnicas más sofisticadas a escala industrial, que han permitido optimizar la eficiencia y el rendimiento en la extracción de almidón de yuca para su uso en diversas industrias. Paralelamente, en el ámbito de laboratorio, se han desarrollado métodos y equipos especializados para realizar extracciones a pequeña escala, lo que ha facilitado la investigación y experimentación para mejorar la calidad y pureza del almidón obtenido. Según la (FAO, 2007) esta evolución histórica en las técnicas de extracción ha contribuido significativamente al conocimiento y aplicación del almidón de yuca en diferentes campos industriales y científicos.

El método más comúnmente utilizado para la caracterización del almidón es el método de la (AOAC 1995) que se utiliza para la determinación de la humedad, proteínas, lípidos y cenizas en diferentes tipos de muestras, incluyendo productos alimentarios como cereales, harinas, carnes, lácteos, entre otros. La determinación de humedad es crucial en la industria alimentaria, ya que afecta directamente la estabilidad, calidad, y vida útil de los productos.

Entre las técnicas analíticas comúnmente utilizadas se pueden optar por, la calorimetría de barrido diferencial (DSC), que estudia las transiciones térmicas del almidón y proporciona información sobre su estabilidad y capacidad de retención de agua. Por su parte, el análisis termo gravimétrico (TGA) se enfoca en la estabilidad térmica y la descomposición del almidón, mientras que el infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) permite identificar los grupos funcionales y analizar la composición química del almidón.

En cuanto a las investigaciones sobre el almidón de yuca o mandioca, en Bolivia existen trabajos que hablan sobre la extracción de almidón de yuca como es el caso del artículo (Cobana & Antezana , 2007). Por otra parte, el 2019 se realizó un Trabajo Final de Procesos Industriales del Almidón de Yuca hecho por Carlos E. Flores Daza.

De la misma manera la Revista Estudiantil AGRO-VET, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés presentó un artículo de investigación “Extracción de Almidón de Papa (*Solanum tuberosum*), Yuca (*Manihot esculenta*), CAMOTE (*Ipomoea batatas*)” realizado por Adriana Coronel Calisaya y Gladys J. Chipana Mendoza el año 2022 en la ciudad de La Paz.

De acuerdo con datos estadísticos de exportaciones de la página de Cultivos y productos de ganadería se tiene datos sobre los más grandes productores y exportadores de almidón de yuca a nivel mundial y continental de la gestión 2022.

Tabla IND-1 Principales 10 productores a nivel mundial de Almidón de yuca.

País	Valor [Tn/año]
Tailandia	3.631.043,31
Vietnam	1.713.542,01
Indonesia	13.589,76
India	5.240,85
Mozambique	1.014,00
Ghana	898,37
Nigeria	286,47
República Democrática del Congo	134,84
Angola	101,42
Camboya	45,23

Fuente: (FAO, 2022)

Tabla IND-2 Principales productores de Almidón de yuca del Continente Americano

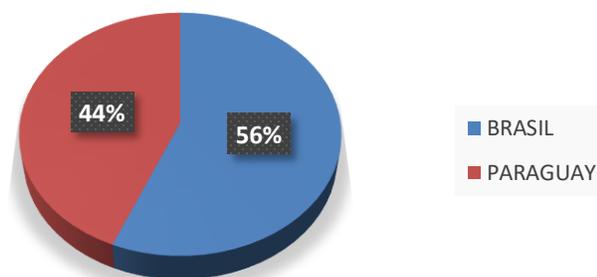
País	Valor [Tn/año]
Brasil	43.637,56

Paraguay	33.873,42
Nicaragua	9.317,09
Estados Unidos de América	3.389,44
Colombia	502,18
Canadá	150,05
Ecuador	47,21
Guatemala	32,40
Perú	22,11
Costa Rica	20,03

Fuente: (FAO, 2022)

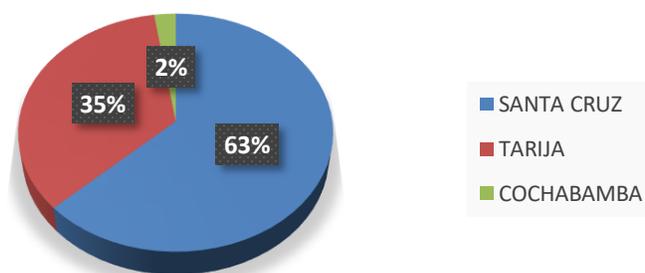
Por otra parte, en Bolivia podemos mencionar que hay una gran participación en las importaciones de productos de Almidón de Yuca por distintas compañías del vecino País Paraguay tales como: Productores Unidos del Sur (Prodosur S.A.), Compañía de Desarrollo y de Industrialización de Productos Primarios S.A (CODIPSA) y Compañía Procesadora de Productos Agrícolas (CPA). Estos productos (Almidón de yuca o mandioca) son comercializados en los distintos departamentos por importadoras como: Genmsa Bolivia de Santa Cruz que está funcionando desde el año 2015, Alimtecnico S.R.L. con central y almacenes en la ciudad de Cochabamba los cuales realizan envíos a nivel nacional y Esenciales Aditivos Alimenticios presentes tanto en los departamentos de Santa Cruz y Tarija, estos últimos importan el almidón de yuca del vecino país Brasil. Entre otras personas afines al rubro que importan el almidón de yuca por sus propios medios y los venden de manera particular en los distintos mercados del país por ejemplo la venta de Almidón de yuca de la empresa brasilera Dioka en el mercado campesino de la ciudad de Tarija.

Fig. IND-1 Países de origen de importación de Almidón de Yuca (Mandioca) a Bolivia periodo 2021-2023



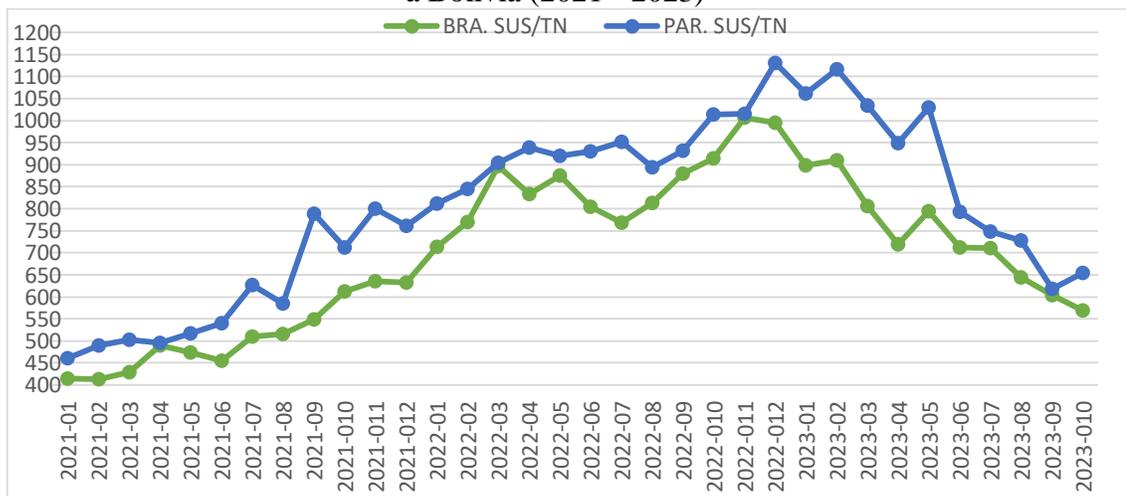
Fuente: (INE & COMEX, 2023)

Fig. IND-2 Departamentos de destino de importación de Almidón de Yuca (Mandioca) a Bolivia periodo 2021-2023



Fuente: (INE & COMEX, 2023)

Fig. IND-3 Importaciones precio mensual (Sus/Tn) de Almidón de Yuca (Mandioca) a Bolivia (2021 - 2023)



Fuente: (INE & COMEX, 2023)

En Bolivia, en cuanto a la producción nacional de almidón de yuca o mandioca de acuerdo a (Amarket, 2023), se tienen datos de comercialización en distintas presentaciones de empresas envasadoras y fraccionadoras como: Miki Almidón De Yuca 400 g de Industrias Pacheco SRL en Santa Cruz, Cocinero Almidón de Yuca Bolsa 250 g de Productos Cocinero de Molinos Pereira SRL en Sucre y Bloch Almidón De Yuca Bolsa 400 g de Industrial Comercial Bloch en Cochabamba.

Adicionalmente el pasado 16 de septiembre de 2023, el presidente Luis Arce participó en el colocado de la piedra fundamental para la construcción de la Planta Procesadora de Yuca en la localidad de San Miguel de Velasco en departamento de Santa Cruz, el proyecto cuenta con una inversión 15,20 millones de bolivianos. Se estima que la Planta generará ingresos anuales de 28,00 millones de bolivianos y, consecuentemente, logrará un ahorro de alrededor de 4,10 millones de dólares al año en sustitución de importaciones. (Villca, 2022).

Sobre la materia prima, la yuca es originaria de América del Sur y Central, donde ha sido cultivada durante milenios por las poblaciones indígenas. Según el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (PRIICA, 2016, p. 11). La yuca se cultiva en muchas partes del mundo tropical y subtropical, incluyendo África, Asia y América del Sur. En esta última región, su distribución actual se extiende desde Arizona, Estados Unidos, hasta la cuenca del río de la Plata en Argentina. La yuca es un cultivo de gran importancia en áreas con suelos ácidos y condiciones climáticas desfavorables.

Tabla IND-3 Principales 10 productores a nivel mundial de Mandioca (yuca)

Posición	País	Porcentaje de producción mundial
1	Nigeria	18,41%
2	República Democrática del Congo	14,76%
3	Tailandia	10,31%
4	Ghana	7,75%

5	Camboya	5,36%
6	Indonesia	4,11%
7	Vietnam	3,22%
8	Angola	3,19%
9	India	2,56%
10	Mozambique	1,96%

Fuente: (Tridge, 2022)

En cuanto al continente americano se llega a denotar que Brasil es el país que más mandioca produce, con 17.648.564 toneladas, lo que representa el 72,16% de la producción americana no obstante gracias a la página de estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO podemos describir los 10 mayores productores de yuca del continente americano filtrando los resultados en función de la Producción y la existencia de la yuca fresca.

Tabla IND-4 Principales 10 productores a nivel continental de Yuca

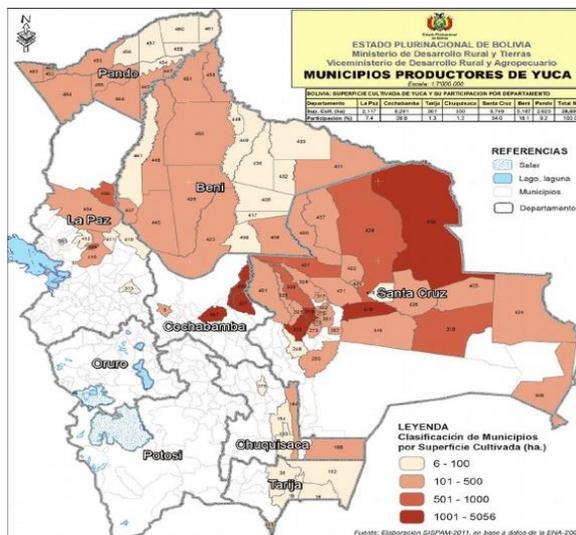
Posición	País	Cantidad en Toneladas
1	Brasil	17.648.564,03
2	Paraguay	2.617.980,05
3	Perú	1.389.831,11
4	Cuba	1.185.461,65
5	Colombia	1.019.021,16
6	Venezuela	378.873,44
7	República Dominicana	176.405,89
8	Ecuador	146.299,78
9	México	26.892,46
10	Guatemala	3.157,92

Fuente: (FAO, 2022)

Por otra parte, de acuerdo con (Mayta Riveros & Manzaneda Delgado, 2023) en Bolivia podemos denotar que existen regiones potencialmente productivas dedicadas al cultivo de la yuca: Beni, Pando, Yungas, Santa Cruz y Chapare. Actualmente se

siembran 47.000 hectáreas en todo el país, de las cuales un 80% se cultivan en el departamento de Santa Cruz.

Fig. IND-4 Municipios Productores de Yuca en Bolivia



Fuente: MDRyT; SISFAM, 2011

En cuanto a la Ciudad de Tarija este tubérculo se llega a producir en la segunda sección de la provincia Arce (Bermejo) y el Chaco, lamentablemente la yuca de estas regiones sólo se produce en un periodo de tiempo que abarca del mes de Junio al mes de Diciembre.

Para poder acceder a este tubérculo en la ciudad de Tarija los doce meses del año los comerciantes hacen llegar su producción de yuca de las regiones los Yungas (La Paz) y de Santa Cruz principalmente.

La yuca es catalogada como la más importante dentro de este grupo de plantas de interés económico (raíces y tubérculos), su producción se dirige fundamentalmente a cuatro mercados según los usos principales del mismo: como raíz fresca y procesada para consumo humano, como insumo en la industria alimenticia, como materia prima en la industria productora de alimentos balanceados para animales y como producto intermedio en la industria no alimenticia.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar un método eficiente para la extracción de almidón a partir de la yuca amarilla (*Manihot esculenta* Crantz) a escala laboratorio, evaluando las variables que afectan el rendimiento del producto.

Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas de la yuca como materia prima.
- Seleccionar y diseñar un procedimiento experimental para la extracción de almidón.
- Evaluar la influencia de las variables de operación.
- Desarrollar la metodología de investigación del proceso experimental de extracción de almidón.
- Realizar balance de materia y energía en el proceso de extracción de almidón de yuca.
- Caracterizar las propiedades físicas y químicas del almidón de yuca.
- Analizar la humedad final del producto con el propósito de obtener una mayor conservación.
- Comparar las características del almidón extraído, con estándares comerciales.
- Determinar costos en el proceso experimental para la obtención de almidón de yuca.

JUSTIFICACIÓN

Justificación tecnológica

La obtención de almidón de yuca permitirá emplear el uso de tecnologías contemporáneas presentes en equipos como la centrifugadora, trituradora mecánica y estufa a nivel de laboratorio, lo que permite optimizar procesos, mejorar la calidad del producto y analizar los resultados en términos de parámetros físicos y químicos. Esto garantiza la eficiencia, precisión y rendimiento en la extracción del almidón para su posterior evaluación.

Justificación económica

El desarrollo del presente proyecto permite contribuir a la generación de mayores recursos dado que la versatilidad del almidón lo convierte en un ingrediente valioso, en la producción de una amplia gama de productos, la información que proporciona el proceso de esta investigación contribuirá a generar un valor agregado en caso de desarrollar una réplica adaptada a una mayor escala cooperando al movimiento económico.

Justificación ambiental

El método aplicado por vía húmeda es ambientalmente favorable, ya que facilita la gestión eficiente de subproductos, residuos biodegradables, y permite la reutilización del agua utilizada tras un tratamiento adecuado.

Justificación social

La finalidad de la investigación es tener una técnica óptima de extracción para promover, en caso de una producción a mayor escala, la actividad desde la agricultura hasta el producto final de manera que colabore a la generación de empleo directo e indirecto, pretendiendo generar en el ámbito social una producción a niveles económicos más accesible.

Justificación personal

La elección de este proyecto nace de la curiosidad por saber por qué se utiliza tanto almidón de yuca en la industria de fiambres y embutidos, dando origen a la idea de crear un sistema de producción de almidón de yuca para la microempresa “El Buen Gusto”. Lógicamente este sistema sería poco rentable en comparación con los precios del mercado nacional debido a los bajos volúmenes de producción, permitiéndome plantear la idea de realizar un estudio sobre de la producción de almidón de yuca a escala laboratorio. No obstante, dicha elección también se basa en una combinación de objetivos académicos y personales, entre los cuales está poder graduarme como Ingeniero Químico y volverme un apoyo económico para mi familia desarrollándome profesionalmente lo más antes posible.

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN.

La yuca, una raíz tuberosa rica en almidón, es una materia prima de gran interés para la industria alimentaria y otras. El almidón de yuca, compuesto principalmente por amilosa y amilopectina, presenta una estructura granular característica y diversas propiedades funcionales. Su extracción implica procesos que separan los gránulos de almidón de otros componentes de la raíz, como la fibra. El método de extracción húmeda es el más común. El almidón de yuca tiene múltiples aplicaciones industriales, desde la producción de alimentos hasta la fabricación de papel y bioplásticos. Sin embargo, la calidad y el rendimiento del almidón obtenido pueden verse afectados por diversos factores, como la variedad de yuca, las condiciones de cultivo y el proceso de extracción.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

1.2.1. Yuca.

La yuca, también conocida como mandioca o tapioca, proviene de un arbusto perteneciente a la familia Euphorbiaceae con raíces comestibles originario de América del Sur. Tiene una piel dura, escamosa y de color marrón, mientras que su composición interna almidonada es de color blanco. Está considerada como la tercera fuente más grande de carbohidratos en las zonas tropicales de África, Asia y América Latina, después del arroz y el maíz.

Fig. I-1 Planta de la Yuca



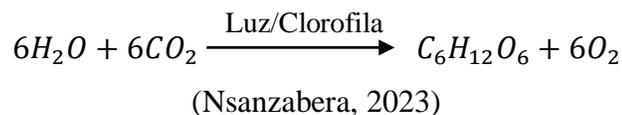
Fuente: (Magalhaes, 2017)

La parte comestible de la yuca es su raíz tuberosa, que tiene una cáscara dura y es de color blanco, morada o amarillento en su interior, se cultiva en suelos tropicales y subtropicales. Es resistente a la sequía y puede crecer en condiciones difíciles, lo que la convierte en una importante fuente de alimentos en áreas con recursos limitados.

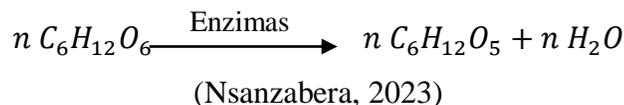
La yuca es una buena fuente de carbohidratos complejos, vitaminas del complejo B, minerales como el potasio y la vitamina C. Se utiliza en una amplia variedad de platos y recetas en todo el mundo, desde guisos hasta frituras, la yuca ofrece versatilidad en la cocina.

En las hojas verdes y las plantas en general, el almidón se forma por polimerización por condensación de glucosa con la ayuda de enzimas sintetizadoras de almidón, la glucosa utilizada se forma durante el proceso de fotosíntesis (Nsanzabera, 2023).

Ecuación I-1 Ecuación de formación de Glucosa



Ecuación I-2 Ecuación de formación de Almidón



1.2.2. Taxonomía.

La clasificación taxonómica es un sistema jerárquico utilizado en biología para organizar y nombrar a todos los seres vivos. Cada nivel de esta clasificación representa un grupo de organismos con características comunes, y a medida que se avanza hacia niveles más específicos, los grupos se vuelven más homogéneos. En la siguiente tabla se observan la familia, orden, clase, división, entre otros, a los que pertenece la yuca.

Tabla I-1 Taxonomía de la Yuca

Reino	Vegetal
Phylum	Telemophytae.
División	Tracheophytae.

Sub División	Anthophyta.
Clase	Angiospermae.
Sub Clase	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo	Archichlamydeae
Grupo de Ordenes	Corolinos
Orden	Geraniales
Flia	Euphorbiaceae
Nombre científico	<i>Manihot esculenta</i> Crantz.
Nombre común	Yuca

Fuente: (Herbario Universitario UAJMS, 2024)

Esta tabla nos muestra que la yuca es una planta con flores (angiosperma), que pertenece a la familia de las euforbiáceas y está estrechamente relacionada con otras plantas como la higuera de Indias. Su nombre científico, *Manihot esculenta* Crantz, es único y universalmente reconocido por los científicos.

1.2.3. Caracterización de la yuca amarilla.

La composición de la yuca Amarilla (mandioca) puede variar dependiendo de la variedad, las condiciones de cultivo y el tiempo de cosecha, sin embargo, como se observa en la siguiente tabla la composición tiene los siguientes valores promedios:

Tabla I-2 Composición promedio de la yuca amarilla cruda

Agua	60-70%
Carbohidratos	30-40%
Almidón	20-30%
Azúcares	1-3%
Fibra dietética	5-10%
Proteína	1-2%
Grasa	0,1-0,5%
Minerales	0,5-1%
Vitaminas	0,01-0,1%

Fuente: (Elaboración propia, 2024)

La composición real de la yuca puede variar significativamente dependiendo de varios factores como la variedad de la yuca, lugar de siembre, cosecha y el tipo de cultivo, condiciones climáticas entre otros.

En la Tabla I-3 se observa la composición de distintos tipos de yuca recopilados de varios autores y resumida, los cuadros que tienen guiones indica que en la investigación del autor correspondiente no existía especificado o descrito dicho valor.

Tabla. I-3 Composición de distintos tipos de yuca

País/región	Carbohidratos %	Humedad %	Ceniza %	Proteína %	Lípidos %	Fibra %
Gannoruwa, SriLanka	35,03	62,92	-	0,72	0,41	0,92
Ghana	45,97	45,86	-	3,48	1,49	3,21
Nasáu Bahamas	25,45	68,81	3,24	2,12	0,41	2,79
Chapare Bolivia	19,67	65,23	2,71	2,49	1,43	8,54
IITA Ibadán, Nigeria	31,49	58,79	2,84	1,43	-	5,45
Nigeria	83,07	12,28	1,92	-	0,95	1,78
Nigeria	82,73	9,85	2,35	-	2,75	2,32

Fuente: Fuente: (Elaboración propia, 2024)

1.3. ALMIDÓN DE YUCA.

El almidón, es un polisacárido que se puede extraer de muchos productos naturales, es una de las principales reservas de energía de las plantas y una fuente importante de calorías para las personas. Este compuesto, se compone principalmente de glucosa, se almacena en diferentes partes de las plantas, como semillas, tubérculos y raíces, en forma de gránulos como se observó en la Fig. I-2.

Fig. I-2 Almidón



Fuente: (Gonzalez, 2024)

El almidón es una fuente importante de carbohidratos complejos en la dieta humana desde el punto de vista nutricional. Es un tipo de energía de liberación lenta que proporciona una fuente de energía constante a lo largo del tiempo y ayuda a mantener niveles estables de glucosa en sangre. Por lo tanto, los alimentos ricos en almidón, como cereales, tubérculos y legumbres.

1.3.1. Estructura del almidón.

El almidón está compuesto por dos tipos de polisacáridos muy similares, la amilosa y la amilopectina. Estas cadenas no fermentan directamente porque necesitan ser descompuestas en unidades más simples de azúcares, como la glucosa $C_6H_{12}O_6$.

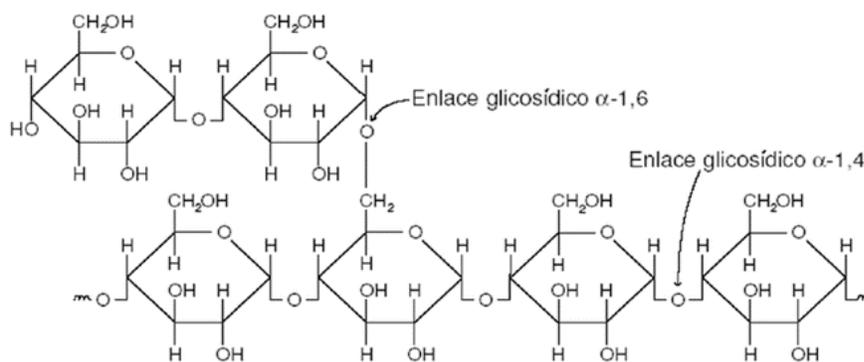
La composición amilosa/amilopectina es el factor principal que le confiere las propiedades funcionales al almidón (Reyes Ocampo & Rodríguez Montenegro, 2016).

1.3.1.1. Amilopectina.

La Amilopectina adopta una estructura ramificada, donde las ramificaciones surgen mediante enlaces α -1,6-glucosídicos. Dicha estructura contribuye a la textura y viscosidad gelatinosa del almidón. Representa alrededor del 80% de los almidones (The Food Tech, 2023).

En la siguiente figura se observa la estructura química de la amilopectina:

Fig. I-3 Estructura Química de la Amilopectina



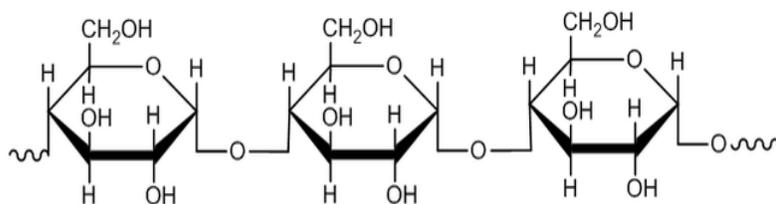
Fuente: (Valencia, Corrales, & Meneses, 2007)

En la figura se observa un enlace glucosídico α -1,6 y cuatro enlaces glucosídicos α -1,4

1.3.1.2. Amilosa.

La amilosa es una molécula de almidón lineal que se compone de cadenas largas de moléculas de glucosa unidas por enlaces α -1,4-glucosídica que forma estructuras más compactas y menos viscosas. Representa alrededor del 20% de los almidones. La estructura de la amilosa puede contener entre 200 y 2000 unidades de glucosa, y no tiene ramificaciones. En la siguiente figura se observa la estructura química de la amilosa:

Fig. I-4 Estructura Química de la Amilosa



Fuente: (Amaya J. , 2019)

En la figura se observa enlaces glucosidicos α -1,4 característicos de la amilosa.

1.3.1.3. Componentes adicionales en el almidón de yuca.

Una porción de 100 g de almidón de yuca aporta 1,50 g de fibra, 30 mg de calcio y 0 g de colesterol. También tiene bajo contenido en sodio, lo que lo hace ideal en recetas que ayudan a problemas de presión arterial y enfermedades cardiovasculares (Poltec, 2019).

Estos valores pueden variar por diferentes factores como ser, el lugar de donde se cosecha la yuca, la variedad y la técnica del método de extracción (por lo general vía húmeda) para una mejor comprensión de los parámetros de composición de distintos almidones se presenta la tabla. I-4.

Las variedades de yuca son normalmente clasificadas por el contenido de cianuro (CN⁻) en la pulpa de la raíz, en dulces (< 100 mg HCN/Kg) y agrias (> 100 mg HCN/Kg) (Torres, 2022).

Tabla. I-4 Composición de distintos almidones de yuca

País región	Método de análisis	Amilosa (%)	Ceniza (%)	Proteína (%)	Lípidos (%)	Fósforo (%)	Fibra (%)	Autor
Nigeria	Ensayo almidón	21,01-22,52	0,36-0,37	0,13-0,17	0,370	-	0,20-0,23	(Abioye, 2017)
Tanzania	K-AMILO	11,91-19,43	-	-	-	-	-	(Mtunguja, 2016)
Malasia	enzimático	16,62	0,31	0,55	0,24	-	-	(Edhirej, 2017)
India	-	20,74	-	0,34	0,23	-	-	(Nair y otros, 2017)
México	YodoS	19,251-32,12	-	-	-	-	-	(Hernández Fernández, 2016)
Nigeria	YodoS	26,73	0,26	0,15	0,79	-	1,51	(EkeEjiofor, 2015)
Uganda	K-AMILO	17,92-19,73	0,12-0,23	0,27	0,22	-	-	(Nuwamanya, 2010)
Nigeria	YodoS	22,01	0,22	0,11	0,10	0,01	-	(Abiola, 2014)
Porcelana	YodoS	28,67	0,13	0,08	-	-	-	(Ren, 2015)
Tailandia	YodoS	26,85	-	-	-	-	-	(Suriyakul Na Ayudhaya, 2016)
Brasil	K-AMILO	14,82-24,38	-	-	-	0,03-0,09	-	(Justamante Händel Schmitz y otros, 2017)
Nigeria	K-AMILO	19,21	0,11	0,81	1,00	-	-	(Oladunmoye, 2014)
Brasil	potenciométrico	22,81-25,52	-	-	-	-	-	(Moraes, 2013)
Brasil	YodoS	21,01	0,11	0,26	0,12	0,01	-	(Gutiérrez, 2014)
Costa de Marfil	YodoS	14,27-25,31	-	-	-	-	-	(Doué, 2014)
Colombia	Yodo	19,56-20,33	-	-	-	-	-	(Morante, 2016)

Fuente: (Chisenga, 2017)

1.3.2. Características del almidón de yuca.

Para caracterizar el almidón y comprender sus propiedades físicas, químicas y funcionales, se utilizan varios métodos.

De acuerdo con el trabajo de investigación de (Hernandez & Torruco, 2008, p. 2), la composición proximal se puede determinar por los métodos oficiales descritos por la AOAC (1997), comprendiendo los siguientes análisis: humedad (método 925.09), proteína cruda (método 954.01), grasa cruda (método 920.39), fibra cruda (método 962.09), cenizas (método 923.03) y carbohidratos totales como Extracto Libre de Nitrógeno (ELN). La determinación de amilosa y amilopectina se realizó con el método colorimétrico de Morrison y Laignelet (1983).

1.3.2.1. Tamaño de partícula.

Entre los métodos que se puede utilizar para el análisis del tamaño de las partículas podemos hacer referencia a la microscopía óptica o electrónica de barrido (SEM) o el análisis de dispersión de luz (DLS) para medir el tamaño promedio de las partículas. Los gránulos de almidón teniendo un tamaño promedio 16,50 μm para el Almidón de yuca según (Hernandez & Torruco, 2008, p. 3).

1.3.2.2. Contenido de humedad.

La cantidad de agua presente en el almidón se indica por su contenido de humedad, lo que afecta sus propiedades físicas y su estabilidad, se puede determinar mediante técnicas como el secado en estufa, el método de Karl Fischer y la refractometría.

El IAA se refiere a la cantidad de agua que puede absorber una muestra de almidón y se expresa como porcentaje de la masa del almidón seco. Esto es importante para conocer la capacidad de retención de agua del almidón, lo cual puede afectar sus propiedades en aplicaciones alimentarias e industriales.

Es importante vigilar la humedad en los alimentos preparados, ya que demasiada humedad puede conllevar riesgos microbiológicos en el crecimiento de (moho, levadura o bacterias), una humedad inferior al 8% favorece la presencia de insectos

mientras que una humedad superior al 14% existe un riesgo de contaminación por bacterias y hongos (Rosales Suquillo, 2022).

El método para la determinación de humedad que puede ser utilizado es una técnica gravimétrica que consiste en que la muestra se seca a una temperatura específica hasta alcanzar un peso constante, calculando la pérdida de masa como contenido de humedad. La humedad que se reporta por (Hernandez & Torruco, 2008) en el almidón de yuca es del 9,48%.

1.3.2.3. Solubilidad y capacidad de hinchamiento.

La solubilidad y la capacidad de hinchamiento son propiedades funcionales clave para evaluar la calidad del almidón, ya que reflejan su comportamiento frente a procesos térmicos y su interacción con el agua. Según García Pereira y Del Pino Beleia (2021), estos parámetros se determinan mediante el siguiente procedimiento experimental: se prepara una suspensión de almidón a partir de 0,50 g de muestra en 30 mL de agua destilada, la cual es calentada en un baño de agua a 90°C durante 30 minutos con agitación constante. Posteriormente, la suspensión se enfría y se centrifuga a 2000 rpm durante 10 minutos.

Para determinar la solubilidad, se recoge el sobrenadante, se evapora en placas de Petri previamente pesadas a 105 °C durante 4 horas, y se calcula el peso seco restante. La capacidad de hinchamiento se evalúa midiendo el peso del sedimento húmedo tras la centrifugación.

En el estudio de García Pereira y Del Pino Beleia (2021), la aplicación de este método al almidón de yuca no modificado a 90°C arrojó resultados promedio de $12,17 \pm 4,69$ % para la solubilidad y $8 \pm 0,68$ g/g para la capacidad de hinchamiento. Estos valores indican que el almidón de yuca presenta una capacidad moderada para absorber agua y disolverse bajo condiciones de calentamiento controlado.

Estas propiedades son esenciales en aplicaciones industriales, ya que afectan la funcionalidad del almidón en productos alimenticios y no alimenticios. Una mayor solubilidad, por ejemplo, puede ser beneficiosa en procesos donde se requiere dispersión rápida del almidón, mientras que una capacidad de hinchamiento adecuada es clave en la formación de geles y en la textura de alimentos procesados (Tester & Morrison, 1990).

Por otra parte, el método utilizado por (Hernandez & Torruco, 2008) es una modificación del método original de (Schoch, 1964). Donde el almidón de yuca fue el que presentó mayor claridad, solubilidad de 55% a 90°C y poder de hinchamiento (58,83 g agua almidón a 90°C) por lo que podría ser utilizado en productos que requieran retener agua, como los productos cárnicos, como son los embutidos, jaleas, confitería, etc. La firmeza y elasticidad, así como la alta estabilidad a la refrigeración y congelación del almidón de yuca, indica que podría utilizarse como agente espesante y estabilizante en sistemas alimenticios que necesiten ser refrigerados y congelados.

1.3.2.4. Gelatinización.

La temperatura de gelatinización es una propiedad térmica fundamental del almidón, ya que define el momento en que sus gránulos pierden la estructura cristalina al absorber agua y aplicarse calor, lo que resulta en la formación de una pasta viscosa. Esta característica es crítica para determinar su aplicación en procesos alimenticios e industriales.

La gelatinización del almidón es un proceso endotérmico que corresponde a la disociación de las moléculas de almidón, las cuales se disponen en una doble hélice y se transforman en una conformación amorfa. La temperatura de gelatinización y su entalpía durante dicho proceso se pueden determinar mediante calorimetría de barrido diferencial (CBD). El pico endotérmico de CBD refleja pérdida de la doble hélice de la amilopectina (Srichuwong & Jane, 2007).

Según el estudio realizado por Hernández y Torruco (2008), la temperatura de gelatinización del almidón de yuca fue evaluada utilizando un calorímetro diferencial

de barrido (DSC 7 Perkin Elmer). Las mediciones se realizaron bajo una velocidad de calentamiento constante de 10°C/min, en un rango de temperatura de 30 a 120 °C. Del análisis del termograma resultante, se obtuvieron parámetros térmicos como:

Temperatura Inicial (Ti): momento en que inicia la gelatinización,

Temperatura Pico (Tp): punto máximo de gelatinización,

Temperatura Final (Tf): temperatura en la que se completa la gelatinización,

Entalpía de Gelatinización (ΔH): energía absorbida durante el proceso.

Tabla I-5 Temperatura y entalpía ΔH de gelatinización del almidón de yuca

Almidón	Ti (°C)	Tp (°C)	Tf (°C)	ΔH (J/g)
Yuca	57,80	65,20	75,30	10,01

Fuente: (Hernandez & Torruco, 2008)

En este estudio mencionado, la temperatura pico (Tp) para el almidón de yuca se reportó en 65,20 °C, lo cual es consistente con las propiedades típicas de almidones provenientes de raíces y tubérculos. Estos valores son importantes porque permiten comparar el comportamiento térmico del almidón de yuca con otros tipos de almidón, como los provenientes del maíz o del trigo, que tienden a gelatinizar a temperaturas más elevadas (Fredriksson et al., 1998).

La determinación precisa de estos parámetros permite optimizar procesos como el calentamiento en alimentos, la fabricación de bioplásticos y otros usos industriales donde se emplea almidón como agente espesante o gelificante.

La velocidad e intensidad del hinchamiento de los gránulos de almidón son afectados por el pH del sistema, ya que generalmente los valores de pH menores a 5 o mayores a 7 tienden a reducir la temperatura de gelificación y acelerar el proceso de cocción a pH alcalino se reducen considerablemente la temperatura y tiempo requeridos para el hinchamiento de los gránulos (Almazan Urquizo, 2007).

1.3.2.5. Retrogradación.

El fenómeno de la retrogradación es diferente para cada tipo de almidón y se define como la insolubilización y precipitación espontánea de las moléculas de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente por puentes de hidrógeno.

Por otro lado, la retrogradación de la amilopectina es más lenta y puede ocurrir en días o semanas debido a su estructura ramificada. La velocidad de retrogradación depende de factores como: la concentración de lípidos y la presencia de derivados mono éster y fosfatos, así como también de la longitud de las cadenas de amilopectina (Srichuwong & Jane, 2007).

1.4. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN.

Existen de manera general dos métodos de extracción de almidón de yuca, uno por vía seca y el otro por vía húmeda, no obstante, estos dos métodos suelen estar sujetos a leves cambios o adición de procesos, manteniendo sus fundamentos de separación y velando aumentar el rendimiento de la producción final, los procesos son:

1. Extracción de almidón por vía Seca.
2. Extracción de almidón por vía Húmeda.

1.4.1. Extracción de almidón por vía seca.

Este método consiste en ocupar el agua solo en puntos indispensables del proceso como ser el lavado de la yuca antes de su correspondiente pesado, puede ser utilizado en ciertos contextos industriales o regiones donde el acceso al agua es limitado. Existen dos procesos por vía seca para la obtención de almidón de yuca los cuales comprenden las siguientes etapas: Proceso N° 1: Lavado y descascarillado, rallado, deshidratado, molido y tamizado Proceso N° 2: Lavado y descascarillado, rallado, pre-deshidratado, pre-molido, deshidratado, molido y tamizado.

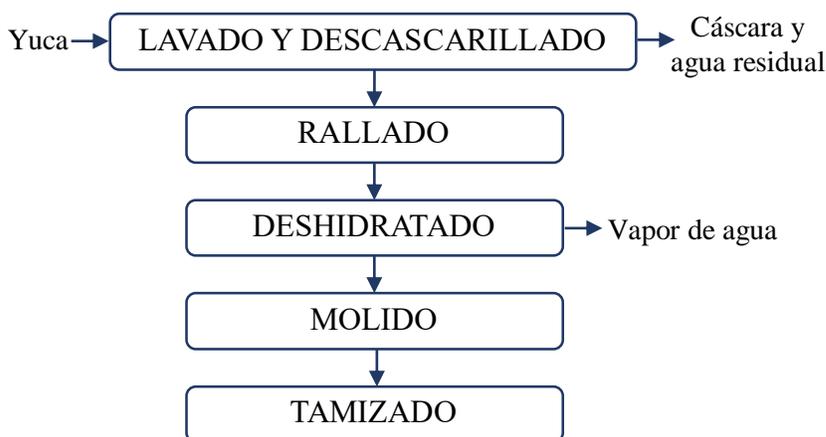
Las esquematizaciones de los diagramas de las dos Procesos mencionadas se realizan personalmente basándose en (Cobana & Antezana , 2007) explicando de manera

objetiva cada parte del proceso más completo ya que la diferencia entre las mismas es la repetición de las dos últimas etapas.

1.4.1.1. Proceso N° 1 para la extracción de almidón por vía Seca.

Este proceso es una manera directa de extraer almidón de yuca, pero debido a su menor rendimiento, mayor consumo energético, y posibles pérdidas de calidad como la oxidación del almidón durante la manipulación y molienda no es comúnmente utilizada.

Fig. I-5 Diagrama de extracción del almidón por vía seca Proceso N° 1



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

1.4.1.1.1. Lavado y descascarillado.

La yuca se lava minuciosamente para eliminar cualquier suciedad e impureza que puedan estar en la superficie de la raíz. Después, se realiza el descascarillado pelando la yuca con un cuchillo, retirando la cáscara externa de la yuca para dejar expuesta la pulpa interna, que contiene almidón sin pérdida excesiva de materia prima.

1.4.1.1.2. Rallado.

Una vez que la yuca está limpia y descascarillada, se utiliza un rallador para hacer una pulpa fina, con el fin de aumentar la superficie de contacto, procurando tener el menor grosor posible para de esta manera facilitar la extracción de almidón. Esta etapa de

rallado es crucial porque facilita la extracción de almidón al romper la estructura celular de la yuca y liberar los almidones contenidos en su interior.

1.4.1.1.3. Deshidratado.

La pulpa de yuca rallada se deshidrata para eliminar el agua. Esto se puede lograr secando al sol, secando en estufas o utilizando equipos de deshidratación especializados que aplican calor y circulación de aire para evaporar el agua de la pulpa, controlando la temperatura para evitar la gelatinización del almidón. La deshidratación facilita la separación del almidón en la pulpa al concentrarlo y evita el deterioro.

1.4.1.1.4. Molido.

La pulpa seca se puede moler en distintos tipos de molinos según la capacidad del molino como ser molinos de disco, de rodillos o de bolas, hasta obtener un polvo fino cuyo componente mayoritario es el almidón. El objetivo de esta etapa es reducir el tamaño de las partículas y mejorar la extracción del almidón, se debe controlar esta etapa para facilitar el tamizado y mejorar la textura del producto.

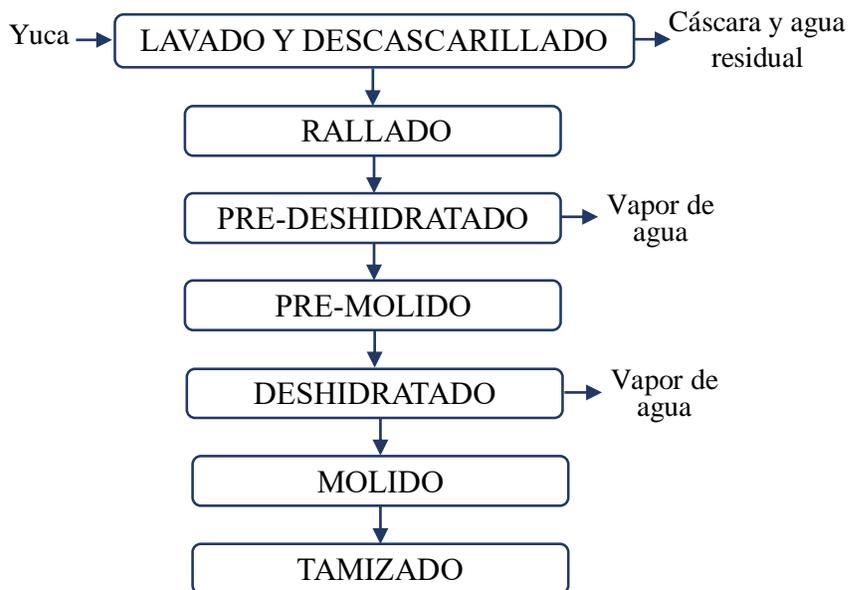
1.4.1.1.5. Tamizado.

Finalmente, el polvo de almidón que se extrae del molido se tamiza en una malla, la cual debe de un espacio entre rendijas próximo a 0,60 mm, para separar las partículas finas de las gruesas. Esto garantiza que el producto final tenga un tamaño de partícula y una textura uniformes, un tamizado inadecuado podría reducir el rendimiento.

1.4.1.2. Proceso N° 2 Etapas adicionales extracción de almidón por vía seca.

Se adicionan dos etapas buscando mejorar el rendimiento, se los podría denominar pre tratamientos que ayudan a la extracción del almidón.

Fig. I-6 Diagrama de extracción del almidón por vía seca Proceso N° 2



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

1.4.1.2.1. Pre-deshidratado.

Esta etapa se añade posteriormente al rallado, se aplica un pre-deshidratado, en una estufa a 55°C, a la pulpa rallada para reducir su contenido de agua. Esto se logra mediante el prensado lo que ayudan a eliminar parte del líquido presente en la pulpa. Las etapas posteriores de extracción y deshidratación del almidón se facilitan al reducir el contenido de agua en esta etapa.

1.4.1.2.2. Pre-molido.

Esta etapa se presenta antes de la deshidratación principal y consiste en que la pulpa prensada se muele para obtener una masa más uniforme y fácil de manejar. El pre molido ayuda a romper las estructuras celulares de la yuca, lo que facilita la extracción del almidón en etapas posteriores.

Es importante mencionar que estos procesos mencionados de la bibliografía de (Cobana & Antezana , 2007) describe que los productos finales obtenidos con la segunda técnica (proceso) presentan un aspecto de harinas finas, las cuales muestran características comparables a la de almidones dulces extraídos por métodos

tradicionales. Dando a entender que el producto obtenido por este proceso tendría algunas diferencias entre lo que se denominaría harina de yuca y almidón de yuca, haciendo mayor referencia a su composición podemos denotar que las propiedades obtenidas serían las referentes a la siguiente tabla.

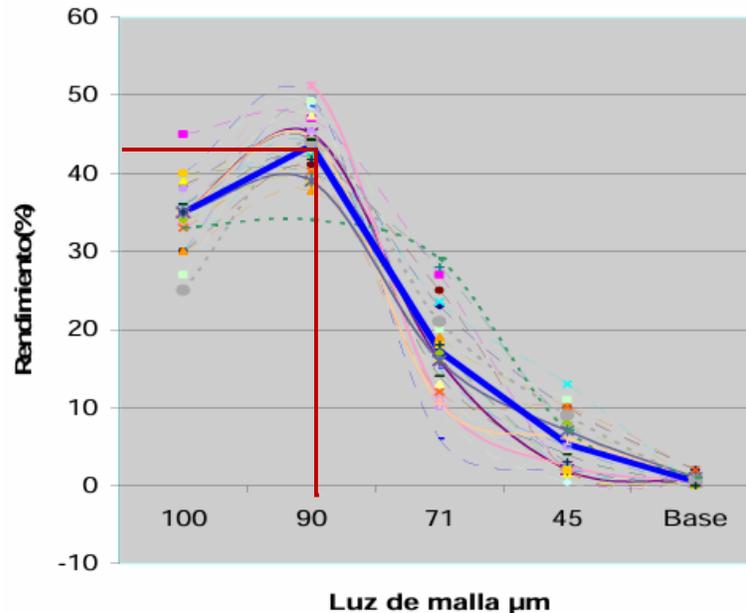
Tabla. I-6 Propiedades Fisicoquímicas del mejor ensayo del producto por vía seca
Proceso N° 2

Parámetros	Producto Vía Seca	Almidón Vía Húmeda
Amilosa (%)	16,90	15,45
Amilopectina (%)	62,15	83,57
Solubilidad (%)	27,60	39,66
Poder de Hinchamiento (%)	39,75	44,65
Viscosidad Aparente (cP)	354,80	247,70
Fibra (%)	0,95	0,98
Azúcares Totales (%)	20,00	ND
Azúcares Reductores (%)	1,37	ND
Ácido Cianhídrico (mg)	3,00	ND

Fuente: (Cobana & Antezana , 2007)

En dicha investigación se tomó como producto de referencia la muestra del tamiz 90 μ m como se observa en la figura I-7, dando así un rendimiento de 43% de almidón extraído respecto al 30,79% del almidón presente en su materia prima.

Fig. I-7 Retención de almidón por número de tamiz, vía seca Proceso N° 2



Fuente: (Cobana & Antezana , 2007)

Analizando estos parámetros de los datos experimentales presentes en la publicación de (Cobana & Antezana , 2007), podemos determinar el rendimiento real con una base de cálculo de 100 gramos de raíces frescas de yuca.

Ecuación I-3 Ecuación de Rendimiento Real del 2do Proceso vía seca

$$R_{real} = B.C. * Frac_{M,P} * Frac_{R,G}$$

Donde:

$$B.C. = 100 \text{ g de Yuca} \quad Frac_{M,P} = 0,308 \quad Frac_{R,G} = 0,43$$

$$R_{real} = 100 * 0,308 * 0,43$$

$$R_{real} \approx 13,24 \%$$

Se debe tomar en cuenta que este rendimiento de extracción referente a obtener por la vía seca se puede deber a la variedad de yuca utilizada que fue la “Boboré” cultivadas en el Trópico de Cochabamba y cosechadas entre los meses de enero y febrero.

1.4.2. Extracción de almidón por vía húmeda.

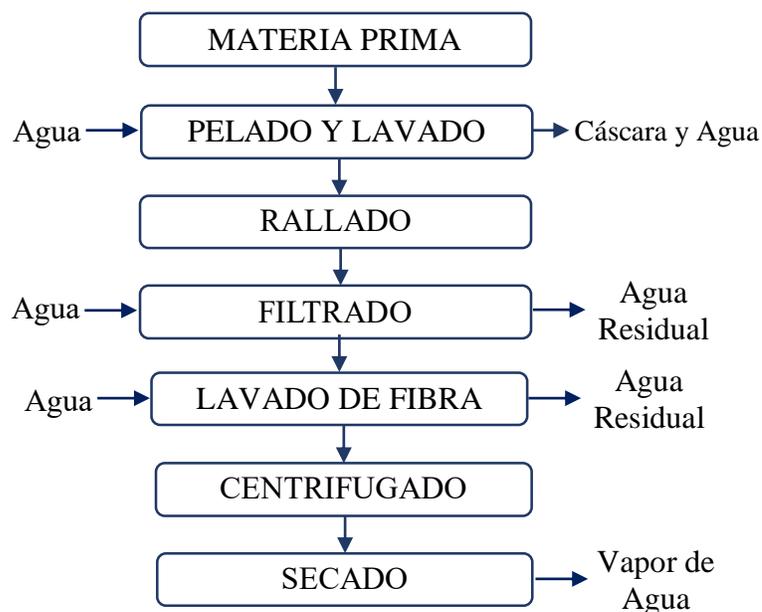
El método de la extracción de almidón por vía húmeda es el más comúnmente utilizado, su procedimiento se basa en la separación por filtración y precipitación, permite tener un rendimiento mayor en la producción debido a su eficiencia para obtener almidón de

alta calidad y pureza, lo que lo hace adecuado para su uso en la industria y se pueden denotar dos procesos uno directo que posterior a la sedimentación pasa directamente a ser secado y el segundo, que implica una trituration y mezclado con el agua mediante una licuadora para posterior a su sedimentación esta pase a la centrifugación y secado.

1.4.2.1 Proceso N° 1 para la extracción de almidón por vía húmeda.

El diagrama está basado en el proceso de extracción realizado por (Amaya & Marin, 2020) y presentan los mismos fundamentos para ambos procesos con la diferencia de que en el primer proceso la técnica para liberar los gránulos contempla un rallado y en segundo proceso contempla un troceado y molienda mecánica en contacto con el agua.

Fig. I-8 Diagrama de extracción del almidón por vía húmeda Proceso N° 1



Fuente: Elaboración Propia, 2024

1.4.2.1.1. Materia prima.

Durante la etapa de recepción de la materia prima, se enfoca en asegurar la calidad óptima de las raíces de yuca. Esto implica que para la selección de raíces estas deben cumplir las siguientes condiciones: estar frescas, libre deterioro y no estar cortadas transversalmente, su inspección visual es importante para descartar defectos, se debe tener una manipulación cuidadosa que evite cualquier daño físico que pueda afectar el proceso de extracción.

1.4.2.1.2. Pelado y Lavado.

En esta etapa, la yuca se pela y lava para eliminar la suciedad, tierra y la cáscara externa. Este pelado y lavado son cruciales para garantizar la limpieza de la materia prima antes de la extracción del almidón, el pelado se lo puede realizar con cuchillos o pela papas teniendo cuidado en pelar por demás la cáscara y desechar la pulpa almidonosa.

1.4.2.1.3. Rallado.

Una vez que se tenga limpias las raíces, empieza la etapa de rallado la cual podría ser con un rallador, esto facilita la liberación del almidón mejorando así el rendimiento de extracción por que se tiene una mayor superficie de contacto entre el almidón de la pared celular y el agua al momento de arrastrar el almidón en la siguiente etapa.

1.4.2.1.4. Filtrado.

Esta etapa se puede llevar a cabo con una malla o tela de 250 micras, se debe pasar un volumen de agua de pH neutral en una relación masa [g] – volumen [mL] de 1:5 a 1:9 pasando así las partículas de la lechada que contienen almidón y dejando en la malla o tela los residuos de fibra y sólidos de la yuca.

1.4.2.1.5. Lavado de fibra.

Se lava las fibras del filtrado de forma manual con guantes echando un volumen de agua igual al utilizado en la etapa de filtrado esto con el fin de extraer el almidón que haya podido quedar en la pared celular de estas fibras obteniendo así un mayor rendimiento.

1.4.2.1.6. Centrifugado.

Después del filtrado, se procede a una centrifugación a 6000 rpm por un tiempo de 15 min. La fuerza centrífuga ayuda a acelerar la sedimentación de las partículas de almidón que se separan por diferencias de densidad, las impurezas, fibras, algunas proteínas y residuos orgánicos no sedimentan, estos salen en las aguas residuales con un aspecto turbio o de suciedad.

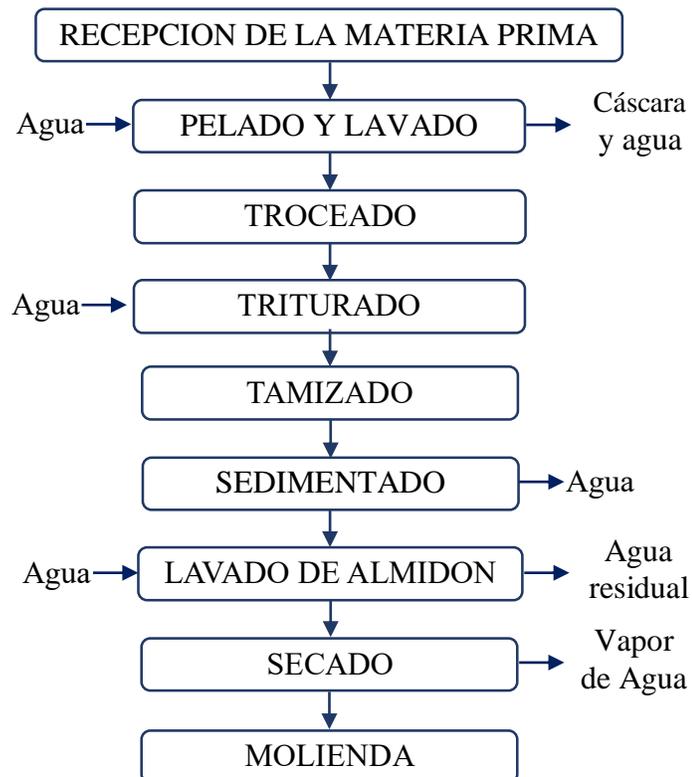
1.4.2.1.7. Secado.

En esta etapa se busca deshidratar el almidón hasta una humedad de 10 a 13%, generalmente mediante técnicas de secado pudiéndose realizar en una estufa o a la luz solar a una temperatura por debajo del punto de gelatinización del almidón, preferentemente de 30 a 50 °C, velando el garantizar una buena conservación del producto y mantener las características físicas en la presentación del almidón.

1.4.2.2. Proceso N° 2 para la extracción de almidón por vía húmeda.

Este segundo proceso se basa en la descripción de la parte experimental del trabajo realizado por (Almazan Urquizo, 2007) diferenciándose así del Proceso N° 1 por la adición de la etapa de troceado, triturado en una licuadora, sedimentado, lavado de almidón y un disgregado a través de una molienda del producto final.

Fig. I-9 Diagrama de extracción del almidón por vía húmeda Proceso N° 2



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

1.4.2.2.1. Recepción de la materia prima.

La materia prima con la que se desarrolla el proceso debe encontrarse en buen estado y debe cumplir los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que serán definidos en la caracterización de la materia prima, una vez pesada se puede continuar con la siguiente etapa del proceso.

1.4.2.2.2. Pelado y lavado.

Se le quita la cáscara a la yuca con cuchillo o pela papa y se la lava con agua potable, esto exponen la pulpa interna de la yuca, que es la parte que contiene almidón.

1.4.2.2.3. Troceado.

Las raíces peladas pasan a ser troceadas para reducir su tamaño a 8 cm³ aproximadamente para así facilitar su distribución en el recipiente donde se realizará el triturado húmedo y mecánico en la siguiente etapa.

1.4.2.2.4. Triturado.

Esta operación se realiza con la finalidad de fracturar la estructura celular de la materia prima para así poder liberar los gránulos de almidón. Se realiza por vía húmeda en una proporción 1:1 (yuca/agua) según una concentración masa volumen a un tiempo de 2 min.

1.4.2.2.5. Tamizado.

Para separar el almidón del afrecho o fibras de la materia prima se realiza un filtrado a través de un tamiz de apertura aproximada a 100 µm o de la apertura más próxima posible y la masa remanente se la vuelve a lavar y moler en húmedo para ser filtradas por el tamiz una vez más.

1.4.2.2.6. Sedimentación.

Después del tamizado o filtrado, la solución líquida se deja reposar en un recipiente. En este punto, las partículas de almidón se vuelven más densas y se depositan en el

fondo del recipiente y en el sobre nadante se encuentran el agua con partículas en suspensión de fibra.

1.4.2.2.7. Lavado de Almidón.

Posterior al sedimentado y desecho de agua sobre nadante se procede al lavado de almidón esta etapa se la realiza con el fin de obtener un almidón más puro y blanco, se adiciona un poco de agua al recipiente en el que sedimenta el almidón y se procede a realizar el lavado de manera suave entre el almidón sedimentado, posteriormente esta agua compuesta generalmente por proteínas y pigmentos amarillos que llega a tener una consistencia turbia se la desecha. Este proceso se repite hasta que el agua del lavado quede totalmente incolora en su último lavado.

1.4.2.2.8. Secado.

Una vez separado, el almidón se seca para eliminar el H₂O, se puede lograr esto mediante secado al vacío, secado al aire, secado por aspersión o secado en una estufa, el tiempo de deshumidificación se realiza hasta que el almidón alcance su humedad de equilibrio de 10 o 12%.

1.4.2.2.9. Molienda.

El almidón seco se muele a través de un molino, para no presentar ningún tipo de grumosidad en su presentación, esto facilita su manejo y posterior aplicación.

1.5. APLICACIONES DEL ALMIDÓN DE YUCA.

El almidón de yuca presenta una amplia gama de aplicaciones debido a sus propiedades fisicoquímicas, como su alta pureza, facilidad de gelatinización y bajo contenido en proteínas y lípidos. Estas características lo convierten en un recurso valioso para diferentes sectores industriales.

1.5.1. Industria alimentaria.

El almidón de yuca se utiliza principalmente como espesante, estabilizante y gelificante en la elaboración de productos como salsas, sopas, postres, panadería y productos

cárnicos procesados. También sirve como agente de textura en alimentos sin gluten y en formulaciones de harinas modificadas (Moorthy, 2002). Su capacidad para producir pastas con menor tendencia a la retrogradación lo hace ideal para productos congelados.

1.5.2. Industria papelera y textil.

En la industria papelera, el almidón de yuca se utiliza como agente de encolado para mejorar la resistencia del papel. En la industria textil, se aplica en el apresto de telas, proporcionando rigidez temporal durante el proceso de tejido.

1.5.3. Fabricación de adhesivos.

El almidón de yuca es una materia prima clave en la producción de adhesivos industriales, especialmente en aplicaciones como la fabricación de cartón, papel corrugado y etiquetas.

1.5.4. Industria farmacéutica y cosmética.

Se utiliza como excipiente en la formulación de medicamentos y cápsulas, así como en productos cosméticos, donde actúa como absorbente y estabilizador.

1.5.5. Producción de bioplásticos.

El almidón de yuca es una fuente sostenible para la fabricación de biopolímeros biodegradables, los cuales representan una alternativa ecológica frente a los plásticos convencionales derivados del petróleo (Shanks & Kong, 2012).

1.5.6. Industria de biocombustibles.

La fermentación del almidón de yuca puede generar bioetanol, un biocombustible renovable que contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases contaminantes.

1.6. ESTUDIOS PREVIOS SOBRE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN DE YUCA.

Se cuenta con diversos estudios sobre la extracción de almidón de yuca, algunos de los cuales detallan ciertas etapas del proceso con mayor profundidad que otras. Si bien algunas publicaciones en revistas no profundizan en el desarrollo experimental, todos los estudios mencionados aportan datos significativos que son útiles para diseñar un procedimiento experimental para la extracción de almidón. En muchos casos, aunque solo se presenta un resumen del estudio, este resulta ser muy puntual y objetivo.

En su trabajo de investigación de (Cobana & Antezana , 2007) plantean un proceso en el cual se evalúan dos técnicas de extracción de una harina de yuca por vía seca con características similares a las del almidón dulce.

En su proyecto sobre Diseño conceptual de un proceso de producción de almidón de yuca, Mina (2019) indica que es preferible optar por el proceso por vía húmeda debido a su mayor facilidad operacional y menor requerimiento de tecnología especializada, lo que permite obtener un mejor rendimiento y calidad del producto final. El tipo de yuca que proporcionó el mayor rendimiento fue la yuca dulce amarilla, con un 9,5 %, en comparación con la yuca blanca y morada. En su desarrollo experimental, se menciona el uso de telas filtrantes, al igual que en el estudio de Chisenga (2017). Además, se especifica que la temperatura de secado fue de 65 °C durante un período de 24 horas. Una vez seco, el almidón se procesó en una licuadora para desintegrarlo y obtener un producto uniforme y fino.

Por otra parte (Almario, 2019) hace mención del uso de una licuadora para la liberación de los gránulos de almidón, en la etapa de trituración para su respectiva investigación.

Entre datos relevantes sobre la variable de relación masa-volumen, (Garica, 2013) indica el uso de una relación 1:0,90 para la etapa de colado o extracción y 1:5 en la etapa de sedimentación. Por otra parte, (Mogollon, 2018) indica que existe un volumen adecuado para la yuca molida, y este se encuentran en mezclas de 100 g de yuca molida con 400 a 700 mL de agua, es decir en una proporción 1:4 a 1:7 y su rendimiento de almidón extraído fue de $18\pm 2\%$.

Sobre la temperatura del agua (Desiderio, 2017, p. 70) indica que en su investigación el mayor rendimiento en cuanto a la masa de almidón extraída fue a 50°C, pero se consideró como extracción óptima la que se ejecutó a 40°C porque el aspecto del almidón seco mostraba un sólido blanco que fácilmente podía molerse y no tenía mal olor mientras que la extracción a 50°C el producto seco se volvió rígido, difícil de triturar hasta convertirlo en polvo y no se disolvía en agua a temperatura ambiente y otras pruebas realizadas a 80 y 90°C presentaban una estructura gelatinosa.

Sobre el pH del agua en la etapa de extracción es importante tener en cuenta la acidez del disolvente en el proceso de triturado, según (Velasco, 2008) un pH cercano a 3 favorece la formación de dextrinas debido a la hidrólisis del almidón, lo cual puede brindarle mayor solubilidad, menor viscosidad, menor valor nutricional y modificar las propiedades funcionales.

En su investigación sobre la degradación de la pared celular del tubérculo de yuca (Adetunji, 2016) indica que las actividades hidrolíticas de las enzimas y la disminución del pH por la fermentación dieron como resultado la fragmentación de las paredes celulares de yuca, con una mejor liberación de gránulos de almidón libres.

Por otra parte (Rong, 2009) indica las mejores condiciones de extracción fueron las siguientes: la relación sólido-líquido fue de 1:12, el tiempo aislado fue de 65 minutos a un valor de pH de 5,80 y el nivel de uso de la enzima fue de 40 U/g, claro esto en caso del uso de una enzima y para los residuos de la yuca.

En el proyecto de Evaluación de la producción de almidón a partir de yuca amarga (Lopez, 2018) indica, que pica la yuca pelada manualmente a una longitud promedio de 3 cm de una masa de 250 g antes de utilizar una licuadora como medio de trituración, el filtrado se lo realizó con un tamiz y que su rendimiento final fue de 12,95%, según el siguiente diseño experimental:

Tabla. I-7 Resumen del rendimiento en metodología húmeda de almidón de yuca
(*Manihot utilissima*)

Velocidad de trituración	Tiempo de trituración (min)	Temperatura del agua (°C)	Rendimiento			
			Rep 1	Rep 2	Rep 3	Promedio
Bajo	2	25	9,84	13,88	15,12	12,95
Bajo	2	40	8,36	13,04	14,76	12,05
Bajo	6	25	10,40	11,76	10,80	10,99
Bajo	6	40	8,56	7,96	14,12	10,21
Alto	2	25	13,00	6,96	7,88	9,28
Alto	2	40	15,28	9,64	8,44	11,12
Alto	6	25	9,40	7,40	6,88	7,89
Alto	6	40	15,76	8,92	7,16	10,61

Fuente: (Lopez, 2018)

Esto indica que en dicha investigación las variables más influyentes fueron un nivel bajo de velocidad de trituración un tiempo de 2 min con una temperatura inicial del agua de 25°C.

Es importante considerar la variación del pH en el rendimiento de la extracción de almidón, ya que aún quedan gránulos de almidón en el afrecho o bagazo de la yuca. Estudios como los realizados por (Rojas, 2019) y (Prasertzung, 2019) han demostrado que estos gránulos remanentes en el bagazo o fibra del almidón pueden ser aprovechados para obtener diversos productos. El uso de un pH adecuado mejora el proceso de extracción en cuanto a la liberación de los gránulos de almidón de la pared celular de la yuca.

En cuanto a datos sobre la etapa de centrifugado de acuerdo con (Amaya & Marin, 2020) para el proceso de sedimentación se toma la lechada de almidón obtenida de la filtración y se deposita en tubos para ser posteriormente centrifugados a las siguientes condiciones: 6000 rpm, 15°C, durante 15 minutos. Por otra parte, (Desiderio, 2017) indica el proceso de centrifugación lo realizó a 1000 rpm durante 25 min y (Nsanjabera, 2023) lo realizó a 2500 rpm durante 10 minutos.

En la investigación sobre Extracción de almidón de yuca (Torres P. , 2005) indica que al terminar la sedimentación, se obtienen tres capas: la inferior y más densa es el almidón; la intermedia, es un almidón mezclado con material proteico, de espesor variable y menos denso que el almidón denominada mancha y la capa superior es el agua residual. La mancha contiene almidón de baja densidad y menor calidad, su nivel de proteína es alto, empleándose en la alimentación de porcinos y en la elaboración de adhesivos a escala industrial.

En cuanto al tiempo de secado (Akintunde, 2013) indica que las muestras de almidón de yuca secadas a menor temperatura tienen mejores propiedades funcionales y de pegado, lo que indica que se deben utilizar métodos de secado alternativos al secado al sol y a temperaturas inferiores a 40°C para obtener productos de alta calidad.

En la investigación realizada por (Ma'aruf, 2020), sobre el proceso eficiente del almidón de yuca, indica que el almidón secado a 70°C presenta características más cercanas a las de un almidón comercial estándar y se lo demuestra en la siguiente tabla:

Tabla I-8 Tabla Poder de hinchamiento, solubilidad, viscosidad de la pasta y fuerza de gel del almidón de yuca con diferentes temperaturas de secado

Temperatura de secado (°C)	Poder de hinchamiento (g/g)	Solubilidad (%)	Viscosidad de la pasta (Pa.s)	Fuerza de gel (N)
70	24,57 ± 0,56	13,87 ± 0,38	0,98 ± 0,01	0,45 ± 0,03
80	22,03 ± 0,43	15,49 ± 0,38	0,82 ± 0,01	0,34 ± 0,01
90	21,95 ± 0,37	18,18 ± 0,42	0,66 ± 0,02	0,30 ± 0,01
100	21,17 ± 0,09	18,81 ± 0,42	0,45 ± 0,01	0,27 ± 0,02
Almidón comercial	25,37 ± 0,61	13,30 ± 1,26	0,23 ± 0,03	0,27 ± 0,02

Fuente: (Ma'aruf, 2020)

Por otra parte, sobre el tamaño de moliendo describe sus análisis según la siguiente tabla:

Tabla I-9 Tabla Poder de hinchamiento, solubilidad, viscosidad de la pasta y fuerza de gel del almidón de yuca con diferentes tamaños de molienda

Tamaño de Molienda (µm)	Poder de hinchamiento (g/g)	Solubilidad (%)	Viscosidad de la pasta (Pa.s)	Fuerza de gel (N)
-------------------------	-----------------------------	-----------------	-------------------------------	-------------------

45	27,60 ± 0,42	20,20 ± 1,50	0,82 ± 0,01	0,78 ± 0,01
53	32,21 ± 0,57	22,29 ± 1,39	0,86 ± 0,01	0,84 ± 0,03
63	33,47 ± 1,95	25,48 ± 0,51	0,90 ± 0,01	0,94 ± 0,02
Almidón comercial	25,37 ± 0,61	13,31 ± 1,26	0,23 ± 0,03	0,27 ± 0,02

Fuente: (Ma'aruf, 2020)

Esta Tabla indica que el almidón de yuca con el menor tamaño de molienda (63 μm) será adecuado como aglutinante y potenciador de la textura de los alimentos. El almidón comercial mostró la menor fuerza de gel debido a su tamaño de molienda muy pequeño de 0,29 μm y, por lo tanto, podría no ser adecuado para su aplicación en alimentos

Según el análisis proximal de almidón de yuca (Mera, 2004, p. 4), nos indica que un alto porcentaje de humedad es un riesgo en el almacenamiento del almidón, ya que se genera una actividad de agua propicia para el ataque de microorganismos, que no sólo afecta la calidad de este, sino también la calidad del producto final.

La Norma Técnica Colombiana NTC 6066 y la norma CODEX STAN 176-1989 indican que el porcentaje de humedad puede ser entre 12 y 13 % máximo.

Por último Olusola et al. (2015), evaluando el efecto de 4 genotipos de yuca obtuvo un rendimiento de 9,8 a 16,3%, por otra parte, Alarcón y Dufour (1998) obtuvieron un rendimiento de 29,5% y Velasco et al., (2008) de 17 a 25%.

1.6.1. Estudios previos de residuos del proceso de extracción de almidón de yuca.

De acuerdo con (Torres P. , 2005). El residuo de la fibra denominado también afrecho tiene un contenido de materia seca de 80 a 85%, del cual el 60 a 70% es almidón y 12 a 14% de fibra.

Según la Guía para La Obtención de Almidón de Yuca elaborada por (Betancourt, 2017) la cáscara de la raíz se puede reciclar como fertilizante o como pienso.

Fig. I-10 Pienso de Cáscara de Yuca



Fuente: (Made in China, 2024)

El bagazo de yuca es una rica fuente de almidón (50% en peso, base seca). A pesar de tener un bajo valor comercial actual como alimento para animales, este residuo podría utilizarse para la producción de productos de alto valor, como las ciclodextrinas según (Rojas, 2019).

En otras investigaciones la fibra también se han utilizado para la producción de ácido glutámico que con un tratamiento de pH adecuado se puede obtener un rendimiento del 3,86% de este ácido (Jyothi, 2005).

También se podría utilizar la cáscara para la producción de azúcar fermentable por hidrólisis enzimática según el estudio desarrollado por (Souto, 2016).

Según (Prasertzung, 2019) el almidón y el bagazo de yuca se pueden hidrolizar en azúcar fermentable tal como glucosa.

La importancia del lavado del almidón se debe a que, la mayoría de los glucósidos cianogénicos (cianuro unido) en las raíces se convierten en cianuro libre durante la operación de molienda. Entre el 40 y el 70% del cianuro total aparece en el agua utilizada para lavar el almidón del tejido desintegrado, y entre el 5 y el 10% aparece en el residuo fibroso según (Arguedas, 2007).

1.7. ASPECTOS AMBIENTALES Y ECONÓMICOS.

La producción y utilización del almidón de yuca presentan tanto oportunidades como desafíos desde una perspectiva ambiental y económica que es necesario tomar en cuenta.

Por otra parte, (Guo, 2013) indica en su investigación que se puede recuperar almidón de dichas aguas residuales utilizando el método enzimático acuoso pero con un rendimiento muy bajo en las condiciones óptimas consiguiendo una calidad de sedimento de 10,85 g/L, el contenido de almidón de sedimento fue de 80,40g/100 g, calidad de almidón crudo de 8,72 g/L es decir de un 0,872%.

El agua residual también puede ser tratada mediante la aplicación de la tecnología de filtro anaeróbico en términos de eficiencia de eliminación COD y TSS con hasta 70 y 90% respectivamente de acuerdo con (Patricia, 2023).

1.7.1. Aspectos económicos del almidón de yuca

1.7.1.1. Sostenibilidad económica.

La yuca es una materia prima renovable, que puede cultivarse en terrenos marginales con pocos insumos. Su cultivo fortalece las economías locales al ofrecer una fuente de ingresos constante y resiliente a los cambios del mercado.

1.7.1.2. Reducción de costos de producción.

Comparado con el almidón de fuentes como el maíz o el trigo, el almidón de yuca tiene menores costos de producción debido a la alta disponibilidad del cultivo en regiones tropicales y subtropicales.

1.7.1.3. Valor agregado.

La extracción de almidón permite transformar la yuca en productos con mayor valor comercial, como bioplásticos, espesantes alimentarios y productos cosméticos. Este valor agregado mejora la competitividad en mercados locales e internacionales.

1.7.1.4. Diversificación de ingresos.

Los productores pueden diversificar sus ingresos al comercializar tanto la raíz como el almidón. Además, los subproductos, como la fibra y el bagazo, pueden venderse como insumos para la alimentación animal o fertilizantes orgánicos.

1.7.1.5. Mercado potencial.

El almidón de yuca tiene aplicaciones en sectores como la industria alimentaria, farmacéutica, textil y plásticos biodegradables. Esto abre oportunidades en mercados internacionales, especialmente en países donde se promueve la economía circular y los productos sostenibles.

1.7.1.6. Gestión de residuos.

Los residuos generados durante la extracción pueden reutilizarse para producir biogás o compost, reduciendo costos operativos y aportando a la sostenibilidad económica.

1.7.2. Aspectos ambientales del almidón de yuca.

1.7.2.1. Sostenibilidad ambiental.

La extracción de almidón de yuca tiene un menor impacto ambiental en comparación con otras fuentes de almidón, ya que su cultivo requiere menos fertilizantes y pesticidas, y puede realizarse en suelos áridos sin competir directamente con cultivos alimentarios básicos.

1.7.2.2. Gestión de residuos.

Los subproductos de la extracción, como el bagazo o el agua residual, pueden ser gestionados de manera sostenible. Por ejemplo, el bagazo puede utilizarse como alimento para ganado o fertilizante, y el agua residual puede tratarse para riego.

1.7.2.3. Reducción de emisiones.

La producción de almidón de yuca genera menos emisiones de carbono en comparación con otras fuentes de almidón industrial. Además, su uso en la fabricación de bioplásticos ayuda a reducir la dependencia de plásticos derivados del petróleo.

1.7.2.4. Valor agregado a los residuos.

Los residuos generados durante el proceso pueden aprovecharse para producir bioenergía, mejorando la eficiencia del ciclo productivo y disminuyendo el impacto ambiental.

1.7.2.5. Contribución a la economía circular.

La yuca puede formar parte de un modelo de economía circular, donde los residuos de la extracción se integran en otros procesos industriales o agrícolas, minimizando el desperdicio.

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO Y PARTE

EXPERIMENTAL

2.1. INTRODUCCIÓN MARCO METODOLÓGICO Y PARTE EXPERIMENTAL

En este estudio se utilizó un método experimental enfocado en la extracción de almidón de yuca por vía húmeda, permitiendo evaluar variables críticas del proceso, como la relación masa volumen, pH del agua y tiempo de triturado. El enfoque experimental fue seleccionado debido a su capacidad para validar el rendimiento y la calidad del producto obtenido a escala laboratorio.

2.1.1. Método de la Investigación.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, empleando dos métodos principales: el método experimental y el método documental. Este enfoque permitió analizar de manera objetiva las variables que influyen en el rendimiento del almidón extraído, mediante la recopilación y análisis de datos numéricos obtenidos en laboratorio.

El presente trabajo de investigación aplicada “Extracción de Almidón a Partir de Yuca Amarilla (*Manihot esculenta* Crantz) a Escala Laboratorio” se realizó, en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias, dependiente de la Carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Juan Misael Saracho.

2.1.1.1. Método Experimental (Cuantitativo).

El estudio se basó en un método experimental con enfoque cuantitativo, ya que se realizaron pruebas experimentales preliminares y el desarrollo de los experimentos del diseño factorial, en laboratorio con el propósito de evaluar y optimizar el rendimiento del proceso de extracción de almidón. Se manipularon distintas variables operacionales, tales como: pH del agua de licuado, relación masa-volumen (yuca-agua), tiempo de secado, condiciones de molienda y tamizado

El enfoque cuantitativo permitió medir con precisión la influencia de estas variables en la eficiencia de extracción, determinando cómo impactaban en el rendimiento final del

almidón. A través de cálculos matemáticos y análisis estadísticos, se validaron los resultados obtenidos en cada experimento del diseño factorial.

El uso de este método facilitó la obtención de datos numéricos precisos, necesarios para optimizar el rendimiento, la comparación objetiva entre diferentes condiciones experimentales y la identificación de las condiciones óptimas para mejorar la eficiencia del proceso.

2.1.1.2. Método Documental.

De manera complementaria, se utilizó un método documental, el cual consistió en la revisión de literatura científica, normas técnicas y estudios previos relacionados con la extracción y caracterización del almidón de yuca.

Este método permitió establecer un marco teórico sólido, basado en investigaciones previas, comparar los valores obtenidos experimentalmente con estándares comerciales y justificar la selección de parámetros operacionales, en función de estudios previos y normativas.

Esta metodología implicó recopilar, seleccionar, analizar y presentar información coherente proveniente de diversos documentos, como revistas científicas, sitios web, tesis y otros recursos pertinentes. El propósito fue obtener una base de datos precisa y fundamentada sobre proyectos similares enfocados en la extracción y caracterización del almidón de yuca, proporcionando así un respaldo científico sólido.

2.1.1.3. Justificación de la Metodología.

La combinación del método experimental cuantitativo y el método documental permitió realizar un análisis integral del proceso de extracción de almidón de yuca amarilla. Mientras que el método experimental proporcionó mediciones precisas sobre el rendimiento y las propiedades del almidón obtenido, el método documental permitió respaldar los resultados con información científica validada.

El enfoque cuantitativo de la investigación garantizó que cada resultado fuera medido y analizado con precisión, asegurando la fiabilidad de los datos y su aplicabilidad en la optimización del proceso de extracción.

2.2. MUESTREO

El muestreo es una etapa fundamental para garantizar que la materia prima utilizada en el estudio sea representativa y adecuada para los objetivos de la investigación. En este caso, se empleó un muestreo aleatorio simple, asegurando que cada unidad de yuca seleccionada tuviera la misma probabilidad de ser elegida, sin sesgos en la selección.

2.2.1. Ventajas y desventajas de los tipos de yuca.

Existen diversas variedades de *Manihot esculenta* Crantz, cada una con características fisicoquímicas distintas que pueden influir en el rendimiento y la calidad del almidón extraído, se escogió al mejor tipo de yuca en función a la yuca que más ventajas presente.

En la siguiente tabla se describe las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de yuca:

Tabla II-1 Ventajas y Desventajas de los tipos de yuca

Variedad de Yuca	Ventajas	Desventajas
Yuca Amarilla	<ul style="list-style-type: none"> - Alto contenido de carotenoides (β-caroteno), mejor valor nutricional. - Alto rendimiento de almidón. - Resistente a plagas y enfermedades. - Buena adaptabilidad a diversos climas y suelos. - Bajo contenido cianogénico, segura para consumo. - Potencial de mercado creciente para alimentos funcionales. - Genera valor agregado en bioplásticos y bioenergía. - Favorece la sostenibilidad y diversificación de ingresos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede tener un costo inicial más elevado en comparación con variedades comunes como la blanca. - Menor disponibilidad en algunos mercados locales.
Yuca Blanca	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor disponibilidad y accesibilidad en el mercado. - Alta adaptabilidad agronómica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo contenido de carotenoides, menor valor nutricional.

	<ul style="list-style-type: none"> - Buen rendimiento de almidón. - Uso ampliamente reconocido en la industria de alimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contenido variable de cianuro en algunas variedades. - Menor potencial de valor agregado e innovación industrial.
Yuca Morada	<ul style="list-style-type: none"> - Contenido de antocianinas con propiedades antioxidantes. - Atractiva visualmente por su pulpa morada. - Valor tradicional en ciertos mercados locales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendimiento de almidón moderado. - Menor adaptabilidad a condiciones agronómicas diversas. - Menor resistencia a plagas, mayor uso de pesticidas. - Mercado limitado y de nicho.
Manihot utilissima	<ul style="list-style-type: none"> - Potencial de uso local como alimento básico. - Aporte en carbohidratos como fuente de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto contenido de cianuro, requiere procesamiento riguroso. - Susceptible a plagas y enfermedades. - Rendimiento de almidón más bajo. - Menor adaptabilidad y sostenibilidad. - Mercado reducido, limitado principalmente a zonas rurales.

Fuente: (Elaboración propia, 2024)

La yuca amarilla destaca por sus beneficios nutricionales, alto rendimiento industrial, resistencia y sostenibilidad, lo que la posiciona con un gran potencial en mercados emergentes, especialmente en alimentos funcionales e industrias innovadoras. Por otro lado, la yuca blanca es la más accesible y ampliamente utilizada, aunque su valor nutricional y oportunidades de desarrollo son limitados. La yuca morada sobresale por sus propiedades antioxidantes, pero enfrenta desafíos en su adaptabilidad y mercado reducido. Finalmente, la *Manihot utilissima* presenta varias desventajas, como su alto contenido de cianuro y menor rendimiento, lo que la hace menos competitiva en comparación con las demás variedades.

2.2.2. Procedencia de las Muestras.

El universo del estudio está conformado por la yuca amarilla (*Manihot esculenta* Crantz) cultivadas y comercializadas en Bolivia. La población objetivo para este estudio fue la yuca amarilla (*Manihot esculenta* Crantz) disponible para la venta en el mercado campesino de la ciudad de Tarija.

El objetivo del muestreo fue obtener una muestra representativa de la diversidad de yuca amarilla, considerando las variaciones regionales y las posibles diferencias en características físicas y químicas, provenientes de las principales regiones productoras que abastecen el mercado.

2.2.3. Estrategia de Muestreo Aleatorio Simple.

Se optó por un muestreo aleatorio simple para la selección de la materia prima. Se realizó un recorrido por el mercado campesino de Tarija, seleccionando puestos de venta de manera uniforme, procurando cubrir diferentes secciones del mercado para abarcar la posible variabilidad. Dentro de cada puesto seleccionado, se eligieron ejemplares de yuca amarilla al azar, sin seguir un patrón específico, asegurando así la inclusión de yuca proveniente de Santa Cruz, Los Yungas y El Chaco.

2.2.3.1. Criterios de selección de la muestra.

Para garantizar la calidad y consistencia de la muestra, se establecieron criterios claros de inclusión y exclusión. Los criterios de inclusión fueron:

Estado de madurez óptimo: La yuca debía estar en su punto óptimo de madurez para el procesamiento.

Ausencia de daños físicos: Se excluyó la yuca con golpes, cortes, pudrición o cualquier otro tipo de deterioro.

Uniformidad en tamaño: Se seleccionaron yucas de tamaño similar para garantizar consistencia en los resultados.

Por otro lado, se excluyó la yuca que no cumplieran con estos estándares o que presentaban signos evidentes de deterioro.

2.2.3.2. Tamaño de la muestra.

El tamaño de la muestra se determinó considerando la variabilidad de la yuca en las tres regiones y los recursos disponibles para el estudio y prueba experimental preliminar. Se seleccionó un total de 10 Kg de yuca por región, lo que suma un total de 30 Kg yuca para el estudio. Este número se considera adecuado para capturar la variabilidad natural del producto y garantizar la precisión de los resultados.

2.2.3.4. Justificación del muestreo.

El muestreo aleatorio simple fue seleccionado debido a su capacidad para garantizar que la muestra sea representativa de la población de yuca amarilla. Este enfoque minimiza los sesgos de selección y permite generalizar los resultados obtenidos. Además, la inclusión de yuca proveniente de tres regiones diferentes (Santa Cruz, Los Yungas y El Chaco) enriquece el estudio al capturar la variabilidad natural del producto, lo que resulta en conclusiones más robustas y aplicables a diferentes contextos.

La selección de un total de 10 Kg de yuca por región se justifica por ser un tamaño muestral suficiente para capturar las diferencias regionales y garantizar la confiabilidad de los resultados, sin exceder los recursos disponibles para la investigación.

También se seleccionó esta variedad de acuerdo con (Torres, 2022) indica que el contenido de cianuro (CN⁻) en la pulpa de la raíz, en yucas dulces es (< 100 mg HCN/Kg) y en agrias o amargas (> 100 mg HCN/Kg), también según (Vargas, 2021) e (PRIICA, 2016) indican que la yuca dulce posee (\leq 50 mg HCN/Kg) en comparación con la yuca Amarga, asegurado así tener una calidad en nuestra materia prima que permita el desarrollo adecuado del proceso de extracción de almidón a escala de laboratorio.

2.3. SELECCIÓN DEL PROCESO DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN.

En esta sección detallaremos la selección del método de extracción ocupado en el desarrollo experimental, los equipos empleados por dicho método.

2.3.1. Selección del proceso o método de extracción.

Mediante el análisis de la Tabla II-2 Ventajas y desventajas de los procesos de extracción por vía húmeda y por vía seca, se identificó que el método más adecuado para la investigación es por la vía húmeda.

Tabla II-2 Ventajas y desventajas de los procesos de extracción por vía húmeda y por vía seca

	Ventajas	Desventajas
Proceso Vía Húmeda	Tiene diversidad de combinaciones en formas distintas de desarrollar algunas etapas del proceso.	Consumo elevado de agua.
	Extensa información tecnológica accesible.	Necesidad de tratamiento de aguas residuales.
	Mayor pureza del almidón obtenido.	Equipos más complejos y costosos para el separado y secado de almidón.
	Mejor separación de impurezas y fibras.	-
	Puede adaptarse a diferentes escalas de producción, desde pequeñas hasta grandes industrias.	-
	Gran diversidad de aplicaciones.	-
	Facilidad operacional.	-
Proceso Vía Seca	Menor consumo de agua.	Menor pureza del almidón obtenido debido a la presencia de fibras y otras impurezas.
	Proceso más simple y menos costoso en términos de equipos.	Almidón con propiedades funcionales, pero inferiores comparado con el obtenido por vía húmeda en cuanto al grado alimentario.
	Menor impacto ambiental relacionado con la generación de aguas residuales.	Necesidad de un pretratamiento eficiente para reducir el contenido de fibras y otros residuos.
	Proceso más rápido.	Limitación de aplicaciones
	Proceso más sencillo y menos demandante en términos de infraestructura.	Más adecuado para pequeñas y medianas empresas o producción a nivel local.

Fuente: (Elaboración propia, 2024)

2.3.1.1. Evaluación de métodos y Procesos.

Se llevaron a cabo pruebas experimentales preliminares con aproximadamente 8 kg de yuca, en las cuales se evaluaron los métodos de extracción descritos en el marco teórico. El objetivo fue seleccionar o plantear un método más completo, funcional y eficiente, que permitiera controlar y desarrollar de manera óptima el proceso experimental. Para ello, se asignó una valoración a cada etapa de los procesos de extracción utilizando el método de puntuación cuantitativa.

El resultado de esta evaluación se plasma en la siguiente tabla:

Tabla II-3 Evaluación de métodos y procesos

N	Actividades del procesos	valoración	Método vía seca				Método vía húmeda			
			Proceso N° 1	Ponderación	Proceso N° 2	Ponderación	Proceso N° 1	Ponderación	Proceso N° 2	Ponderación
1	Lavado Materia P.	0,07	9,00	0,63	9,00	0,63	9,00	0,63	9,00	0,63
2	Pelado	0,05	9,00	0,45	9,00	0,45	9,00	0,45	9,00	0,45
3	Rallado	0,07	5,00	0,35	5,00	0,35	9,00	0,63	0,00	0,00
4	Pre-Deshidratado	0,02	0,00	0,00	3,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
5	Pre-Molido	0,02	0,00	0,00	3,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Deshidratado	0,07	7,00	0,49	7,00	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00
7	Molido	0,07	7,00	0,49	7,00	0,49	0,00	0,00	5,00	0,35
8	Tamizado	0,09	7,00	0,63	7,00	0,63	0,00	0,00	7,00	0,63
9	Troceado	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,25
10	Primer Lavado	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	0,40	7,00	0,35
11	Triturado	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	0,80
12	Filtrado	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	0,40	8,00	0,40
13	Sedimentation	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,25
14	Lavado de Almidón	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	0,35
15	Centrifugación	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	9,00	0,90	0,00	0,00
16	Secado	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	9,00	0,63	5,00	0,35
			Total							
				3,04		3,16		4,04		4,81

Fuente: (Elaboración propia, 2024)

Los procesos evaluados con el método vía húmeda obtuvieron mayores ponderaciones totales en comparación con el método vía seca, indicando que es un método más eficiente y completo para la extracción de almidón haciendo énfasis en las siguientes etapas:

Lavado de Materia Prima. Es crucial en ambos métodos, con puntuaciones altas y una ponderación constante.

Pelado. También es relevante, con alta ponderación.

Rallado. Importante para el método vía húmeda (Proceso N°1), pero tiene menor relevancia en el método vía seca.

El Proceso N°2 del método vía húmeda es el más destacado, con una ponderación total de 4,81, sugiriendo que incorpora más actividades importantes, como centrifugación y Lavado de almidón, que impactan positivamente en el proceso demostrando su eficacia y capacidad para extraer almidón de mejor calidad de manera más eficiente.

El segundo proceso de este método será modificado en la etapa de sedimentación a través de centrifugación. También se realizará adición de algunas etapas necesarias para optimizar el proceso y lograr una extracción más eficiente. Esta decisión se basa en la disponibilidad de todos los equipos mecánicos para llevar a cabo estas modificaciones de manera adecuada, con el objetivo de aumentar el rendimiento del proceso.

2.3.1.2. Justificación técnica de la elección del proceso.

Uno de los puntos importantes para la elección de este proceso fue la mayor cantidad de información y estudios a los cuales se puede acceder, dando así mayor facilidad operacional y tecnológica pudiendo así tomar en cuenta detalles del proceso que permitirá tener un desarrollo óptimo del mismo.

La versatilidad en la adaptación del proceso fue otro de los puntos tomados en cuenta, ya que en las distintas etapas del proceso de extracción por vía húmeda se tienen cambios en cuanto a su ejecución como se pudo observar en la parte bibliográfica,

pudiéndose optar por algunas etapas en los cuales se pueda tener un mayor control de las mismas dando una gran cantidad de opciones a tomar en cuenta y así elegir o formular una técnica que permita una extracción eficiente.

Es importante tomar en cuenta la calidad del producto y si bien los parámetros de fibra llegan a ser similares en ambos procesos según la Tabla. I-6 se puede observar que por el proceso de extracción por vía seca existe presencia de Ácido Cianhídrico el cual por la vía húmeda es extraído junto con el exceso de fibra en los procesos de lavado de almidón. El contenido de amilosa es importante para la funcionalidad del producto según la Tabla. I-6 se tiene que por el proceso de la vía seca presenta una leve superioridad en cuanto a porcentaje de amilosa tomando en cuenta que dicha tabla es sobre las propiedades fisicoquímicas del mejor ensayo del mismo, comparando estos resultados con la Tabla. I-4 podemos observar la clara superioridad en cuanto al contenido de amilosa obtenido por los distintos autores de los cuales son extraídos por vía húmeda.

2.3.2. Equipos.

Los Equipos utilizados para el desarrollo experimental se encuentran descritos en la siguiente tabla:

Tabla II-4 Especificaciones de los equipos utilizados en el desarrollo experimental

Balanza	
	Modelo: Scale SF 400
	Marca: Electronic Kitchen
	Capacidad: 1g – 10000g
	Diámetro del plato de pesado: 14,500x14,500 cm
	Dimensiones: 17,00x2,45x3,50 cm
	Peso: 282 g
	Energía: 2 pilas AA de 1,50 V
	Descripción: Equipo utilizado para determinar el peso de la materia prima y la yuca pelada
pHmetro	
	Modelo: pH-2 Pro
	Marca: DADAKEWIN

	Margen de Medición: -2 a 16
	Resolución: 0,01 pH
	Exactitud: +/-0,01pH
	Peso: 50 g
	Temperatura de operación: 0°C - 80°C
	Dimensiones: 155x31x18 mm
	Tensión: 2*1,50 V
	Descripción: Equipo para medir el pH en la etapa de ajuste de pH
Licuada (Trituradora) - Moledora	
	Modelo: MO-N599
	Marca: MORLEY
	Capacidad: 1500 mL
	Diámetro de Base Giratoria 55x55 mm
	Dimensiones: Base: 16,50x20x14 cm Jarra: 18x13x25 cm Moledora: 11x11x12 cm
	Peso: 4 Kg
	Potencia: 0,50 W
	Descripción: Equipo utilizado para realizar la trituración de la yuca y la molienda del almidón seco previo a su envasado
Centrifuga	
	Modelo: T32c
	Marca: JANETZKI
	rpm: 500 - 3000
	Diámetro de Centrifugado: 28x28 cm
	Dimensiones: 45,50x33,70x29,50 cm
	Peso: 50 Kg
Potencia: 0,08 KW	
Descripción: Equipo utilizado para acelerar la sedimentación de los gránulos de almidón presentes en las diferentes soluciones acuosas en las que el almidón este presente	
Balanza Analítica	
	Modelo: EU- 500
	Marca: GIBERTINI
	Capacidad: 1g – 510g
	Diámetro del plato de pesado: 15x15 cm

	Dimensiones: 21,50x33x9,50 cm
	Peso: 3 Kg
	Potencia: 0,014 KW
	Descripción: Equipo utilizado para determinar el peso de las muestras y de los insumos
Estufa	
	Modelo: FB 420
	Marca: HERAEUS
	Volumen: 60 L
	Rango de Temperatura: 40 – 250 °C
	Potencia: 0,30 KW
	Dimensiones de bandejas: 45x37,50 cm
	Dimensiones: 55x45x40 cm
	Peso: 40 Kg
Descripción: Equipo utilizado para secar las muestras de almidón húmedo extraído	
Balanza de infrarrojos	
	Modelo: MA100
	Marca: SARTORIUS MOISTURE ANALYZER
	Rango de Temperatura: 100 – 200 °C
	Diámetro Platillo de muestras: 10 cm
	Dimensiones: 35x55x22 cm
	Peso: 5,50 Kg
	Potencia: 0,40 KW
Descripción: Equipo utilizado para la medición del parámetro de humedad	
Tamizador Vibratorio	
	Modelo: Orto Ta 002
	Marca: ORTO ALRESA
	Velocidad: 10000 rpm
	Tensión: 230 V
	Potencia: 0,92 KW
	Intensidad de corriente: 0,40 A
	Frecuencia: 50 Hz
Recorrido de tamices: 3 mm - 63 µm	

	<p>Descripción: Equipo utilizado para separar las partículas de diferente tamaño.</p>									
Envasadora al Vacío										
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="803 661 1385 695" style="text-align: center;">Modelo: E044</td> </tr> <tr> <td data-bbox="803 695 1385 730" style="text-align: center;">Marca: HELICH</td> </tr> <tr> <td data-bbox="803 730 1385 766" style="text-align: center;">Capacidad de la cámara de vacío: 44 L</td> </tr> <tr> <td data-bbox="803 766 1385 802" style="text-align: center;">Tiempo de ciclo de vacío: 20 – 40 s</td> </tr> <tr> <td data-bbox="803 802 1385 837" style="text-align: center;">Dimensiones: 52x54x42 cm</td> </tr> <tr> <td data-bbox="803 837 1385 873" style="text-align: center;">Peso: 46 Kg</td> </tr> <tr> <td data-bbox="803 873 1385 909" style="text-align: center;">Potencia: 0,70 KW</td> </tr> <tr> <td data-bbox="803 909 1385 945" style="text-align: center;">Nivel de vacío máximo: -0,95 bar</td> </tr> <tr> <td data-bbox="803 945 1385 1075" style="text-align: center;">Descripción: Equipo utilizado el envasado al vacío garantizando la conservación del producto.</td> </tr> </table>	Modelo: E044	Marca: HELICH	Capacidad de la cámara de vacío: 44 L	Tiempo de ciclo de vacío: 20 – 40 s	Dimensiones: 52x54x42 cm	Peso: 46 Kg	Potencia: 0,70 KW	Nivel de vacío máximo: -0,95 bar	Descripción: Equipo utilizado el envasado al vacío garantizando la conservación del producto.
Modelo: E044										
Marca: HELICH										
Capacidad de la cámara de vacío: 44 L										
Tiempo de ciclo de vacío: 20 – 40 s										
Dimensiones: 52x54x42 cm										
Peso: 46 Kg										
Potencia: 0,70 KW										
Nivel de vacío máximo: -0,95 bar										
Descripción: Equipo utilizado el envasado al vacío garantizando la conservación del producto.										

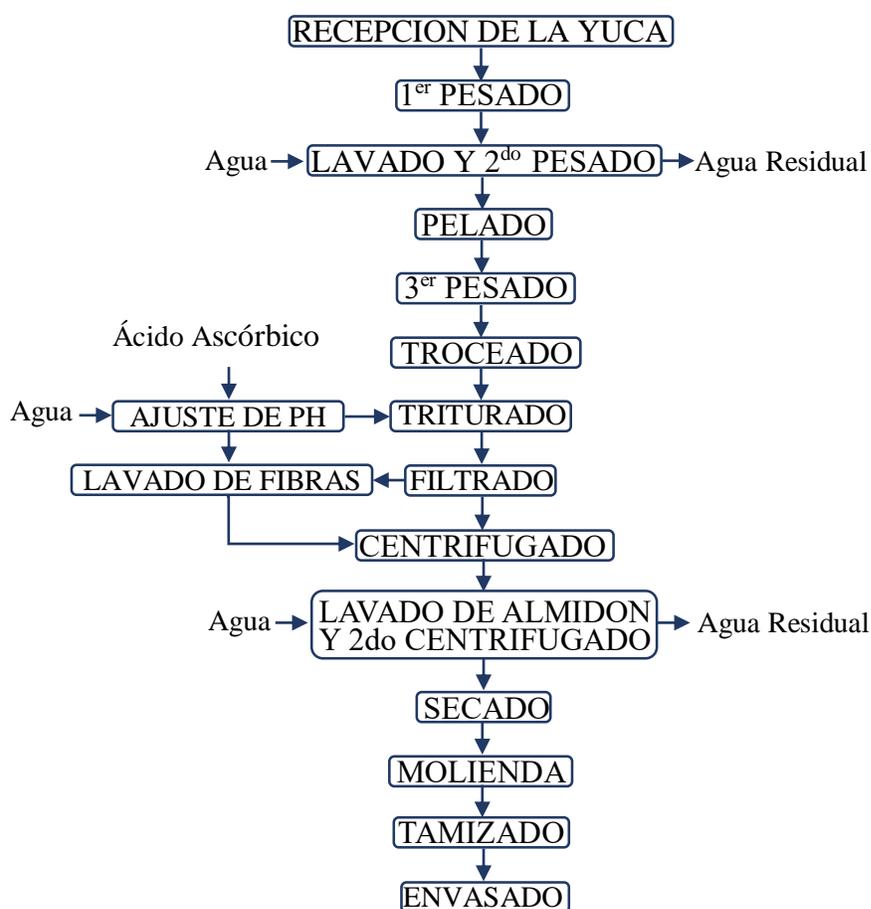
Fuente: (Elaboración propia, 2024)

2.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EXPERIMENTAL DESARROLLADO.

Para el desarrollo de toda la investigación, se utilizó un total de 30 kg de yuca aproximadamente. Sin embargo, para la descripción del proceso experimental, se presenta el desarrollo con una base de 100 g de yuca. Esta base se empleó en todas las pruebas preliminares experimentales y en todos los experimentos realizados en esta investigación.

A continuación, se presenta el diagrama diseñado del proceso de extracción a utilizar:

Fig. II-1 Diagrama del proceso de extracción de almidón de Yuca por vía húmeda



Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.4.1. Recepción de la Materia Prima.

Se compró la materia prima del mercado campesino la cual proviene un 33,333% del Norte de La Paz, Los Yungas, otro 33,333% Santa Cruz, San José de Velasco y el resto

de Bermejo Tarija, se utilizó la variedad *Manihot esculenta* Crantz amarilla, más conocida coloquialmente como Yuca dulce amarilla, al comprar la yuca se la inspeccionó cuidadosamente para asegurar que esta no se encuentre en mal estado.

Se pesó la yuca, en la balanza Electronic Kitchen - Scale SF 400, para registrar la cantidad exacta de materia prima que se iba a procesar, lo cual permitió controlar el rendimiento a lo largo del proceso.

Fig. II-2 Recepción de la materia Prima



Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.4.2. Lavado y segundo pesado.

En esta etapa se procedió a pesar la materia prima y a lavar dichas raíces de yuca con un flujo abundante de agua aproximadamente dos litros por cada kilo es decir una relación 2:1, para eliminar cualquier rastro de tierra, impurezas y otros residuos. Además, esta operación permite detectar la presencia de putrefacciones, piedras, etc que podrían afectar la calidad del producto final.

Fig. II-3 Etapa de Lavado y Pesado de la materia Prima



Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.4.4. Pelado.

La corteza de yuca contiene una alta concentración de glucósidos cianogénicos, los cuales, al ser degradados por acción enzimática, generan ácido cianhídrico. Por este motivo, la etapa de pelado es fundamental, ya que la corteza no es fácilmente digerible por el ser humano y presenta elevados niveles de cianuro.

Debido a esto se retiró la cáscara de la yuca, dejando únicamente la pulpa amarillenta que es la parte rica en almidón.

Fig. II-4 Etapa de Pelado de la materia Prima



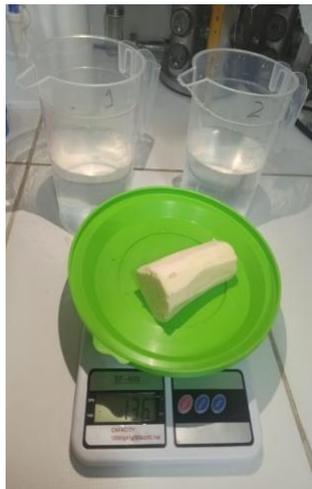
Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.4.5. Tercer pesado.

Con la yuca ya pelada, se realizó un lavado rápido, por cada 100 gramos de yuca pelada 50 mL de agua, es decir una relación 1:0,50 para quitar residuos o impurezas en la superficie asegurando que esta se encuentre limpia. Posteriormente se realizó un tercer pesado para calcular la pérdida de material durante el pelado.

El volumen de agua a utilizar en el proceso de extracción y de lavado de bagazo o fibra de yuca, se decidió tomar en relación a la masa de yuca pelada para así minimizar el consumo de agua, y esta relación fue definida según el análisis de la Tabla II-12 (Matriz de variación del rendimiento en función al volumen del agua en el triturado y lavado de almidón), la cual indica para los niveles de esta variable se tendrá que por cada 100 g de yuca pelada se utilizarán 500 y 600 mL de agua, es decir, una relación 1:5 y 1:6 respectivamente para cada nivel.

Fig. II-5 Etapa 2do pesado y cálculo de Volumen de agua a utilizar



Fuente: Elaboración Propia, 2024

El agua utilizada para el desarrollo experimental fue de la empresa es MAXARPEL y el producto es agua FAN que llegaría a ser un agua purificada de mesa su origen es de vertientes naturales minerales.

2.4.6. Troceado.

En este proyecto se optó por cortar la yuca pelada en trozos con un tamaño aproximado de 1,50 a 2 cm por lado, debido a que la masa promedio de yuca pelada era aproximadamente 79 g y de yuca sin pelar 100 g, si bien la mayoría de los fragmentos presentaban una forma cúbica, algunos trozos adquirieron formas poligonales e irregulares dentro de estas dimensiones, aumentando la superficie de contacto para facilitar el triturado y mejorar la eficiencia en la extracción del almidón.

Fig. II-6 Etapa de Troceado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.4.7. Ajuste de pH.

Para el ajuste del pH se aplicó Ácido Ascórbico al 99% en estado sólido la cantidad se definió en función al volumen de agua que se utilizaría en el proceso de extracción y al pH que se desea alcanzar. El pH fue medido con un pHmetro digital de bolsillo (pH-2 Pro), se debe tomar en cuenta que se necesita dos volúmenes iguales uno para la etapa de triturado y otro para la etapa de lavado cada uno con una relación 1:5 o 1:6 que corresponda. A continuación, se presenta el cálculo de masa de ácido a utilizar para obtener un pH de aproximadamente 5 según las siguientes ecuaciones.

Datos.

$$V [L] = 0,69$$

$$pH = 5,00$$

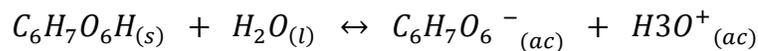
$$[H_3O^+] = 10^{-pH} = x$$

$$PM [g/mol] = 176,12$$

$$pKa = 4,20$$

$$Ka = 7,58 \cdot 10^{-5}$$

Ecuación II-1 Reacción reversible de Ácido Ascórbico



C_o	C	$-$	$-$
C_{eq}	$C - x$	x	x

Ecuación II-2 Ecuación de constante de acidez

$$Ka = \frac{[C_6H_7O_6^-][H_3O^+]}{[C_6H_7O_6H]} \quad (2)$$

$$Ka = \frac{x \cdot x}{C - x} = \frac{x^2}{C - x}$$

$$Ka = \frac{x^2}{C - x} \rightarrow C = \frac{x^2}{Ka} + x = \frac{(10^{-pH})^2}{7,586 \cdot 10^{-5}} + 10^{-pH}$$

$$C = 1,13 \cdot 10^{-5} \frac{mol}{l}$$

Ecuación II-3 Ecuación de moles del Ácido

$$n = C * V$$

$$n = 7,81 \cdot 10^{-6} \text{ mol}$$

Ecuación II-4 Ecuación de masa del Ácido al 100%

$$m = n * PM$$

$$m_{100\%} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ g}$$

Ecuación II-5 Ecuación de masa real del Ácido al 99%

$$m_{99\%} = m * (1,000 + 0,010)$$

$$m_{99\%} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ g}$$

En las pruebas preliminares resumidas en la Tabla II-14 (Matriz de variación del rendimiento en función del pH del agua en el triturado y lavado de almidón) se observó que para un caso similar con un pH obtenido de 5,02 en la solución de yuca triturada realmente se necesitó 0,05 g de ácido ascórbico, esto se debe principalmente a que al estar el agua en contacto con la yuca el pH varía y se hace más básico.

Por lo tanto, para trabajar con los niveles de pH adecuados, se utilizó los valores de masa calculados como base y se incrementó la cantidad de ácido hasta alcanzar valores de pH cercanos a 5 y 6. Durante esta etapa, se midió constantemente el grado de acidez de la solución con un pHmetro y se proporcionó la masa de ácido ascórbico necesario hasta alcanzar los niveles requeridos, los cuales fueron definidos según la Tabla II-14.

Fig. II-7 Etapa de ajuste de pH en los volúmenes de agua



Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.4.8. Triturado.

Es aconsejable realizar el triturado con un equipo de alta velocidad según (Betancourt, 2017) y otros investigadores, por lo cual se utilizó una licuadora de la marca Morley MO-N599 para realizar esta etapa del proceso.

Fig. II-8 Etapa de Triturado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Los trozos de yuca fueron triturados con un volumen de agua según su proporción y pH correspondiente, la variable del tiempo de triturado se la definió en función a la Tabla II-6 (Matriz de variación del rendimiento en función del tiempo de Triturado) teniendo por niveles de esta variable el tiempo de 1 min y 1:15 min, la velocidad de triturado fue de 16000 rpm definida según la Tabla II-7 (Matriz de variación del rendimiento en función de la velocidad de Triturado), en cuanto a la temperatura del agua se decidió que esta sea a temperatura ambiente ya que el aumento de la temperatura incrementa mínimamente el rendimiento de la extracción esto se lo puede verificar según la Tabla II-11 (Matriz de variación del rendimiento en función de la temperatura inicial del agua).

2.4.9. Filtrado.

En este proyecto la mezcla obtenida del triturado se filtró con una bomba al vacío a una presión de 10 mbar ya que es la máxima que permite el equipo, con la ayuda de un papel filtro de celulosa de poro grande, la cual permite solo el paso de los gránulos de almidón y agua ya que su abertura es de $40\mu\text{m}$, para separar el resto de sólidos y fibras obteniendo así un extracto más puro, a continuación, se presenta una foto del papel filtro utilizado.

Fig. II-9 Papel filtro de celulosa de poro grande antes y después de filtrar



Fuente: Elaboración Propia, 2024

El tiempo de filtrado fue aproximadamente de 10 min por cada prueba preliminar o experimento realizado.

Fig. II-10 Etapa de Filtrado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

El líquido filtrado se lo deposito en una jarra de plástico con una capacidad de 2 L. El líquido presenta una coloración amarillenta que lleno un total de 6 frascos de la

centrifuga por experimento a base de 100 gramos de materia prima entre la relación 1:5 y 1:6 del volumen de agua utilizado, los frascos fueron adaptados a la centrifuga para el manejo de un mayor volumen en cuanto al procesos de producción.

Fig. II-11 Frascos del Filtrado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.4.10. Lavado de fibras.

Los residuos sólidos y las fibras trituradas se lavaron con la mitad del volumen de agua utilizado en la etapa de ajuste de pH. De la misma manera, se añadió ácido ascórbico hasta alcanzar el grado de acidez requerido.

Durante este lavado, se enjuagó el envase de trituración utilizado, ya que algunos restos de yuca triturada quedaron adheridos al fondo y a las paredes del recipiente. Este lavado se filtró nuevamente en el mismo embudo, utilizando el mismo papel filtro de la primera filtración y aplicando la misma presión de vacío. Gracias a este proceso, se logró extraer un poco más de almidón, aproximadamente un 3 %.

Fig. II-12 Etapa Lavado de Fibras



Fuente: Elaboración Propia, 2024

El líquido filtrado del lavado igualmente llenó un total de 6 frascos, y su coloración es un poco blanquecina, estos frascos pasan a ser centrifugados. Cada frasco tiene una capacidad máxima de 90 mL, pero por lo general se ocupaba un volumen menor al máximo para que todos los frascos estén al mismo nivel y no se tenga inconvenientes al momento de la centrifugación.

El volumen total de agua utilizado en las etapas de filtración y lavado de fibras fue de 13 L para todas las pruebas preliminares, 15 L para las pruebas experimentales de determinación de variables (que incluyeron 14 experimentos a diferentes variables de extracción más su repetición), y aproximadamente 18 L para los experimentos del diseño factorial (que sumaron 16 experimentos a diferentes variables más su repetición).

En total, para estas etapas mencionadas, se utilizaron 46 L de agua. Cabe destacar que, por cada experimento, se emplearon 12 frascos en total: 6 para la filtración y 6 para el lavado de fibras.

Fig. II-13 Frascos del lavado de fibras



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Una vez lavado el residuo de la fibra se lo podría llegar a utilizar como alimento para animales según (FAO, 2007), pero en este caso se lo desecha.

2.4.11. Centrifugado.

Una vez que el extracto de almidón fue trasladado a los recipientes adaptados a la centrifuga Janetzki - T32c se revisó que estos estén en una proporción volumétrica semejante entre cada frasco, buscando tener un equilibrio entre recipientes y no tener

un desbalance de fuerzas al momento de realizar el centrifugado, el mismo se realizó a una velocidad de 3000 rpm (Velocidad máxima de la centrifuga), a una temperatura ambiente de 20°C y por un tiempo de 17 min, separando el almidón del agua y otras impurezas, concentrando así el producto.

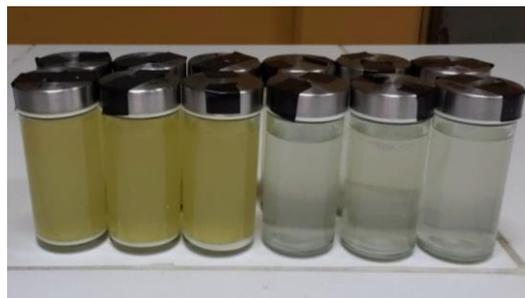
Fig. II-14 Etapa de Centrifugado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

En total se centrifugo 12 frascos, por cada experimento realizado a diferentes variables. Inicialmente se centrifugaron los primeros cuatro frascos del lavado de fibra. En una siguiente fase dos pares de frascos del lavado de fibra y del filtrado. Por último, los cuatro frascos restantes del filtrado. Esto con el fin de que los frascos del filtrado sedimentaran y, mediante la centrifugación separar la mayor cantidad de almidón. A continuación, se presenta la apariencia de los frascos al finalizar esta etapa:

Fig. II-15 Frascos posterior a la centrifugación



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Una vez completado el centrifugado de los doce frascos se desechó la capa de agua residual de todos ellos. En los frascos de filtrado, el agua mostraba un tono amarillento, mientras que en los frascos de lavado de fibra era un poco translucido y presentaba cierta turbidez. Esta turbidez era resultado de las partículas de almidón que no habían sedimentado, junto con algunas impurezas y la sobre trituración o la sobre degradación de la pared celular de la yuca.

2.4.12. Lavado de almidón y segundo centrifugado.

A los primeros cuatro frascos agregó 25 mL de agua a cada uno con un pH de 7,54 a 7,31 aproximadamente. Con una varilla de vidrio se agito el contenido hasta que el almidón sedimentado en el fondo del frasco se disolviera en el agua. Luego, se utilizó un embudo para transferir la mezcla a los otros cuatro frascos. No obstante, se llegó a observar que los primeros frascos presentan residuos de almidón en sus paredes. Para recuperar estas remanentes, se agregó a estos frascos 25 mL de agua realizando un enjuague y de la misma manera se trasladó estos líquidos disueltos con remanentes de almidón con el mismo embudo. Esto resulto en un total de 50 mL de agua en cada uno de los cuatro frascos. Se repitió este proceso para los últimos cuatro frascos dando un volumen de agua total de 75 mL en cada uno de ellos.

Fig. II-16 Etapa Lavado de Almidón



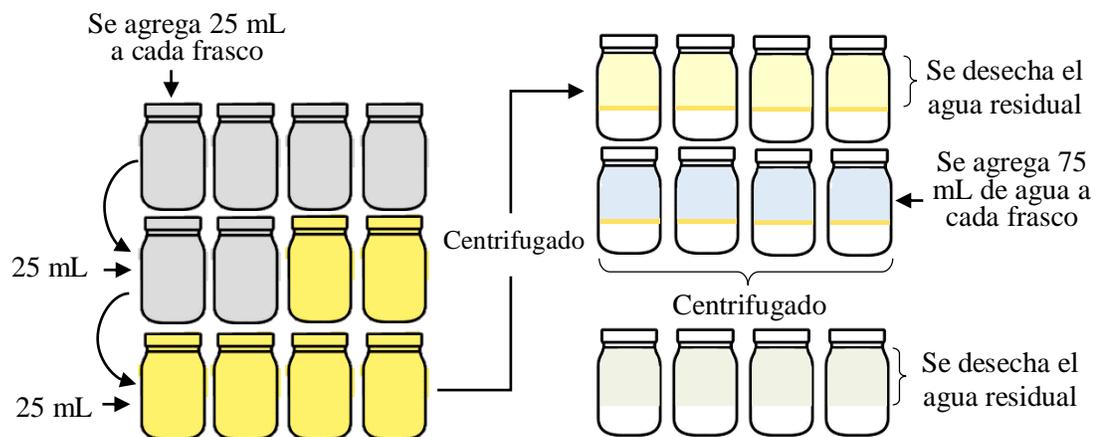
Fuente: Elaboración Propia, 2024

Posteriormente, se realizó un nuevo centrifugado, durante el cual se divisó claramente tres capas distintas: la capa inferior, que es la más densa, corresponde al almidón puro; la capa intermedia, conocida "mancha", está compuesta por una mezcla de almidón de baja densidad y restos de fibra triturada, presentando un grosor variable y una densidad inferior que el almidón sedimentado; y, finalmente, la capa superior consiste en el agua residual.

Se observó que la mancha se acumuló al trasvasarse entre los frascos, para eliminarla se desechó el agua de esta centrifugación y se realizó un lavado más, agregando otros 75 mL de agua, seguido de un nuevo centrifugado, logrando así que el almidón extraído quede libre de mancha.

Para facilitar la comprensión de esta etapa, se presenta la siguiente gráfica descriptiva que inicia después de centrifugar los frascos de lavado de fibra y los frascos del filtrado:

Fig. II-17 Procedimiento gráfico del lavado de almidón



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Se puede considerar que exista una pérdida mínima de almidón de baja densidad que se presenta junto con la mancha de fibra, la cual podría ser considerada como parte de la diferencia del almidón presente en la yuca en relación con el almidón extraído después del secado.

2.4.13. Secado.

Un elevado porcentaje de humedad representa un riesgo durante el almacenamiento del almidón, creando un ambiente ideal para el desarrollo de microorganismos. Por lo tanto, el desarrollo de esta etapa es crucial para determinar la calidad del producto final.

En la selección de la temperatura de secado, se tomó en cuenta las referencias de investigaciones previas donde se ve un descenso brusco de 70°C a un valor recomendado menor a 40°C. En consecuencia, el valor que se utilizó para el secado en este proyecto fue de 40°C, empleando la estufa Heraeus – FB 420, considerando que la temperatura ambiente medida en el desarrollo experimental fue de 25°C con una humedad relativa del 40%.

El almidón húmedo se extrajo de los frascos y se los colocó en bandejas de aluminio, de 10 cm de largo por 10 cm de ancho y un alto de 0,50 cm, en estos envases se los llevó a la estufa por un determinado tiempo, entre 5,50 a 6 h a una temperatura de 40°C según el peso del almidón húmedo extraído, se usó la balanza analítica EU500. Desde este punto del proceso en adelante, el almidón fue secado hasta alcanzar un contenido de humedad óptimo aproximado al 10% con controles de humedad para establecer el tiempo que necesita para llegar a la humedad deseada.

Fig. II-18 Etapa de Secado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Se verificó el contenido de humedad del almidón seco con la balanza de infrarrojo, Sartorius Moisture Analyzer - MA100, con una muestra de 0,50 g.

Cuando el almidón cumplía los parámetros de humedad establecida se continuaba con la etapa de molienda, en caso de tener una humedad mayor al 10% se lo regresa a la estufa por un tiempo de 15 min por cada unidad de porcentaje que faltara.

Se decidió optar por un porcentaje de humedad del 10% ya que la Norma Técnica Colombiana NTC 6066 y la norma CODEX STAN 176-1989 indican que el porcentaje de humedad puede ser entre 12 y 13% máximo y también para prever la posible absorción de humedad del aire en el proceso de molienda, tamizado y envasado.

2.4.14. Molienda.

El almidón seco fue molido en el accesorio de trituración de la licuadora Morley MO-N599, este accesorio permitió analizar la molienda del almidón en proporciones de entre 15 y 22 gramos según cada experimento a diferencia del molino de martillo y el molido de bolas que se tenían en el LOU, los cuales precisan de un mínimo de 50 y 100 g respectivamente para tener pérdidas mínimas.

Fig. II-19 Molienda del almidón seco



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Se procedió a moler el almidón seco a una velocidad de 25000 rpm seleccionada en base a los resultados presentados en la Tabla II-15 (Variación de la retención por tamices en función de la velocidad de molienda). El tiempo de molienda se estableció en 1 minuto y 15 segundos, según lo indicado en la Tabla II-16 (Variación de la

retención por tamices en función del tiempo de molienda). Este proceso permitió obtener un polvo con un tamaño de partícula inferior a $63 \mu\text{m}$, el cual, de acuerdo con Ma'aruf (2020), resulta adecuado como aglutinante y potenciador de textura en alimentos. Este tamaño de partícula no solo mejora las propiedades texturales de los productos, sino que también facilita su aplicación en diversas formulaciones alimentarias.

2.4.15. Tamizado.

Los gránulos de almidón molido fueron sometidos al proceso de tamizado utilizando una tamizadora Orto Alresa - Orto TA 002, operando a una velocidad de 5000 rpm durante un tiempo de 10 minutos. La muestra molido se colocó en un tamiz de 0,50 mm para garantizar una distribución uniforme del tamaño de partícula, asegurando que ninguna partícula superara el diámetro de las rendijas del tamiz. Como resultado, se obtuvo un producto homogéneo, con un 73 % de partículas de almidón con un diámetro inferior a $6,30 \times 10^{-2} \text{ mm}$ ($63 \mu\text{m}$), de acuerdo con los parámetros establecidos en la Tabla II-16 (Variación de la retención por tamices en función del tiempo de molienda).

Fig. II-20 Etapa de Tamizado



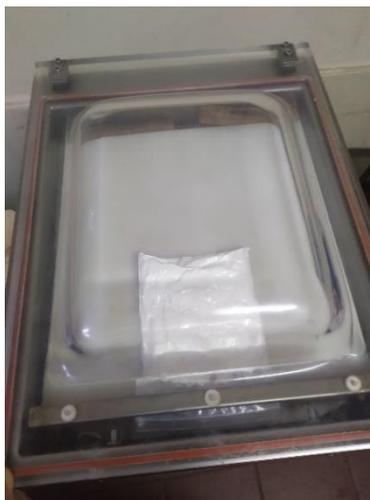
Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.4.16. Envasado.

Finalmente, el almidón fue envasado al vacío en bolsas plásticas de polietileno utilizando la envasadora Helich - E044. Este proceso se realizó con un rango de

humedad ligeramente superior en 0,3 a 0,5% a la humedad registrada al salir de la etapa de secado, que en los casos más críticos alcanzó aproximadamente 10,5 %. Asegurando su protección contra la humedad y otros contaminantes, preparándolo para su almacenamiento y transporte con una determinación de vida útil aproximadamente de un año según un comportamiento estándar de los almidones comerciales y la norma CODEX STAN 176-1989.

Fig. II-21 Etapa de Envasado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.5. VARIABLES DE EXTRACCIÓN POR VÍA HÚMEDA.

En esta investigación, las variables que permitieron determinar una mejor liberación de los gránulos de almidón se definieron mediante la comparación de una serie de experimentos. En estos experimentos, se identificaron las variables más significativas a través de un análisis cuantitativo (rendimiento) y un análisis cualitativo (calidad del producto, como la presencia de manchas de fibra).

La justificación o validación de cada variable permitió establecer los parámetros en los cuales dicha variable mostró un mejor rendimiento, manteniendo constantes las demás variables analizadas. Esto demostró la relevancia de cada variable en el proceso, con el objetivo de maximizar el rendimiento y proponer una técnica final eficiente dentro de los parámetros de calidad del producto. Cabe destacar que el rendimiento adquirido

para justificar las variables de extracción se registró después de la etapa de secado, con el fin de enfatizar la extracción y los parámetros de calidad correspondientes.

La elección de las variables, basada en los mejores rendimientos obtenidos en las pruebas preliminares, se resume en la siguiente tabla:

Tabla II-5 Resumen de la Elección de Variables

Variable	Observación	Niveles		Justificación
		1	2	
Velocidad de Triturado	Triturar de más afecta a la sedimentación y triturar poco no permite liberar todos los gránulos de almidón.	16000 rpm constante		Esta variable será constante porque mostró mayor rendimiento en pruebas experimentales y la licuadora no brinda opciones intermedias de velocidad.
Tiempo de Triturado		1:00 min	1:15 min	
Tiempo de Centrifugado	Para sedimentar el almidón extraído se lo centrifugará para optimizar el tiempo y el rendimiento.	20 min constante		Se tomará en cuenta este tiempo dado que según la regresión logarítmica sería lo más óptimo para la sedimentación del almidón.
Velocidad de Centrifugado		3000 rpm constante		
Temperatura inicial del agua	Variar la temperatura permite liberar un poco más los gránulos de almidón y separar eficientemente las impurezas.	Temperatura ambiente		Se toma en cuenta estos niveles ya que son la temperatura máxima antes de entrar a una gelatinización del almidón y debido a que en estas se pudo observar un leve aumento del rendimiento.
pH óptimo de extracción	Un pH levemente ácido ayuda a degradar la pared celular y liberar los gránulos de almidón.	5	6	Se tomarán estos niveles de pH debido a que tienden a presentar un mejor rendimiento según las pruebas experimentales.
Volumen de agua en extracción y lavado de fibras	Un volumen preciso de agua ayuda a mejorar la extracción por el arrastre del agua y moderar el uso del mismo.	1:5	1:6	Estas relaciones serán las utilizadas en el desarrollo experimental debido a que se asemejan en base a (Mogollon, 2018) y a que presentan un mejor rendimiento según las pruebas experimentales.

Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.5.1. Desarrollo de las pruebas preliminares para la elección de las variables.

2.5.1.1. Triturado.

En el proceso de rallado o triturado, se liberan los gránulos de almidón. Sin embargo, un rallado o triturado demasiado fino puede causar daño físico a los gránulos, lo que resulta en una sedimentación más lenta debido a la pérdida de densidad o en una mayor susceptibilidad a diluirse en el agua. Además, un triturado excesivo puede generar una mayor cantidad de manchas (fibra triturada presente). Por otro lado, si el rallado no es eficiente, los gránulos de almidón no se separan completamente, lo que afecta negativamente el rendimiento del proceso.

En esta investigación, las variables que permitieron determinar una liberación óptima de los gránulos de almidón durante el triturado fueron el tiempo y la velocidad. Para justificar la elección de estas variables, se realizaron pruebas experimentales en las cuales se varió únicamente el tiempo de triturado en una serie de experimentos y la velocidad de triturado en otra serie. En ambos casos, se mantuvieron constantes todas las demás variables del proceso.

Una variable adicional que podría considerarse en etapas previas al triturado es el tiempo de remojo, el cual permitiría ablandar la rígida raíz tuberosa de la yuca. Sin embargo, esta variable no fue incluida en el estudio debido a la alta acción mecánica del triturado, que compensa la necesidad de remojo, y al tiempo adicional que requeriría este análisis, sin mencionar el riesgo de fermentación de la muestra.

2.5.1.1.1. Tiempo de triturado.

En esta serie de experimentos para un mejor análisis se varió el tiempo de triturado manteniendo constantes las variables:

$T_a=15^\circ\text{C}$ $\text{Vol}_a=1:2$ $V_{\text{tri}}=11000 \text{ rpm}$ $V_{\text{cen}}= 3000 \text{ rpm}$ $t_{\text{cent}}=15 \text{ min}$ $\text{pH}= 7,54$

Tabla II-6 Matriz de variación del rendimiento en función del tiempo de triturado

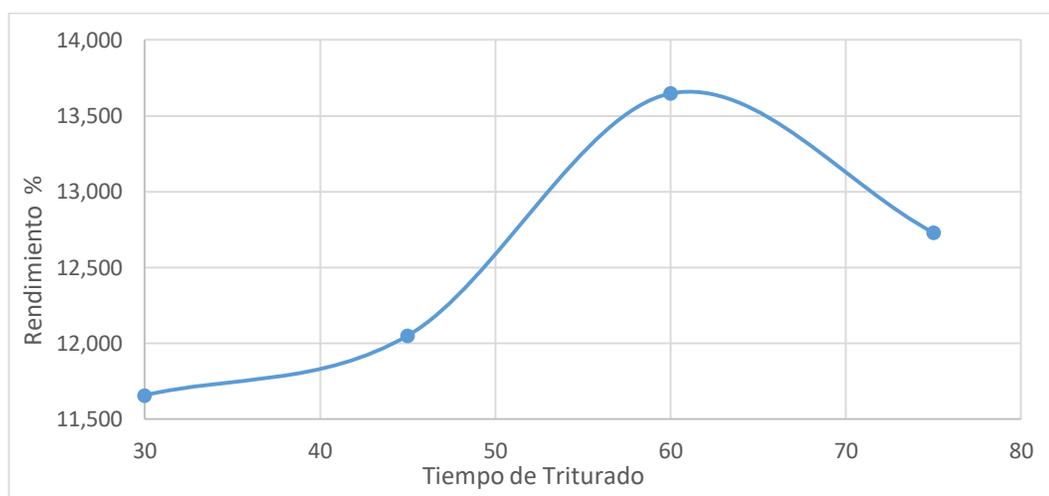
	$t_{\text{lic}} = [\text{min}]$	Rendimiento				
N°	Tiempo de triturado	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4	Promedio

1	0:30	1R	10,606	2R	10,931	3R	13,800	4R	11,295	11,658
2	0:45	1Q	10,549	2Q	11,802	3Q	14,539	4Q	11,313	12,051
3	1:00	1o	12,754	2o	13,833	3o	14,026	4o	13,977	13,648
4	1:15	1n	10,521	2n	12,446	3n	14,272	4n	13,683	12,730

Fuente: Elaboración Propia, 2024

El desarrollo de estas pruebas experimentales permitió comprobar que, en teoría, una sobre-trituración produce una pérdida de densidad en el almidón al sedimentar. Además, al ser altamente soluble, los gránulos de almidón pueden perderse durante la etapa de lavado, lo que resulta en un rendimiento más bajo. Para una mejor visualización, en la siguiente figura se representa el comportamiento del rendimiento en función del tiempo de triturado.

Fig. II-22 Variación del rendimiento en función del tiempo de Triturado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Para los niveles de esta variable se tomarán los tiempos de 1:00 y 1:15 min, ya que son los niveles que mayor rendimiento reflejaron en las pruebas experimentales, en esta serie de experimentos se decidió realizar cuatro repeticiones debido a que en una primera serie los resultados llegaron a ser inconsistentes debido a que estos planteaban un aumento del rendimiento desproporcionado entre distintos tiempos de triturado.

2.5.1.1.2. Velocidad de triturado.

En esta serie de experimentos para un mejor análisis se varió la velocidad de triturado manteniendo constantes las variables:

$$T_a = 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Vol}_a = 1:2 \quad t_{\text{tri}} = 45 \text{ s} \quad V_{\text{cen}} = 3000 \text{ rpm} \quad t_{\text{cent}} = 15 \text{ min} \quad \text{pH} = 7,54$$

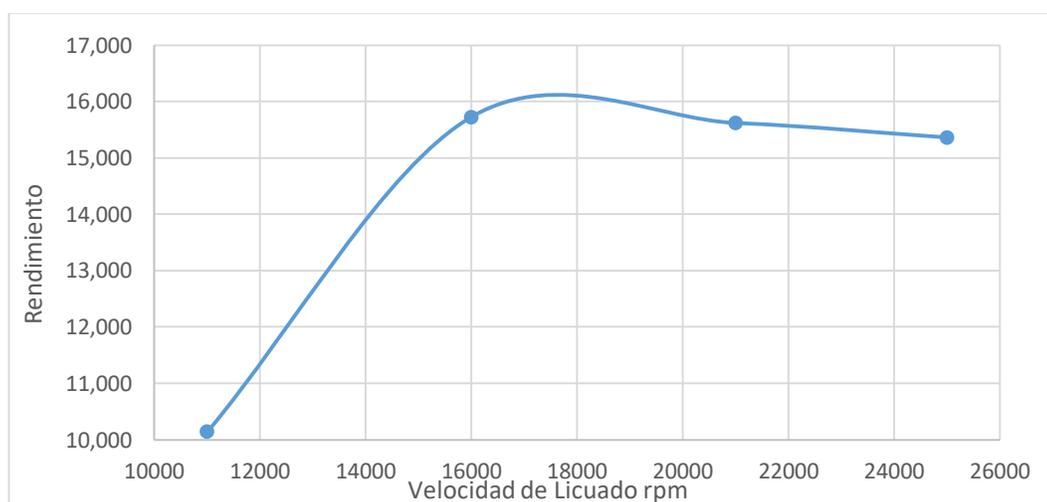
Tabla II-7 Matriz variación del rendimiento en función de la velocidad de Triturado

N°	V _{lic} = [rpm]	Rendimiento						
		Rep 1		Fibra (mancha)	Rep 2		Fibra (mancha)	Promedio
1	Baja 11000,000	1A	9,758	No hay	2A	10,519	No hay	10,138
2	Media Baja 16000,000	1B	15,782	No hay	2B	15,666	No hay	15,724
3	Media Alta 21000,000	1C	15,135	Poca	3C	13,626	Poca	15,618
4	Alta 25000,000	1D	14,628	Capa fina	3D	14,114	Capa fina	15,361

Fuente: Elaboración Propia, 2024

En las pruebas experimentales podemos ver un aumento brusco del rendimiento y un leve descenso del mismo según la siguiente figura.

Fig. II-23 Variación del rendimiento en función de la Velocidad de Triturado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Podemos llegar a la conclusión de que el segundo nivel de la licuadora es el más óptimo al manejar las demás variables constantes.

2.5.1.2. Sedimentación o centrifugado.

El tiempo necesario para que el almidón precipite en la extracción por vía húmeda puede variar dependiendo del método y el equipo utilizado. En este caso, se empleó la centrifugación. Para justificar esta variable, se realizaron pruebas experimentales en las cuales se varió el tiempo de centrifugado y, por otra parte, la velocidad de centrifugado, manteniendo constantes todas las demás variables. Esto permitió evidenciar la gran influencia de estas variables en el proceso de extracción.

2.5.1.2.1. Tiempo de centrifugado.

En esta serie de experimentos se mantuvieron constantes:

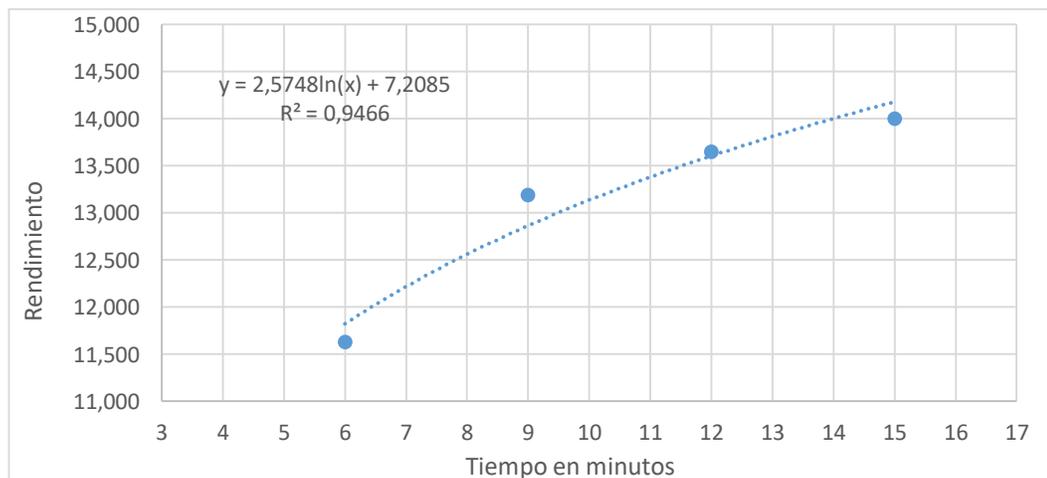
$$T_a = 15^\circ\text{C} \quad \text{Vol}_a = 1:2 \quad V_{\text{tri}} = 11000 \text{ rpm} \quad t_{\text{tri}} = 45 \text{ s} \quad V_{\text{cen}} = 3000 \text{ rpm} \quad \text{pH} = 7,54$$

Tabla II-8 Matriz de variación del rendimiento en función del tiempo de Centrifugado

N°	T _{cent} = [min]	Rendimiento				
		Rep 1		Rep 2		Promedio
1	6	1e	11,495	2e	11,765	11,630
2	9	1f	13,664	2f	12,715	13,190
3	12	1g	13,863	2g	13,443	13,653
4	15	1h	13,253	2h	14,753	14,003

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Fig. II-24 Variación del rendimiento en función del tiempo de Centrifugado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Para esta variable, se observó que, a mayor tiempo de centrifugado mayor es el rendimiento. Sin embargo, tomando en cuenta que la extracción de almidón tiene un límite finito, se utilizó una regresión logarítmica con un nivel de confianza del 94.660 % para analizar los tiempos más óptimos que deben emplearse en los niveles de esta variable.

Tabla II-9 Regresión logarítmica análisis de variable finita

Tiempo (min)	Rendimiento (%)
6	11,630
9	13,190
12	13,653
15	14,003
16	14,347
17	14,503
18	14,651
19	14,790
20	14,922
21	15,048
22	15,167
23	15,282
24	15,391
25	15,496
26	15,597
27	15,695
28	15,788
29	15,879
30	15,966

Fuente: Elaboración Propia, 2024

A través de la regresión logarítmica, se observó que el rendimiento aumenta en una unidad entre 20 y 30 min, y de manera similar, aumenta en una unidad entre 15 y 20 min. Dado que la cantidad de extracción de almidón es finita, se optó por utilizar un tiempo de centrifugación de 20 min para el desarrollo experimental, ya que este es el tiempo máximo permitido por el temporizador de la centrífuga.

2.5.1.2.2. Velocidad de centrifugado.

En esta serie de experimentos se mantuvieron constantes:

$T_a = 15^\circ\text{C}$ $\text{Vol}_a = 1:2$ $V_{\text{tri}} = 11000 \text{ rpm}$ $t_{\text{tri}} = 45 \text{ s}$ $t_{\text{cen}} = 15 \text{ min}$ $\text{pH} = 7,54$

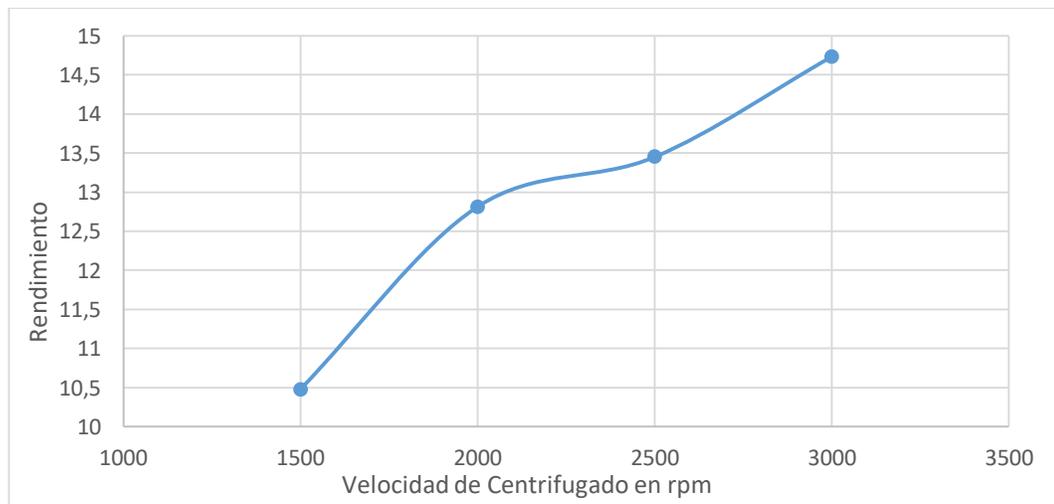
Tabla II-10 Matriz de variación del rendimiento en función de la velocidad de centrifugado

N°	Velocidad de Centrifugado (rpm)	Rendimiento				
		Rep 1		Rep 2		Promedio
1	1500	1E	10,208	2E	10,740	10,474
2	2000	1F	12,676	2F	12,946	12,811
3	2500	1G	13,080	2G	13,818	13,449
4	3000	1H	14,792	2H	14,676	14,734

Fuente: Elaboración Propia, 2024

El desarrollo de estas pruebas experimentales permitió obtener los resultados que se presentan en la siguiente figura. En ella, se puede observar un aumento significativo del rendimiento en función del incremento de la velocidad de centrifugado.

Fig. II-25 Variación del rendimiento en función la velocidad de centrifugado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Tomando en cuenta los resultados de las distintas velocidades de centrifugado, se observó que los rendimientos más óptimos corresponden a los experimentos de las

series G y H. Lógicamente, una mayor velocidad de centrifugación permitiría mejorar el rendimiento.

Sin embargo, se utilizó la velocidad máxima permitida por la centrifugadora, que fue de 3000 rpm ya que un aumento por encima de este valor podría causar un daño significativo al equipo.

2.5.1.3. Temperatura inicial del agua en la fase de trituración.

Para esta prueba preliminar, se consideraron temperaturas iniciales del agua de 25 °C y 45°C, valores próximos a los recomendados por López (2018). Además, se verificó en la Tabla I-5 que la temperatura de gelatinización del almidón es de 65,20 °C. Para evaluar esta variable, se utilizaron distintas temperaturas en el rango de $15 \pm 1^\circ\text{C}$ a $55 \pm 1^\circ\text{C}$, manteniendo constantes todas las demás variables del proceso.

$V_{\text{cent}}=3000 \text{ rpm}$ $\text{Vol}_a=1:2$ $V_{\text{tri}}=11000 \text{ rpm}$ $t_{\text{tri}}= 45 \text{ s}$ $t_{\text{cent}}= 15 \text{ min}$ $\text{pH}= 7,54$

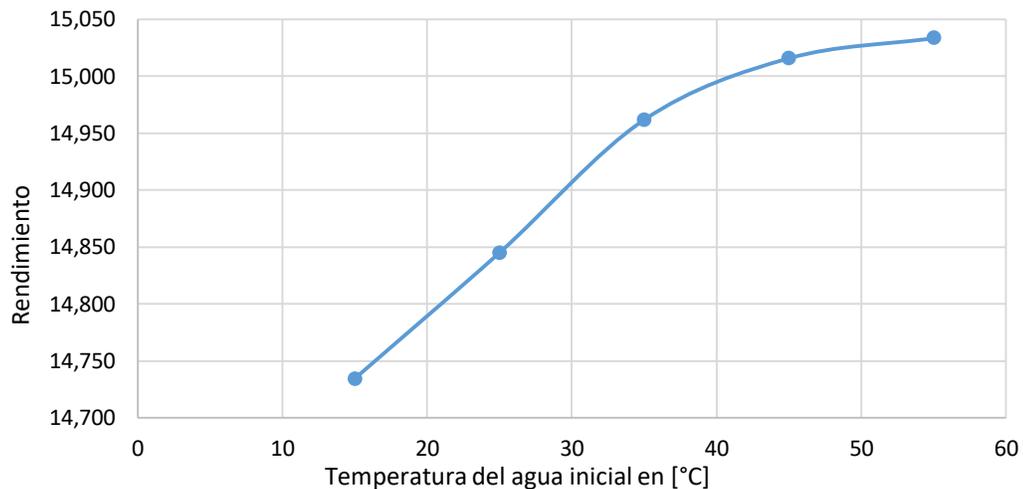
Tabla II-11 Matriz de variación del rendimiento en función de la temperatura inicial del agua

N°	Temperatura inicial del agua (°C)	Rendimiento				
		Rep 1		Rep 2		Promedio
1	15 ± 1	1i	14,792	2i	14,676	14,734
2	25 ± 1	1j	16,293	2j	13,397	14,845
3	35 ± 1	1k	15,796	2k	14,127	14,962
4	45 ± 1	1l	14,964	2l	15,068	15,016
5	55 ± 1	1m	15,401	2m	14,666	15,034

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Por temperatura inicial del agua, se hace referencia al agua que se utilizará en la etapa de triturado, ya que esta entrará en contacto directo con la yuca durante el proceso. Se analizó la variación del rendimiento en función de esta variable, cuyos resultados se presentan en la siguiente figura.

Fig. II-26 Variación del rendimiento en función de la temperatura inicial del agua



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Se observa un leve aumento del rendimiento en función de la temperatura del agua, el cual varía al utilizar agua a mayor temperatura. Para los niveles de esta variable, se propone emplear temperaturas de 45 °C y 55 °C como límite máximo, con el fin de evitar la gelatinización del almidón o afectar su calidad. Asimismo, al considerar que la variación de 15 °C a 55 °C representa solo un 0,3 % del rendimiento, se podría optar por mantener esta variable constante, lo que permitiría ahorrar energía durante el proceso.

2.5.1.4. Volumen del agua en el triturado y lavado de almidón.

Para el análisis de esta variable, se consideraron relaciones desde 1:2 (relación utilizada en la mayoría de las pruebas experimentales) hasta 1:10, con el objetivo de obtener un análisis confiable y preciso. Se empleó la misma proporción de agua tanto en el licuado como en el lavado de la fibra, lo que permitió un mayor contacto del agua con las fibras trituradas que aún contenían almidón. Esto incrementó el rendimiento y optimizó el proceso. Durante el análisis, se mantuvieron constantes todas las demás variables del proceso.

$$V_{\text{cent}}=3000 \text{ rpm} \quad T_a= 15^\circ\text{C} \quad V_{\text{tri}}=11000 \text{ rpm} \quad t_{\text{tri}}= 45\text{s} \quad t_{\text{cent}}= 15 \text{ min} \quad \text{pH}= 7,54$$

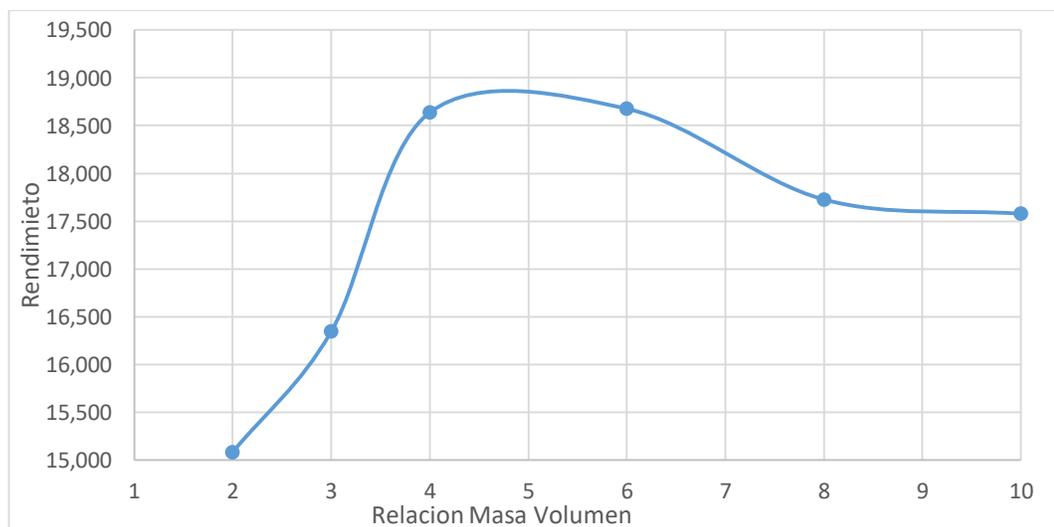
Tabla II-12 Matriz de variación del rendimiento en función al volumen del agua en el triturado y lavado de almidón

N°	Relación de Volumen de agua	Rendimiento				
		Rep 1		Rep 2		Promedio
1	1:2	q1	14,830	q2	15,332	15,081
2	1:3	r1	17,405	r2	15,285	16,345
3	1:4	s1	19,286	s2	17,988	18,637
4	1:6	t1	19,636	t2	17,715	18,675
5	1:8	u1	17,255	u2	18,196	17,725
6	1:10	v1	16,540	v2	18,613	17,576

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Se comprobó que el uso excesivo de agua no garantiza una mayor extracción de almidón, tal como lo menciona Mogollón (2018). Según la Figura II-7, se observan las relaciones que presentan un mayor rendimiento.

Fig. II-27 Variación del rendimiento en función al volumen del agua en el triturado y lavado de almidón



Fuente: Elaboración Propia, 2024

En la gráfica, se observa que las relaciones 1:4 y 1:6 son las que presentan un mayor rendimiento, lo cual confirma la teoría descrita por Mogollón (2018, p. 5), con una leve variación. Esta variación podría deberse a la variedad de la yuca utilizada y a las demás variables involucradas en el proceso de extracción.

Para la selección de los niveles de esta variable, se propone utilizar un valor intermedio entre las relaciones con mayor rendimiento comprobado. Por lo tanto, se establecieron como niveles las relaciones 1:5 y 1:6.

2.5.1.5. pH del agua en el triturado y lavado de almidón.

Los datos proporcionados por Rong (2009) y Adetunji (2016) indicaron que la mejor extracción podría lograrse con un pH ligeramente ácido, tendiendo a ser neutro. Sin embargo, es importante considerar que este valor puede variar en función de la variedad de yuca utilizada.

Para el ajuste del pH, se utilizó Ácido Ascórbico al 99% (para disminuir el pH) y Carbonato de Potasio al 99% (para elevar el valor por encima de 8), ambos en estado sólido. Las cantidades necesarias de estos compuestos se determinaron mediante las Ecuaciones II-1, II-2, II-3, II-4 y II-5, ajustando la cantidad en gramos necesario de acuerdo al pH necesario. Se incrementó la cantidad en gramos en proporción al pH deseado en la solución de agua con yuca triturada.

$$V_{\text{cent}}=3000 \text{ rpm} \quad T_a=15^\circ\text{C} \quad V_{\text{tri}}=11000 \text{ rpm} \quad t_{\text{tri}}=45\text{s}$$

$$t_{\text{cent}}=15\text{min} \quad \text{Vol}_a=1:4$$

Tabla II-14 Matriz de variación del rendimiento en función del pH del agua en el triturado y lavado de almidón

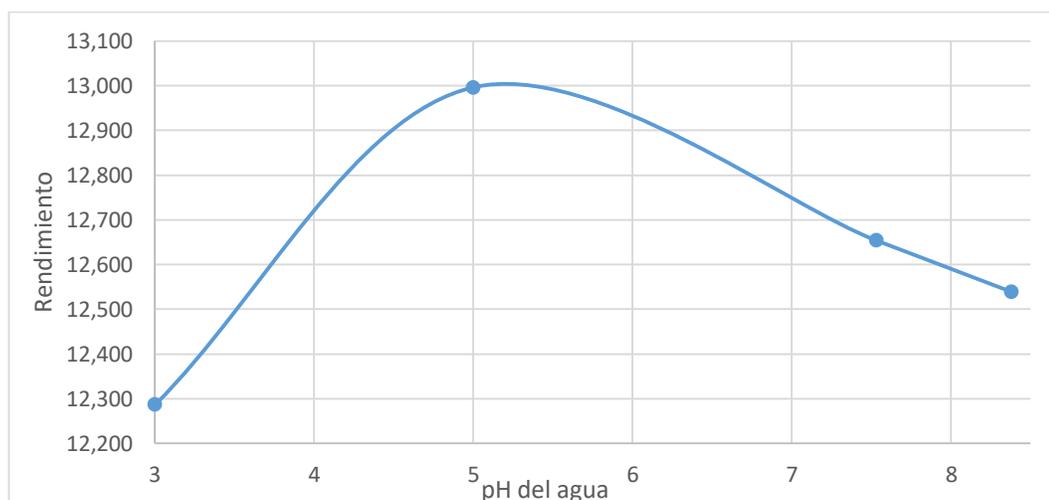
N°	pH de la solución	Masa de Ácido o Base [g]	Rendimiento						
			Rep 1		Fibra (mancha)	Rep 2		Fibra (mancha)	Promedio
1	3,050	0,353	w1	13,021	Notable	w2	11,798	Notable	12,287
2	5,020	0,050	x1	13,189	Poca	x2	12,804	Poca	12,997
3	7,530	0,000	y1	12,919	Moderada	y2	12,389	Moderada	12,654
4	8,380	0,400	z1	13,141	No hay	z2	11,937	No hay	12,539

Fuente: Elaboración Propia, 2024

La variación del pH mostró que se obtiene un mayor rendimiento con un pH aproximado de 5, lo cual confirma la teoría descrita por Rong (2009) en relación al pH. Durante dicha prueba, se observó la formación de una capa de mancha, la cual se atribuye a la fragmentación de las paredes celulares de la yuca, lo que permite una mejor liberación de los gránulos de almidón, tal como menciona Adetunji (2016).

Para el análisis, se consideraron valores de pH desde 3 hasta 8,38 con el objetivo de evaluar de manera efectiva el comportamiento del rendimiento en función del nivel de pH.

Fig. II-28 Variación del rendimiento en función del pH del agua.



Fuente: Elaboración Propia, 2024

En la representación gráfica, se observa que los mejores rendimientos se sitúan entre los valores de pH de 5,02 y 6. Para la selección de los niveles de la variable, se proponen estos dos puntos, ya que presentan los mayores rendimientos. Por lo tanto, se establecieron como niveles un pH aproximado de 5 y 6, respectivamente.

2.5.1.6. Molienda del almidón.

La molienda representa una variable importante para la funcionalidad del almidón. Aunque no afecta directamente al rendimiento de la extracción, un desarrollo deficiente en esta etapa puede resultar en pérdidas durante la molienda y el tamizado, lo que, finalmente afectaría el rendimiento global del proceso.

Para el desarrollo de esta etapa, se optó por utilizar una licuadora, de acuerdo con Mina (2019). Con el fin de analizar el comportamiento de la molienda, se emplearon experimentos previos que presentan porcentajes de humedad lo más cercanos posibles a los valores medidos previamente. Los cuales podrían verificarse en los apuntes de las pruebas preliminares en el ANEXO 1.

2.5.1.6.1. Velocidad de molienda del almidón.

Para determinar la velocidad de molienda se introdujo las muestras al triturador de la licuadora Morley MO-N599 y se trituró a distintos niveles de velocidad en un tiempo 15 segundos cada uno, brindando los siguientes resultados:

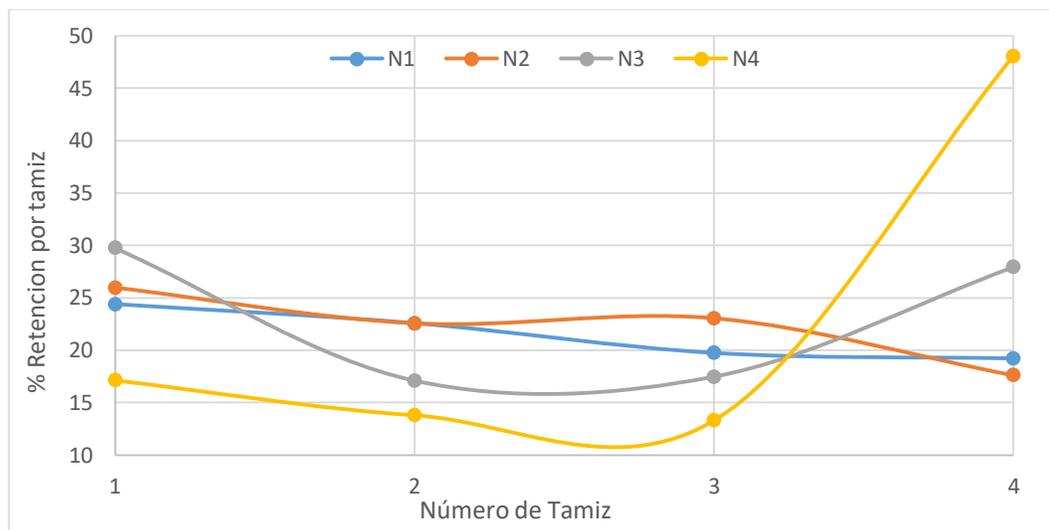
Tabla II-15 Variación de la retención por tamices en función de la velocidad de Molienda

Prueba experimental		N1 - E1	N2 - E2	N3 - 1G	N4 - 2G
V _{mol} [rpm]		Baja 11000,000	Media Baja 16000,000	Media Alta 21000,000	Alta 25000,000
Nº	Tamiz [mm]	Porcentaje de retención por tamiz			
1	0,500	24,381	25,977	29,750	17,115
2	0,250	22,574	22,566	17,081	13,789
3	0,063	19,746	23,047	17,456	13,294
4	Base	19,222	17,605	27,937	48,064

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Como parámetros de una molienda efectiva se decidió que mínimamente el 90% del almidón deberá pasar el tamiz de 0,50 mm, lamentablemente en ninguno de los casos se pudo obtener la mínima retención de 10% en el primer tamiz dado que todos son mayores al 17,115%.

Fig. II-29 Porcentaje de retención por tamiz a diferentes velocidades de molienda



Fuente: Elaboración Propia, 2024

De la Figura II-9, se observa que la velocidad del nivel 4, de aproximadamente 25000 rpm presentó la menor retención de almidón molido en los tamices 1 (0,50 mm), 2 (0,25 mm) y 3 ($6,30 \times 10^{-2}$ mm). Por otro lado, el tamiz 4 (Base) registró la mayor retención. Con estos resultados, se concluye que el 48% del almidón molido en estas condiciones tiene un tamaño menor a $6,30 \times 10^{-2}$ mm o 63 μ m, lo cual es adecuado para su uso en alimentos, según Ma'aruf (2020).

2.5.1.6.2. Tiempo de molienda del almidón.

Anteriormente se desarrolló las pruebas de molienda a distintos niveles de velocidad lo cual permitió determinar como el mejor nivel, el número 4, del cual se desarrolló nuevas pruebas descritas en la siguiente tabla, pero esta vez a distintos tiempos buscando cumplir con el parámetro establecido y el recomendado por (Ma'aruf, 2020).

Tabla II-16 Variación de la retención por tamices en función del Tiempo de Molienda

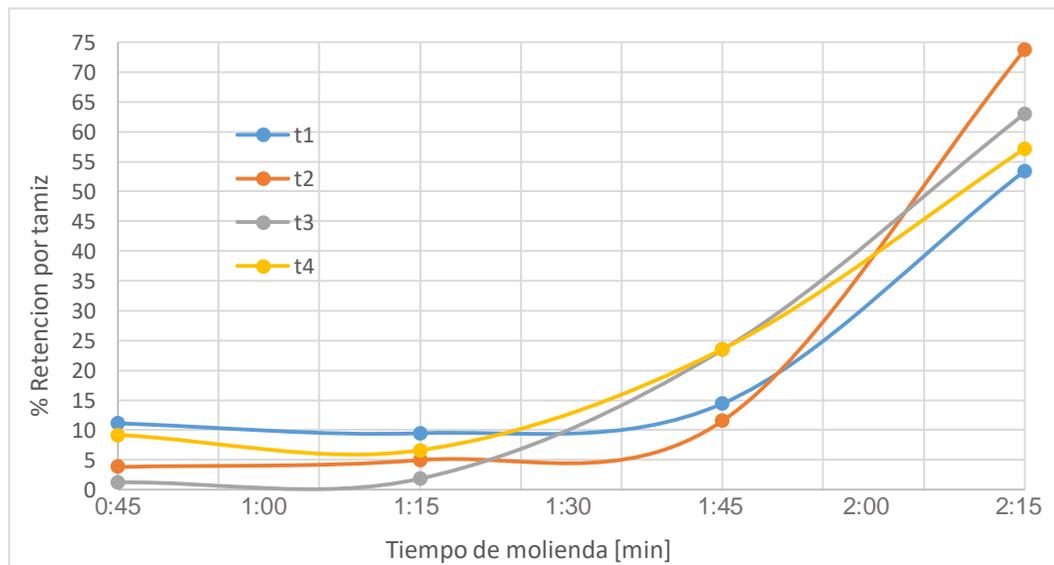
Prueba experimental		N4 – 2n	N4 – 3n	N4 – 4n	N4 – 1o	Almidón Comercial
Tiempo de Molienda [min]		0:45	1:15	1:45	2:15	
V_{mol} [rpm]		Alta 25000				
Nº	Tamiz [mm]	Porcentaje de retención por tamiz				
1	0,500	11,091	3,833	1,241	9,136	0,500

2	0,250	9,445	4,984	1,872	6,584	1,500
3	0,063	14,408	11,547	23,442	23,505	86,000
4	Base	53,393	73,694	62,969	57,106	11,000

Fuente: Elaboración Propia, 2024

También se tamizo 100 gramos de almidón comercial de la marca brasilera Dioka donde podemos denotar que el 86% de su almidón pasa la malla de 0,25mm y no así la de $6,30 \times 10^{-2}$ mm. Con los datos obtenidos se analizó la siguiente figura.

Fig. II-30 Porcentaje de retención por tamiz a diferentes tiempos de molienda



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Se observa que, a partir de un tiempo de molienda de 1:15 min, la retención en el tamiz de 0,50 mm es menor al 10%. La menor retención se obtuvo con un tiempo de 1:45 min, registrando un 1,241%. Por otro lado, el tiempo de 1:15 min presentó una mayor cantidad de almidón molido con un tamaño inferior a $6,30 \times 10^{-2}$ mm o 63 μ m, en comparación con los demás tiempos evaluados.

Finalmente, es importante mencionar que los detalles de las pruebas preliminares experimentales se encuentran en el ANEXO 1 (Detalle de pruebas preliminares experimentales y Justificación de Variables del proceso). En este anexo, se pueden consultar y verificar datos como: nombre de la serie de experimentos, masa de yuca,

masa de yuca pelada, relación de volumen de agua utilizada, peso del platillo empleado para el secado, masa inicial húmeda del almidón, inicio, tiempo y finalización del secado, peso de la masa seca de almidón, porcentaje de humedad, rendimiento y promedio del rendimiento según las réplicas realizadas.

2.6. DISEÑO EXPERIMENTAL.

2.6.1. Diseño experimental utilizado.

El diseño experimental es una herramienta estadística que busca determinar la cantidad de pruebas necesarias en una investigación al manipular dos o más variables independientes del objeto de estudio, con el fin de observar los cambios que ocurren en la variable de respuesta.

El modelo estadístico para un diseño experimental 2^k es:

Ecuación II-6 Variable de respuesta

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \varepsilon$$

Donde:

Y: variable de respuesta.

x_1, x_2, \dots, x_k : variables independientes o regresoras.

β_j : parámetros del modelo que se conocen como coeficientes de regresión.

ε : error aleatorio.

El diseño factorial más sencillo es el 2^k , k corresponde al número de factores que intervienen en el proceso, con dos niveles cada uno y requieren de 2^k experimentos. Los experimentos a realizarse incluyen todas las combinaciones de cada nivel de un factor con todos los niveles de los otros factores.

k = número de factores; número de columnas

(+) = nivel o valor alto.

(-) = nivel o valor bajo.

2 k = número de experimentos; número de filas.

2.6.2. Matriz de experimentos para el diseño factorial completo 2³.

Se trabaja 8 diferentes combinaciones con las 3 variables a 2 niveles. Lo que permite evaluar las variables y sus interacciones al mismo tiempo.

$$\text{N}^{\circ} \text{ de Variables} = 3; \text{ niveles} = 2; \text{ N}^{\circ} \text{ de experimentos} = 2^3 = 8$$

Como se realizan dos repeticiones, el número total de experimentos determinado es:

$$\text{N}^{\circ} \text{ de experimentos} = 8 * 2 = 16 \text{ experimentos}$$

Variable dependiente: Rendimiento (%η)

Variables Independientes: Volumen de agua, pH del volumen de agua y Tiempo de Triturado

Tabla II-17 Diseño factorial para el proceso experimental

Experimentos	Volumen de agua (mL)		pH del volumen de agua		Tiempo de Triturado (min)		Rendimiento%		Promedio
							Rep 1	Rep 2	
1	-	1:5	-	5	-	1:00	1-a	1-b	Y1
2	-	1:5	-	5	+	1:15	2-a	2-b	Y2
3	+	1:6	-	5	-	1:00	3-a	3-b	Y3
4	+	1:6	-	5	+	1:15	4-a	4-b	Y4
5	-	1:5	+	6	-	1:00	5-a	5-b	Y5
6	-	1:5	+	6	+	1:15	6-a	6-b	Y6
7	+	1:6	+	6	-	1:00	7-a	7-b	Y7
8	+	1:6	+	6	+	1:15	8-a	8-b	Y8

Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.7. RECOLECCIÓN DE DATOS.

La recopilación de datos es una etapa clave en el desarrollo de la investigación, ya que permite obtener la información necesaria para analizar el efecto de las variables seleccionadas sobre el rendimiento y la calidad del almidón extraído. En esta sección, se detalla el procedimiento para recopilar datos de los experimentos del diseño factorial, incluyendo las repeticiones correspondientes de cada etapa del proceso. Dichas etapas comprenden el lavado y pelado, el ajuste de pH, el triturado, el secado, el molido, el tamizado y el envasado. Los datos recopilados servirán como base para

evaluar el rendimiento y la calidad del almidón obtenido, considerando las variables definidas previamente.

2.7.1. Recopilación de datos lavado y pelado.

En esta etapa, se utilizó la balanza gramera Electronic Kitchen - Scale SF 400 para registrar los pesos de la yuca antes del lavado y después del pelado, determinando así el porcentaje de cáscara removida. Las masas iniciales se variaron a valores próximos a 100 g y 90 g, ya que los experimentos con relaciones masa-volumen de 1:6 llenaban más de los 12 frascos descritos en el apartado de descripción del proceso. Para evitar esta variación en el número total de frascos durante la etapa de centrifugado, se optó por utilizar una masa inicial cercana a 90 g en dichos experimentos.

Tabla II-18 Recopilación de datos de la etapa Lavado y Pelado

Serie	Relación Masa-Volumen	Masa inicial de la yuca [g]	Masa de yuca pelada [g]	Cáscara Pelada [g]	% Cáscara Pelada
1-a	1:5	101,000	85,000	16,000	15,842
1-b	1:5	100,000	83,000	17,000	17,000
2-a	1:5	103,000	90,000	13,000	12,621
2-b	1:5	102,000	88,000	14,000	13,725
3-a	1:6	90,000	80,000	10,000	11,111
3-b	1:6	90,000	78,000	12,000	13,333
4-a	1:6	91,000	80,000	11,000	12,088
4-b	1:6	91,000	78,000	13,000	14,286
5-a	1:5	101,000	87,000	14,000	13,861
5-b	1:5	100,000	86,000	14,000	14,000
6-a	1:5	101,000	89,000	12,000	11,881
6-b	1:5	100,000	89,000	11,000	11,000
7-a	1:6	87,000	77,000	10,000	11,494
7-b	1:6	87,000	77,000	10,000	11,494
8-a	1:6	89,000	77,000	12,000	13,483
8-b	1:6	89,000	77,000	12,000	13,483

Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.7.2. Recopilación de datos ajuste de pH.

Se midieron los volúmenes de agua purificada necesarios para ajustar el pH, basándose en la relación entre la masa de yuca pelada y el volumen de agua correspondiente a

cada experimento. Para ello, se llenó una jarra de plástico de 2000 mL utilizando un vaso precipitado de 200 mL, hasta alcanzar un volumen cercano al requerido. Luego, se ajustó el volumen añadiendo o reduciendo mililitros hasta obtener la cantidad exacta. Este volumen también se usó en la etapa de lavado de fibras, por lo que se duplicó la relación establecida para ajustar el pH en ambas etapas.

Se registraron los siguientes datos: el pH inicial de la solución, la masa de ácido calculada, la masa de ácido realmente utilizada en la solución y el pH final de la solución de agua y yuca triturada. La acidez se midió y controló con un medidor de pH digital de bolsillo (pH-2 Pro). Primero, se pesó un vidrio de reloj en una balanza analítica EU500 y se taró. Luego, se añadió la masa de ácido calculada al agua. Después de medir el pH de la solución con yuca triturada, si este no alcanzaba el valor deseado, se agregaron cantidades adicionales de ácido, entre 0,02 g y 0,22 g, hasta lograr el pH requerido para cada experimento.

Tabla II-19 Recopilación de datos de la etapa Ajuste de pH

Serie	pH inicial del agua	Relación Masa-Volumen	Volumen de agua [mL]	Volumen total de agua [mL]	Masa de ácido calculado [g]	Masa de ácido real [g]	pH final de la solución
1-a	7,540	1:5	425,000	850,000	1,711E-03	0,053	5,050
1-b	7,540	1:5	415,000	830,000	1,671E-03	0,051	5,010
2-a	7,540	1:5	450,000	900,000	1,812E-03	0,0545	5,080
2-b	7,540	1:5	440,000	880,000	1,772E-03	0,053	5,020
3-a	7,540	1:6	480,000	960,000	1,933E-03	0,066	5,060
3-b	7,540	1:6	468,000	936,000	1,884E-03	0,064	5,070
4-a	7,540	1:6	480,000	960,000	1,933E-03	0,065	5,070
4-b	7,540	1:6	468,000	936,000	1,884E-03	0,062	5,010
5-a	7,310	1:5	435,000	870,000	1,568E-04	0,039	6,010
5-b	7,310	1:5	430,000	860,000	1,550E-04	0,039	5,970
6-a	7,310	1:5	445,000	890,000	1,604E-04	0,041	6,040
6-b	7,310	1:5	445,000	890,000	1,604E-04	0,041	6,030
7-a	7,310	1:6	462,000	924,000	1,665E-04	0,031	6,070
7-b	7,310	1:6	462,000	924,000	1,665E-04	0,033	5,990
8-a	7,310	1:6	462,000	924,000	1,665E-04	0,033	6,010
8-b	7,310	1:6	462,000	924,000	1,665E-04	0,034	5,900

Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.7.3. Recopilación de datos secado.

Se prepararon platillos de aluminio, los cuales se pesaron en la balanza analítica EU500. Después del lavado del almidón, este se transfirió de los frascos a los platillos, y se volvió a pesar. Para obtener únicamente el peso del almidón húmedo, se restó el peso del platillo al valor de la masa combinada de almidón húmedo y platillo. Luego, el almidón se colocó en una estufa a una temperatura de 40 °C. El tiempo de secado se controló con un reloj digital hasta alcanzar una humedad aproximada del 10 %. La humedad del almidón se midió con la balanza de infrarrojo Sartorius Moisture Analyzer - MA100. Una vez seco, el almidón se pesó nuevamente, y se restó el peso del platillo para determinar el peso neto del almidón seco.

Se registraron los siguientes datos: la masa del platillo, la masa del almidón húmedo junto con el platillo, la masa inicial sin el platillo, el tiempo de secado, la humedad del almidón, la masa del almidón seco junto con el platillo y la masa neta del almidón seco.

Tabla II-20 Recopilación de datos de la etapa de Secado

Serie	Masa del platillo [g]	Masa de almidón húmedo más el platillo [g]	Masa inicial [g]	Tiempo de secado [h]	% Humedad	Masa de almidón seco más el platillo [g]	Masa de almidón seco [g]
1-a	1,449	25,485	24,036	5:00	10,420	15,368	13,919
1-b	1,464	29,483	28,019	6:15	10,360	15,559	14,095
2-a	1,458	32,657	31,199	6:30	10,600	15,699	14,241
2-b	1,439	34,501	33,062	6:00	10,780	15,698	14,259
3-a	1,457	35,534	34,077	6:00	10,540	22,759	21,302
3-b	1,434	32,982	31,548	6:00	10,550	22,845	21,411
4-a	1,436	34,959	33,523	6:00	10,710	21,513	20,077
4-b	1,432	30,632	29,200	6:45	10,190	21,031	19,599
5-a	1,437	27,480	26,043	5:45	9,530	16,629	15,192
5-b	1,422	25,691	24,269	5:00	10,990	16,352	14,930
6-a	1,456	28,118	26,662	5:45	10,010	15,759	14,303
6-b	1,441	23,073	21,632	4:15	9,720	15,391	13,950
7-a	1,593	24,447	22,854	4:45	10,550	18,985	17,392
7-b	1,466	26,744	25,278	5:30	10,140	19,340	17,874
8-a	1,476	26,334	24,858	5:15	10,430	18,716	17,240
8-b	1,450	27,150	25,700	5:30	10,320	19,252	17,802

Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.7.4. Recopilación de datos rendimiento.

Con los datos de la masa seca de almidón ya tabulados, se calculó el rendimiento de la extracción. Este cálculo se realizó dividiendo la masa de almidón seco entre la masa inicial de yuca y multiplicando el resultado por 100. De esta manera, se obtuvo el rendimiento de extracción. Se decidió realizar este cálculo hasta la etapa de secado, ya que esto permitió determinar con precisión la cantidad de almidón extraído, considerando las variables seleccionadas.

Con la repetición de los experimentos del diseño factorial, se calculó un promedio de los resultados. Cabe destacar que los experimentos de la serie 3 (3-a y 3-b) fueron los que obtuvieron el mejor rendimiento.

Tabla II-21 Recopilación de datos del Rendimiento

Serie	Masa inicial de la yuca [g]	Masa de almidón seco [g]	Rendimiento de Extracción	Promedio del Rendimiento de Extracción
1-a	101,000	13,919	13,781	13,938
1-b	100,000	14,095	14,095	
2-a	103,000	14,241	13,826	13,903
2-b	102,000	14,259	13,979	
3-a	90,000	21,302	23,669	23,730
3-b	90,000	21,411	23,790	
4-a	91,000	20,077	22,063	21,800
4-b	91,000	19,599	21,537	
5-a	101,000	15,192	15,042	14,986
5-b	100,000	14,930	14,930	
6-a	101,000	14,303	14,161	14,056
6-b	100,000	13,950	13,950	
7-a	87,000	17,392	19,991	20,268
7-b	87,000	17,874	20,544	
8-a	89,000	17,240	19,371	19,687
8-b	89,000	17,802	20,003	

Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.7.5. Recopilación de datos molienda.

Primero, se taró el peso del accesorio de molienda de la licuadora en vacío. Luego, se transfirió el almidón seco desde los platillos de aluminio al envase de molienda. La

etapa de molienda se realizó durante 1:15 min, a una velocidad máxima de 25000 rpm. Una vez finalizada la molienda, se pesó la cantidad de almidón que quedó en el envase. Durante este proceso, se observó una ligera pérdida de almidón, la cual se calculó restando la masa de almidón seco inicial menos la masa de almidón después de la molienda. Los datos obtenidos se detallan en la tabla siguiente.

Tabla II-22 Recopilación de datos de la etapa de Molienda

Serie	Masa de almidón seco [g]	Masa después de Moler [g]	Perdida por Molienda [g]
1-a	13,919	13,844	0,075
1-b	14,095	13,912	0,183
2-a	14,241	14,018	0,223
2-b	14,259	14,051	0,208
3-a	21,302	20,005	1,297
3-b	21,411	18,342	3,069
4-a	20,077	19,952	0,125
4-b	19,599	16,836	2,763
5-a	15,192	15,187	0,005
5-b	14,930	14,919	0,011
6-a	14,303	14,265	0,038
6-b	13,950	13,438	0,512
7-a	17,392	14,113	3,279
7-b	17,874	15,456	2,418
8-a	17,240	15,248	1,992
8-b	17,802	15,715	2,087

Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.7.6. Recopilación de datos tamizado.

La masa molida de cada experimento se transfirió con una espátula de goma a la tamizadora, la cual operó durante 10 min a una velocidad de 10000 rpm. Para determinar la masa después del tamizado, se realizó una suma simple de la masa de almidón retenido en cada uno de los tamices y en la base.

El procedimiento para registrar estos valores fue el siguiente: primero, se añadió al envase de molienda la masa de almidón retenido en el primer tamiz. Dado que el peso del envase estaba tarado, solo se registraba el peso del almidón del primer tamiz junto con el envase. Luego, se taró nuevamente la balanza y se añadió el almidón del

siguiente tamiz. Una vez anotado este valor, se repitió el mismo procedimiento para el tercer tamiz y la base de la tamizadora. Para facilitar este proceso, se utilizó un embudo y una espátula de goma.

Finalmente, se calculó la pérdida de almidón durante la etapa de tamizado restando la masa de almidón molido inicial menos la masa total obtenida después del tamizado. Estos datos se detallan en la tabla siguiente.

Tabla II-23 Recopilación de datos de la etapa de Tamizado

Serie	Masa después de Moler [g]	0,50 [mm]	0,25 [mm]	0,063 [mm]	base	Masa después de Tamizar	Perdida por Tamizado
1-a	13,844	0,843	0,624	0,751	10,217	12,435	1,409
1-b	13,912	2,823	0,741	0,940	8,762	13,266	0,646
2-a	14,018	1,896	0,796	0,94	9,168	12,800	1,218
2-b	14,051	0,645	1,193	0,513	11,571	13,922	0,129
3-a	20,005	3,179	1,513	2,271	12,861	19,824	0,181
3-b	18,342	2,331	1,344	4,695	9,901	18,271	0,071
4-a	19,952	4,254	1,387	3,763	8,958	18,362	1,590
4-b	16,836	2,961	1,221	0,573	10,646	15,401	1,435
5-a	15,187	0,533	2,081	1,321	11,191	15,126	0,061
5-b	14,919	1,066	1,275	0,451	11,763	14,555	0,364
6-a	14,265	0,091	0,139	0,371	13,592	14,193	0,072
6-b	13,438	0,343	0,696	0,873	10,992	12,904	0,534
7-a	14,113	0,244	0,483	3,59	9,211	13,528	0,585
7-b	15,456	0,815	0,537	0,50	12,337	14,189	1,267
8-a	15,248	0,02	0,143	0,255	14,163	14,581	0,667
8-b	15,715	0,15	0,235	0,369	14,058	14,812	0,903

Fuente: Elaboración Propia, 2024

2.7.7. Recopilación de datos envasado.

Con los datos obtenidos después del tamizado y el pesaje de los envases de cada experimento, se estimó la masa del almidón tamizado junto con su envase mediante una suma de estos valores. Luego, el almidón se transfirió a sus respectivos envases de plástico utilizando una espátula de goma. En este paso, se registraron los pesos reales del almidón junto con los envases.

La diferencia entre las masas estimadas y las masas reales del almidón tamizado, junto con sus envases, permitió calcular la pérdida de almidón durante el proceso. Finalmente, la masa real del almidón envasado se obtuvo restando el peso del envase a la masa real registrada después del tamizado. Estos datos se detallan en la tabla siguiente.

Tabla II-24 Recopilación de datos de la etapa de Envasado

Serie	Masa después de tamizar [g]	Masa del envase [g]	Masa estimada (masa después de tamizar + masa del envase) [g]	Masa real + envase [g]	Perdida por envasado (masa estimada – masa real) [g]	Masa después de envasar (masa después de tamizar - masa de la pérdida) [g]
1-a	12,435	0,683	13,118	12,877	0,241	12,194
1-b	13,266	0,716	13,982	13,959	0,023	13,243
2-a	12,800	0,711	13,511	13,369	0,142	12,658
2-b	13,922	0,711	14,633	14,418	0,215	13,707
3-a	19,824	0,685	20,509	19,163	1,346	18,478
3-b	18,271	0,684	18,955	18,295	0,660	17,611
4-a	18,362	0,698	19,060	18,928	0,132	18,230
4-b	15,401	0,695	16,096	16,019	0,077	15,324
5-a	15,126	0,718	15,844	15,806	0,038	15,088
5-b	14,555	0,710	15,265	15,237	0,028	14,527
6-a	14,193	0,720	14,913	14,751	0,162	14,031
6-b	12,904	0,711	13,615	13,602	0,013	12,891
7-a	13,528	0,734	14,262	14,213	0,049	13,479
7-b	14,189	0,746	14,935	14,877	0,058	14,131
8-a	14,581	0,711	15,292	15,208	0,084	14,497
8-b	14,812	0,727	15,539	15,493	0,046	14,766

Fuente: Elaboración Propia, 2024

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

El siguiente capítulo tiene como objetivo analizar e interpretar los datos obtenidos durante la investigación, abarcando desde la caracterización de la materia prima hasta la evaluación del almidón extraído y los subproductos generados. A través del análisis estadístico y la comparación con estudios previos, se busca comprender a profundidad los resultados, validar su relevancia y establecer una base sólida para futuros trabajos relacionados con el proceso de extracción y aprovechamiento del almidón de yuca.

3.2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

La caracterización de la yuca utilizada como materia prima en este estudio se llevó a cabo mediante análisis proximales realizados por el laboratorio CEANID en la ciudad de Tarija y el contenido de almidón en el laboratorio SGLAB ubicado en El Alto, La Paz. Estos análisis permitieron determinar parámetros fundamentales para evaluar la calidad de la materia prima y su aptitud para el proceso de extracción de almidón. Los resultados adquiridos se detallan a continuación:

Tabla III-1 Resultados Análisis Proximales de la Materia Prima

Parámetro	Método/Norma	Valor (g/100 g)
Acidez	NB 313017:06	0,140
Ceniza	NB 39034:10	1,010
Fibra	Digestión ácida	0,900
Humedad	NB 313010:05	65,230
Proteína Total	NB/ISO 8968-1:08	2,010
Almidón Total	Gravimétrica	24,140

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Los resultados de la caracterización de la yuca amarilla indican que esta variedad presenta una composición adecuada para la extracción de almidón, destacando su bajo contenido de acidez, ceniza, y fibra, lo cual favorece la obtención de un producto de mayor pureza. Sin embargo, el porcentaje de almidón total, aunque aceptable, sugiere que la eficiencia del proceso deberá ser optimizada para maximizar el rendimiento. Estas características respaldan su elección como materia prima en el presente estudio.

Además, la humedad elevada resalta la necesidad de implementar un adecuado manejo de las raíces previo al procesamiento para evitar deterioro o pérdida de calidad. La información obtenida proporciona una base sólida para interpretar los resultados en las etapas posteriores del proceso de extracción y evaluar la calidad del almidón obtenido.

3.3. RESULTADOS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN.

El rendimiento en la extracción de almidón es un parámetro clave para evaluar la eficiencia del proceso. En esta sección, se analizan los resultados obtenidos, desde la masa inicial de yuca hasta el almidón extraído, considerando las pérdidas en cada etapa y el rendimiento final.

3.3.1. Análisis del rendimiento.

En esta investigación el análisis estadístico se realizó en base al rendimiento obtenido en el proceso de extracción el cual abarca desde la etapa de Recepción y lavado de yuca hasta el secado del almidón, se decidió tomar estos puntos del proceso para el análisis por el hecho de que en el transcurso de los mismos se realiza realmente el proceso de extracción de los gránulos de almidón de la masa de yuca inicial. Por lo cual se determina que los mejores rendimientos observados fueron los de la serie 3 teniendo un rendimiento en promedio de 23,73%.

La determinación global del rendimiento según el apartado 3.5.3. indica que es de 20,053% tomándose en cuenta los valores desde la etapa de recepción y lavado de yuca hasta la etapa de envasado.

Adicionalmente, se realizó un análisis para determinar el porcentaje de almidón presente en la materia prima. Este análisis se llevó a cabo mediante el método de extracción gravimétrica en el laboratorio SGLAB, el cual indicó que la materia prima contiene un 24,74% de almidón. El informe de laboratorio correspondiente se adjunta en el ANEXO IV.

Para calcular el rendimiento neto de extracción de almidón en función de la cantidad real de almidón presente en la materia prima, se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación III-1 Ecuación Rendimiento de la extracción

$$\% \text{ Rendimiento}_{\text{Neto}} = \frac{\% \text{ Rendimiento}}{\% \text{ de almidon real}} * 100\%$$

Fuente: Elaboración Propia, 2024

$$\% \text{ Rendimiento}_{\text{Neto Proceso de extraccion}} = \frac{23,730}{24,740} * 100\%$$

% Rendimiento_{Neto Proceso de extracción} = 95,918 %

$$\% \text{ Rendimiento}_{\text{Neto Proceso Global}} = \frac{20,053}{24,740} * 100\%$$

% Rendimiento_{Neto Proceso Global} = 81,055 %

El análisis del rendimiento del proceso de extracción permitió identificar que la metodología aplicada es eficiente, con un rendimiento global competitivo frente a estudios similares. Las pérdidas observadas desde la molienda hasta el envasado representan oportunidades claras para mejorar el proceso y optimizar la recuperación de almidón.

3.4. RESULTADO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.

El diseño factorial se realiza con el propósito de establecer si los factores de relación de volumen de agua, pH de agua y tiempo de triturado tienen influencia realmente significativa en el rendimiento del proceso de extracción de almidón de yuca. En este sentido se selecciona un diseño 2³, es decir, tres factores en dos niveles, tal como se indica en el apartado 2.6.

El software empleado es el IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 23.0, mismo que permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos obteniendo de esta manera los resultados más significativos, en la Tabla III-2 se presentan los datos obtenidos de la parte experimental.

Tabla III-2 Análisis de Varianza del proceso

Volumen de agua (mL)		pH del volumen de agua		Tiempo de Triturado (min)		% Rendimiento		Promedio
						Rep 1	Rep 2	
-1	1:5	-1	5,000	-1	1	13,781	14,095	13,938

-1	1:5	-1	5,000	1	1:15	13,826	13,979	13,903
1	1:6	-1	5,000	-1	1	23,669	23,790	23,730
1	1:6	-1	5,000	1	1:15	22,063	21,537	21,800
-1	1:5	1	6,000	-1	1	15,042	14,930	14,986
-1	1:5	1	6,000	1	1:15	14,161	13,950	14,056
1	1:6	1	6,000	-1	1	19,991	20,544	20,268
1	1:6	1	6,000	1	1:15	19,371	20,003	19,687

Fuente: (Elaboración Propia en base a Resultados Obtenidos de SPSS, 2024)

El análisis estadístico inicia con el desarrollo de la ANOVA basado en los 16 datos de relación de volumen de agua, pH de la solución y tiempo de triturado, introducidos al sistema, tomando como variable dependiente el rendimiento obtenido para cada ensayo y réplica.

Tabla III-3 Análisis de Varianza del proceso o Prueba de Efectos Inter-Sujetos

Pruebas de efectos inter-sujetos					
Variable dependiente: Rendimiento					
Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	224,448a	6	37,408	75,557	0,000
Intersección	5067,019	1	5067,019	18510,960	0,000
Volumen_de_Agua	204,519	1	204,519	369,547	0,000
pH_de_solución	4,783	1	4,783	27,002	0,001
Tiempo_de triturado	3,021	1	3,021	5,576	0,043
Volumen_de_Agua * pH_de_solución	11,479	1	11,479	50,252	0,000
Volumen_de_Agua * Tiempo_de triturado	0,596	1	0,596	0,912	0,365
pH_de_solución* Tiempo_de triturado	0,052	1	0,052	0,054	0,821
Error	1,847	9	0,205		
Total	5293,314	16			
Total corregido	226,295	15			
a R al cuadrado = ,992 (R al cuadrado ajustada = ,986)					

Fuente: (Elaboración Propia en base a Resultados Obtenidos de SPSS, 2024)

Como señala el programa SPSS, las variables significativas tienen un nivel de confianza de 95% es decir, variable que poseen una significancia menor al 5% (0,050) se consideran significativas. Como se puede ver en la Tabla III-3, las variables

significativas es decir las menores a 0,05 son el Volumen de agua, el pH de agua, el Tiempo de triturado y la interacción Volumen de agua*pH de solución.

De acuerdo con el análisis estadístico los valores de significación $\leq 0,050$ indican que son variables significativas, por lo tanto, tomando en cuenta el criterio anterior se puede observar que las variables de Volumen de agua*Tiempo de triturado y pH de solución*Tiempo de triturado, la significancia es $> 0,050$ razón por la cual no son variables significativas y se considera despreciable en los siguientes análisis, esto debido a la degradación de la pared celular de la yuca y a la acción conjunta de la trituración de los gránulos de almidón lo cual provoca un efecto de menor densidad en el almidón y hace que este sea propenso desecharse con nuestra agua residual de las diferentes etapas.

Se procedió a realizar la regresión lineal a fin de establecer el modelo matemático, los resultados de la regresión se muestran a continuación:

Tabla III-4 Análisis de varianza de regresión lineal

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	223,801	4	55,950	246,753	0,000b
	Residuo	2,494	11	0,227		
	Total	226,295	15			
a Variable dependiente: Rendimiento						
b Predictores: (Constante), Volumen de agua*pH de solución, Tiempo_de_triturado, pH_de_agua, Volumen_de_Agua						

Fuente: (Elaboración Propia en base a Resultados Obtenidos de SPSS, 2024)

El Análisis de Varianza en la anterior tabla muestra un nivel de significación que tiende a cero, demostrando que el modelo matemático escogido es el correcto. No obstante, para precisar el modelo respectivo se hace uso de los coeficientes de la tabla siguiente:

Tabla III-5 Coeficientes del modelo

Coeficientes ^a								
Mod		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		95% intervalo de confianza para B		
		B	Desv. Error	Beta	t	Sig.	Límite inferior	Límite superior
1	(Ctte)	17,796	0,119		149,488	0,000	17,534	18,058
	Volumen de Agua	3,575	0,119	0,951	30,033	0,000	3,313	3,837
	pH de solución	-0,547	0,119	-0,145	-4,593	0,001	-0,809	-0,285
	Tiempo de triturado	-0,435	0,119	-0,116	-3,650	0,004	-0,697	-0,172
	Volumen de agua*pH de agua	-0,847	0,119	-0,225	-7,115	0	-1,109	-0,585
	a Variable dependiente: Rendimiento							

Fuente: (Elaboración Propia en base a Resultados Obtenidos de SPSS, 2024)

De acuerdo con los coeficientes indicados en la anterior tabla, el modelo matemático del diseño experimental corresponde a la siguiente ecuación:

Ecuación III-2 Ecuación del Diseño

$$Y = 17,796 + 3,575 * X_1 - 0,547 * X_2 - 0,435 * X_3 - 0,847 * X_4$$

Fuente: (Elaboración Propia en base a Resultados Obtenidos de SPSS, 2024)

Donde:

Y = %Rendimiento

X₁= Volumen de agua

X₂= pH de solución

X₃= Tiempo de triturado

X₄= Volumen de agua*pH de agua

Finalmente se analiza los factores de correlación y determinación obtenidos:

Tabla III-6 Coeficientes del modelo

Resumen del modelo b

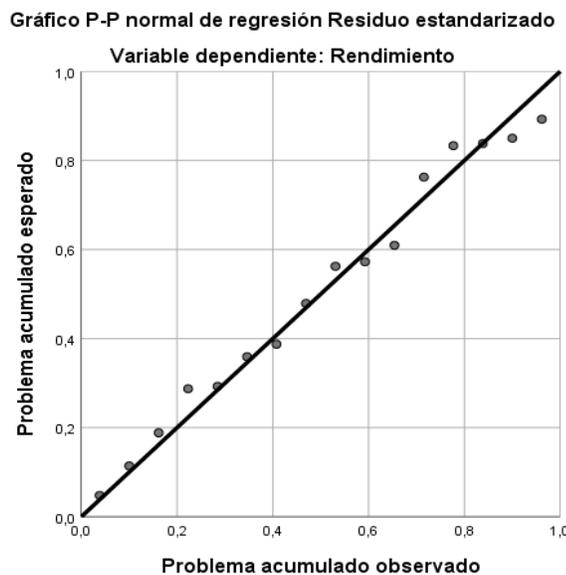
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,994 ^a	0,989	0,985	0,476
a. Predictores: (Constante), VolxpH, Tiempo_de_triturado, pH_de_agua, Volumen_de_Agua				
b. Variable dependiente: Rendimiento				

Fuente: (Elaboración Propia en base a Resultados Obtenidos de SPSS, 2024)

Como se puede examinar el Coeficiente de Pearson señala un alto grado de correlación lineal entre las variables independientes y dependientes. Mientras que el Coeficiente de Determinación indica que la variabilidad del rendimiento queda explicada en un 98,9% por el modelo lineal obtenido en la ecuación (II-7).

En la figura III-1 se observa el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo.

Fig. III-1 Rendimiento observado vs rendimiento esperado



Fuente: (IBM SPSS, 2024)

Conforme al modelo lineal, se obtiene los datos del rendimiento generado por el modelo, por lo cual se presenta el error entre los valores de rendimiento observado y generado por el modelo.

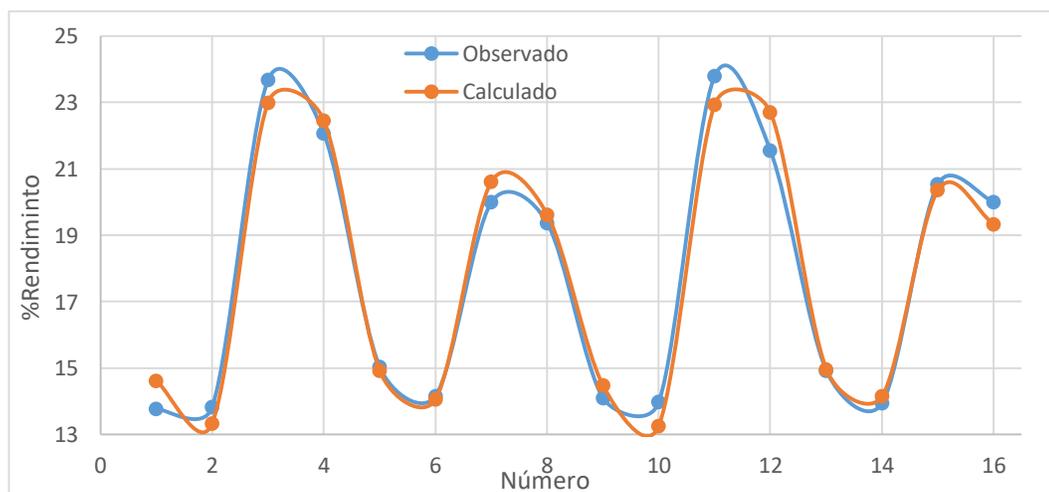
Tabla III-7 Errores entre valores observados y ajustado del modelo

N°	Rendimiento Observado	Rendimiento Calculado	Error
1	13,781	14,616	0,835
2	13,826	13,331	-0,495
3	23,669	22,986	-0,683
4	22,063	22,452	0,389
5	15,042	14,916	-0,126
6	14,161	14,052	-0,109
7	19,991	20,603	0,612
8	19,371	19,621	0,250
9	14,095	14,473	0,378
10	13,979	13,262	-0,718
11	23,790	22,931	-0,859
12	21,537	22,691	1,154
13	14,930	14,967	0,037
14	13,950	14,148	0,198
15	20,544	20,352	-0,193
16	20,003	19,334	-0,669

Fuente: Elaboración Propia, 2024

La Tabla III-7 muestra que los errores varían entre -0,859 y 1,154, indicando que el modelo tiene una precisión variable en la predicción de los rendimientos. Algunos valores calculados se acercan significativamente a los observados, mientras que otros presentan discrepancias más notables.

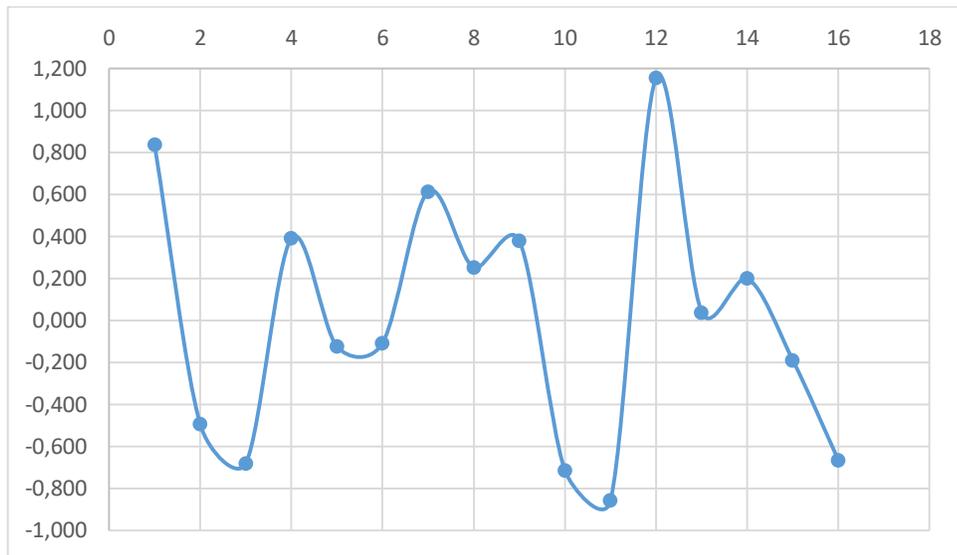
Fig. III-2 Valores observados vs valores ajustados al modelo



Fuente: (IBM SPSS, 2024)

Esta gráfica permite visualizar la tendencia y la dispersión de los datos, facilitando la identificación de patrones o desviaciones significativas. En general, el modelo muestra una capacidad razonable para predecir los rendimientos, aunque se observan ciertas áreas donde las predicciones podrían mejorarse. Estos resultados son fundamentales para evaluar la efectividad del modelo y para identificar posibles ajustes que podrían incrementar su precisión en futuras iteraciones.

Fig. III-3 Error entre el rendimiento observado y el rendimiento generado



Fuente: (IBM SPSS, 2024)

Los errores varían entre aproximadamente -1,000 y 1,200, lo que indica que el modelo tiene una precisión variable en la predicción de los rendimientos. Algunos puntos muestran errores cercanos a cero, lo que sugiere una buena aproximación del modelo, mientras que otros presentan desviaciones más significativas. Esta gráfica permite visualizar de manera clara la distribución de los errores e identificar posibles patrones o tendencias que podrían ser útiles para mejorar el modelo en futuras iteraciones.

3.5. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA.

3.5.1. Balance de materia por etapas.

Se realizó un balance de materia para determinar los flujos de masa y las pérdidas presentes en el proceso de “Extracción de Almidón a Partir de Yuca Amarilla (*Manihot esculenta* Crantz) a Escala Laboratorio”. Se busco determinar cuanta materia prima se

MA1	Masa de Agua 1	9973,688	g
MAR1	Masa de Agua Residual 1	9948,754	g
MYP	Masa de Yuca Pelada	4400,341	g
MA2	Masa de Agua 2	2505,889	g
MAR2	Masa de Agua Residual 2	2505,889	g
MCYP	Masa de Cáscara de Yuca Pelada	4400,341	g
MVA1	Masa de Vapor de Agua 1	44,003	g
MYT	Masa de Yuca Troceada	4356,338	g
MA3	Masa de Agua 3	52804,092	g
MAcC	Masa de Ácido Calculado	0,106	g
MAcA	Masa de Ácido Ascórbico	3,394	g
MAAc	Masa de Agua con Ácido	26403,743	g
MST	Masa Solución Triturada	30760,081	g
MSF	Masa Sólidos y Fibras	1814,845	g
MAD1	Masa de Almidón Diluido 1	28945,236	g
MA4	Masa de Agua 4	26403,743	g
MAD2	Masa de Almidón Diluido 2	26518,078	g
MSFL	Masa Sólidos y Fibras Lavadas	1700,510	g
MAAM	Masa de Almidón con Agua y Mancha	55463,314	g
MAR3	Masa de Agua Residual 3	52540,072	g
MAHM	Masa de Almidón Húmedo con Mancha	2923,242	g
MA5	Masa de Agua 5	33246,031	g
MAAR	Masa de Almidón con Agua Residual	36169,273	g
MAR4	Masa de Agua Residual 4	34351,016	g
MAH	Masa de Almidón Húmedo	1818,257	g
MVA2	Masa de Vapor de Agua 2	634,572	g
MAS	Masa de Almidón Seco	1183,685	g
MPM	Masa de Perdidas por Molienda	120,736	g
MAM	Masa de Almidón Molido	1062,949	g
MPT	Masa de Pérdidas por Triturado	20,196	g
MAT	Masa de Almidón Triturado	1042,753	g
MPE	Masa de Pérdidas por Envasado	42,753	g
MAE	Masa de almidón Envasado	1000,000	g
MAIR	Masa de Aire	67,620	g
fma1	Factor masa de agua 1	2,000	-
Fap	Factor aumento de peso	1,005	-
fma2	Factor masa de agua 2	0,500	-
xmyp	Fracción masa de yuca pelada	0,878	-
xmva1	fracción de masa de vapor de agua 1	0,010	-
frmv	Factor relación masa volumen	6,000	-
fcma	Factor de corrección de masa del ácido	32,016	-
xmsf	Fracción masa de sólidos y fibras	0,059	-

xmsfl	Fracción masa de sólidos y fibras lavada	0,937	-
xmar3	Fracción masa de agua residual 3	0,995	-
fma5	Factor masa de agua 5	11,373	-
xmah	Fracción de masa de almidón húmedo	0,622	-
xmas	Fracción de masa de almidón seco	0,651	-
xmam	Fracción de masa de almidón molido	0,898	-
xmat	Fracción de almidón tamizado	0,981	-
xmae	Fracción de almidón envasado	0,959	-

Fuente: Elaboración Propia, 2024

3.5.1.1. Recepción y lavado.

Para esta etapa del proceso se tomó en cuenta la primera masa de agua la cual debe ser el doble en relación de la masa de yuca recepcionada.

Base de Cálculo y MYR = 4986,844 gramos

$$f_{ma1} = 2,000$$

$$MA1 = MYR * f_{ma1}$$

$$MA1 = 4986,844 * 2,000$$

$$MA1 = 9973,688 \text{ g}$$

Por otra parte, si bien el agua quita la tierra y suciedad presentes en la parte exterior de la yuca, está también permite que la yuca absorba humedad aumentado levemente su peso, esto se lo definió según una media de las distintas pruebas experimentales desarrolladas dando así un aumento del 0,5% del peso en cuanto a la masa inicial.

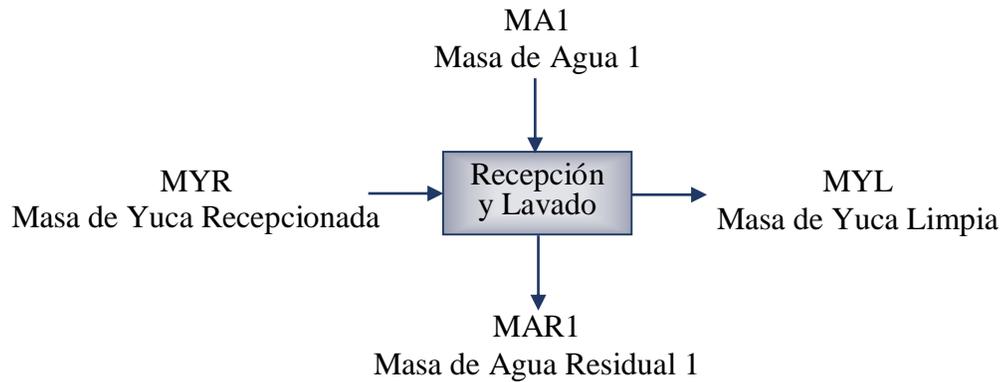
$$f_{ap} = 1,000 + \left(\frac{0,5\%}{100\%} \right)$$

$$f_{ap} = 1,005$$

$$MYL = MYR * f_{ap}$$

$$MYL = 4986,844 * 1,005$$

$$MYL = 5011,778 \text{ g}$$



$$\text{MYR} + \text{MA1} = \text{MYL} + \text{MAR1}$$

$$4986,844 + 9973,688 = 5011,778 + \text{MAR1}$$

$$\text{MAR1} = 4986,844 + 9973,688 - 5011,778$$

$$\text{MAR1} = 9948,754 \text{ g}$$

3.5.1.2. Pelado.

En esta etapa del proceso la Masa de Agua 2, será el 50% de la MYL para garantizar que la yuca pelada este totalmente limpia.

$$f_{\text{ma2}} = \left(\frac{50\%}{100\%} \right)$$

$$f_{\text{ma2}} = 0,500$$

$$\text{MA2} = \text{MYL} * f_{\text{ma2}}$$

$$\text{MA2} = 5011,778 * 0,500$$

$$\text{MA2} = 2505,889 \text{ g}$$

Para determinar la fracción de masa de yuca pelada, se calculó la media del porcentaje de dicha masa en los experimentos 3-a y 3-b, utilizando el peso inicial y el peso final. Los detalles de estos experimentos se encuentran en el ANEXO 2.

La ecuación utilizada para calcular el porcentaje de masa de yuca pelada es la siguiente:

$$\text{Porcentaje de masa de yuca pelada} = \frac{\text{masa de yuca pelada}}{\text{masa de yuca limpia}} * 100\%$$

Tabla III-9 Cálculo del porcentaje de masa de yuca pelada

Masa de Yuca Limpia	Masa de Yuca pelada	Porcentaje de masa de yuca pelada
90,000	80,000	88,889 %

90,000	78,000	86,667 %
	Media	87,778 %

Fuente: Elaboración Propia, 2024

De esta manera, se demostró que la yuca pelada constituye únicamente el 87,778 % de la yuca limpia. La fracción de masa de yuca pelada se calculó dividiendo la media del porcentaje de masa de yuca pelada entre el 100% de la masa de yuca limpia.

$$x_{myp} = \frac{87,778\%}{100\%}$$

$$x_{myp} = 0,878$$

$$MYP = MYL * x_{myp}$$

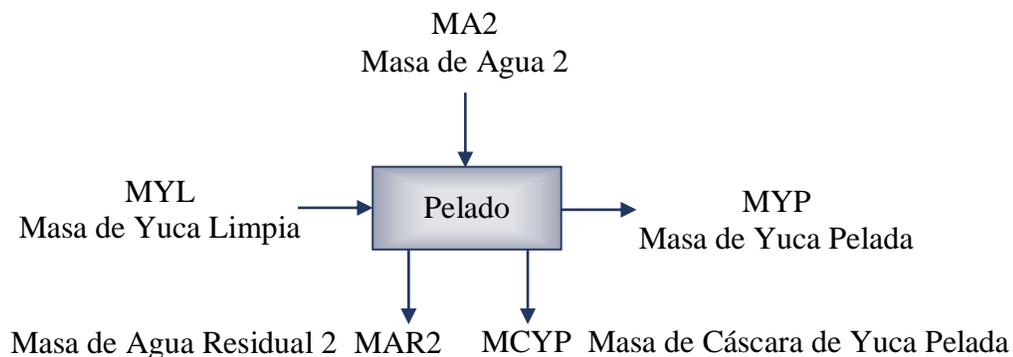
$$MYP = 5011,778 * 0,878$$

$$MYP = 4400,341 \text{ g}$$

$$MCYP = MYL - MYP$$

$$MCYP = 5011,778 - 4400,341$$

$$MCYP = 611,437 \text{ g}$$



$$MYL + MA2 = MYP + MAR2 + MCYP$$

$$5011,778 + 2505,889 = 4400,341 + MAR2 + 611,437$$

$$MAR2 = 5011,778 + 2505,889 - 4400,341 - 611,437$$

$$MAR2 = 2505,889 \text{ g}$$

3.5.1.3. Troceado.

En esta etapa del proceso, se observó una leve pérdida de masa. Esto se debe a que la yuca troceada comienza a secarse, y el agua se dispersa en el ambiente en forma de

vapor. Según un promedio calculado a partir de las distintas pruebas preliminares, esta evaporación representa aproximadamente el 1% de la masa de yuca pelada.

$$\text{Porcentaje de masa de vapor de agua} = \frac{\text{Masa de Yuca Troceada}}{\text{Masa de Yuca Pelada}} * 100\%$$

Tabla III-10 Cálculo del porcentaje de masa de vapor de agua

Masa de Yuca Pelada	Masa de Yuca Troceada	Porcentaje de masa de vapor de agua
80	79,993	1,000%
78	77,945	0,999%
	Media	1,000%

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Para el cálculo de la Masa de Vapor de Agua 1, se definió la fracción de masa de vapor de agua 1 dividiendo el porcentaje de agua evaporada entre el 100 % de la masa de yuca pelada, como se muestra a continuación:

$$x_{mva1} = \frac{1\%}{100\%}$$

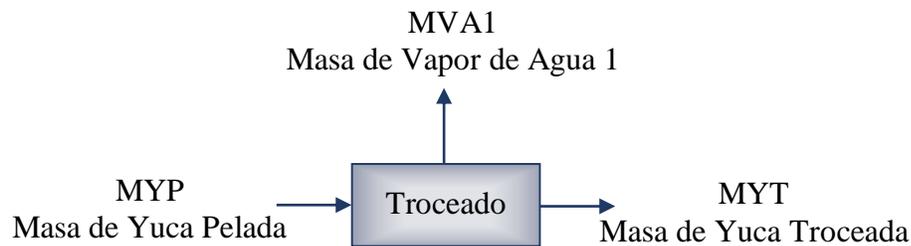
$$x_{mva1} = 0,010$$

$$MYP = 4400,341 \text{ g}$$

$$MVA1 = MYP * x_{mva1}$$

$$MVA1 = 4400,341 * 0,010$$

$$MVA1 = 44,003 \text{ g}$$



$$MYP = MVA1 + MYT$$

$$4400,341 = 44,003 + MYT$$

$$MYT = 4400,341 - 44,003$$

$$\text{MYT} = 4356,338 \text{ g}$$

3.5.1.4. Ajuste de pH.

Para calcular la tercera masa de agua, se utilizó el factor de relación masa-volumen definido en el diseño factorial con una proporción de 1:6. Esto implica que, por cada gramo de yuca pelada, se utilizarán 6 mL (o 6 gramos) de agua, considerando una densidad de 1 g/mL. El valor resultante se multiplicará por dos, ya que la mitad de esta masa, una vez ajustado el pH, será transferida a la masa de agua cuatro.

$$f_{\text{rmv}} = 6,000$$

$$\text{MYP} = 4400,341 \text{ g}$$

$$\text{MA3} = \text{MYP} * f_{\text{rmv}} * 2,000$$

$$\text{MA3} = 4400,341 * 6,000 * 2,000$$

$$\text{MA3} = 52804,092 \text{ g}$$

Asimismo, para obtener un pH aproximado a 5 en la masa de agua 3 se usó las Ecuaciones II-1,2,3,4 y 5 de la siguiente forma:

Datos.

$$\text{Vol}_{\text{MA3}} = \frac{52804,092 \text{ g}}{1,000 \frac{\text{g}}{\text{mL}}}$$

$$\text{Vol}_{\text{MA3}} = 52804,092 \text{ mL} = 52,804 \text{ L}$$

$$\text{pH} = 5,000$$

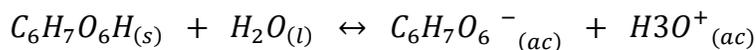
$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}} = x$$

$$\text{PM} [\text{g/mol}] = 176,120$$

$$\text{pKa} = 4,200$$

$$Ka = 7,586 \cdot 10^{-5}$$

Ecuación II-1 Reacción reversible de Ácido Ascórbico



Ecuación II-2 Ecuación de constante de acidez

$$K_a = \frac{[C_6H_7O_6^-][H_3O^+]}{[C_6H_7O_6H]} \quad (2)$$

$$K_a = \frac{x \cdot x}{C - x} = \frac{x^2}{C - x}$$

$$K_a = \frac{x^2}{C - x} \rightarrow C = \frac{x^2}{K_a} + x = \frac{(10^{-pH})^2}{7,586 \cdot 10^{-5}} + 10^{-pH}$$

$$C = 1,132 \cdot 10^{-5} \frac{mol}{L}$$

Ecuación II-3 Ecuación de moles del Ácido

$$n = C \cdot V$$

$$n = 5,977 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$$

Ecuación II-4 Ecuación de masa del Ácido al 100%

$$m = n \cdot PM$$

$$m_{100\%} = 0,105 \text{ g}$$

Ecuación II-5 Ecuación de masa real del Ácido al 99%

$$m_{99\%} = m \cdot (1,000 + 0,010)$$

$$m_{99\%} = 0,106 \text{ g}$$

El valor aproximado de 0,106 g de Ácido Ascórbico, según la descripción del proceso, servía como base para incrementar la cantidad de ácido hasta alcanzar el valor de pH requerido.

Para el balance de materia, se decidió calcular un factor de corrección en función de la cantidad de masa empleada en las pruebas experimentales con un pH cercano a 5, descritas en el ANEXO II (Detalle de Experimentos del Diseño Factorial). Este factor permitió determinar cuántas veces la masa medida era necesaria para obtener la masa real de ácido.

$$\text{Factor de corrección} = \frac{\text{masa de ácido real}}{\text{masa de ácido calculado}}$$

De los factores de corrección se sacará una media y dicha media será la que se utilizará como factor de corrección oficial para el balance en esta etapa.

Tabla III-11 Cálculo del factor de corrección de masa de Ácido Ascórbico.

Serie	Volumen Total de agua [mL]	Masa de ácido Calculado [g]	Masa de ácido Real [g]	Factor de corrección	pH medido
1-a	850,000	1,711E-03	0,053	30,970	5,050
1-b	830,000	1,671E-03	0,051	30,520	5,010
2-a	900,000	1,812E-03	0,054	30,078	5,080
2-b	880,000	1,772E-03	0,053	29,915	5,020
3-a	960,000	1,933E-03	0,066	34,148	5,060
3-b	936,000	1,884E-03	0,064	33,962	5,070
4-a	850,000	1,711E-03	0,065	33,630	5,070
4-b	830,000	1,671E-03	0,062	32,901	5,010
			Media	32,016	

Fuente: Elaboración Propia, 2024

$$f_{\text{cma}} = 32,016$$

$$MAcC = 0,106 \text{ g}$$

$$MAcA = 0,106 * 32,016$$

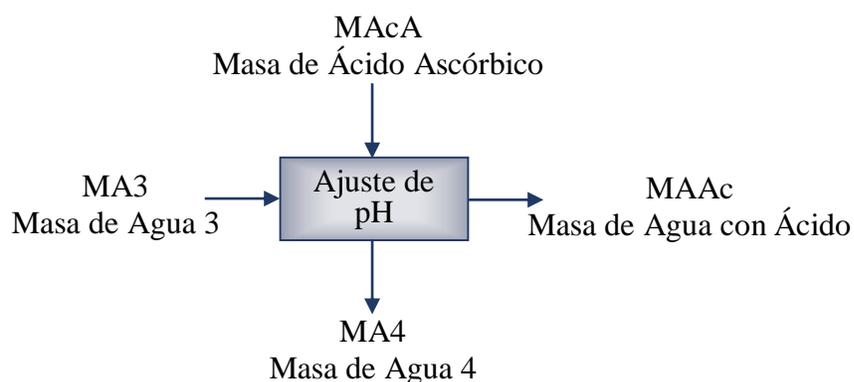
$$MAcA = 3,394 \text{ g}$$

La masa de agua 4 corresponde a la mitad de la solución obtenida después del ajuste de pH, ya que esta masa se empleará en la etapa de lavado de fibras.

$$MA4 = \frac{MA3 + MAcA}{2,000}$$

$$MA4 = \frac{52804,092 + 3,394}{2,000}$$

$$MA4 = 26403,743 \text{ g}$$

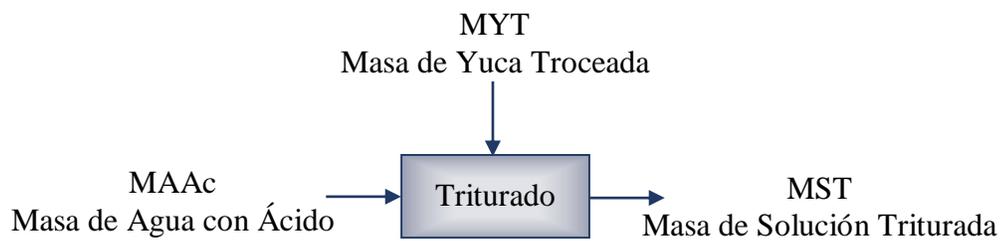


$$\begin{aligned}
 \text{MA3} + \text{MAcA} &= \text{MAAc} + \text{MA4} \\
 52804,092 + 3,394 &= \text{MAAc} + 26403,743 \\
 \text{MAAc} &= 52803,092 + 3,394 - 26403,743 \\
 \text{MAAc} &= 26403,743 \text{ g}
 \end{aligned}$$

3.5.1.5. Triturado.

$$\text{MAAc} = 26403,773 \text{ g}$$

$$\text{MYT} = 4356,338 \text{ g}$$



$$\begin{aligned}
 \text{MAAc} + \text{MYT} &= \text{MST} \\
 26403,743 + 4356,338 &= \text{MST} \\
 \text{MST} &= 30760,081 \text{ g}
 \end{aligned}$$

3.5.1.6. Filtrado.

En el balance de materia de esta etapa, se pesó el embudo que contenía el papel filtro de poro grande y los residuos de sólidos y fibras de los experimentos 3-a y 3-b. A esta masa se le restó el peso del papel filtro, y con los valores obtenidos se calculó una media.

Tabla III-12 Media de la masa de sólidos y fibras para la serie 3-a y 3-b

Peso del embudo con los residuos de sólidos y fibras [g]	Peso del embudo [g]	Masa de sólidos y fibras [g]
146,734	114,14	32,594
147,034	114,14	32,894
	Media	32,744

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Si la base de cálculo cambia de 1000,000 g a 90,000 g, que corresponde a la masa inicial de los experimentos 3-a y 3-b, la Masa de Solución Licuada será de 555,142 g. Con este valor y el de la media, se determinó la Fracción de Masa de Sólidos y Fibras de la siguiente manera:

$$x_{msf} = \frac{32,744 \text{ g}}{555,142 \text{ g}}$$

$$x_{msf} = 0,059$$

Esta fracción se empleó para calcular la masa de sólidos y fibras, indicando que solo el 5,9% de la masa de solución licuada corresponde a sólidos y fibras.

$$MST = 30760,081 \text{ g}$$

$$MSF = MST * x_{msf}$$

$$MSF = 30760,081 * 0,059$$

$$MSF = 1814,845 \text{ g}$$



$$MST = MSF + MAD1$$

$$30760,081 = 1814,845 + MAD1$$

$$MAD1 = 30760,081 - 1814,845$$

$$MAD1 = 28945,236 \text{ g}$$

3.5.1.7. Lavado de fibras.

Al concluir esta etapa, se pesó el embudo que contenían las fibras y el papel filtro, y se determinó la media de sus masas correspondientes. Este cálculo permitió obtener el porcentaje de estos residuos después del lavado.

Tabla III-13 Media de la masa de sólidos y fibras limpia para la serie 3-a y 3-b

Peso del embudo con los residuos de sólidos y fibras limpia [g]	Peso del embudo [g]	Masa de sólidos y fibras limpias [g]
145,536	114,14	31,396
144,122	114,14	29,982
	Media	30,689

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Al cambiar la base de cálculo por el valor inicial de los experimentos 3-a y 3-b, se obtuvo que la masa de sólidos y fibras es de 32,753 g. Con este valor y el de la media, se determinó la fracción de masa de sólidos y fibras lavadas de la siguiente manera:

$$x_{msf} = \frac{30,689 \text{ g}}{32,753 \text{ g}}$$

$$x_{msf} = 0,937$$

Se observó que el peso de los sólidos y fibras disminuyó a un 93,7%, lo que da como resultado el siguiente valor de sólidos y fibras lavadas:

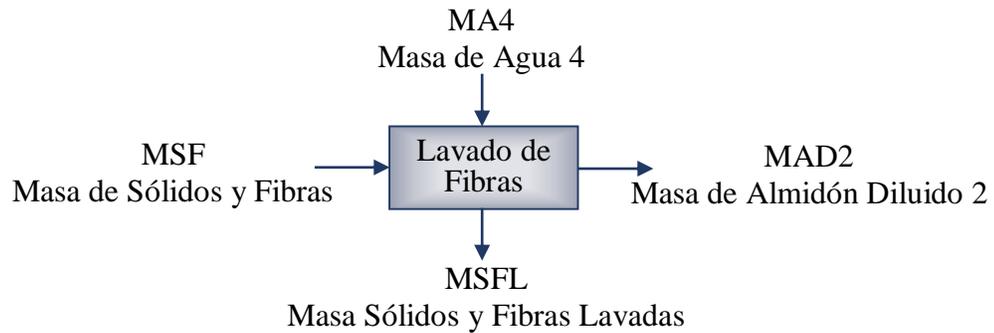
$$MSF = 1814,845 \text{ g}$$

$$MSFL = MSF * x_{msfl}$$

$$MSFL = 1814,845 * 0,937$$

$$MSFL = 1700,510 \text{ g}$$

$$MA4 = 26403,743 \text{ g}$$



$$MSF + MA4 = MSFL + MAD2$$

$$1814,845 + 26403,743 = 1700,510 + MAD2$$

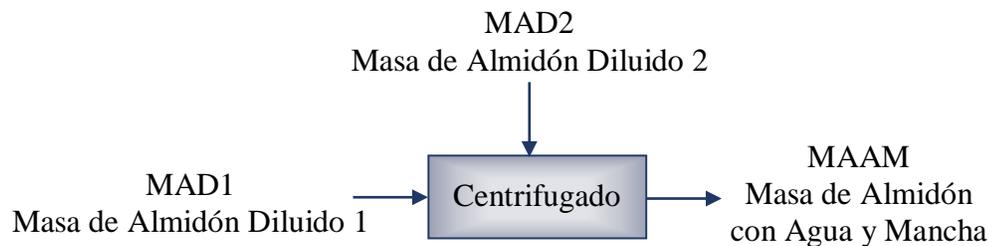
$$MAD2 = 1814,845 + 26403,743 - 1700,510$$

$$MAD2 = 26518,078 \text{ g}$$

3.5.1.8. Centrifugado.

$$MAD1 = 28945,236 \text{ g}$$

$$MAD2 = 26518,078 \text{ g}$$



$$MAD1 + MAD2 = MAAM$$

$$28945,236 + 26518,078 = MAAM$$

$$MAAM = 55463,314 \text{ g}$$

3.5.1.9. Lavado de Almidón.

Primera fase

Para realizar el balance en esta etapa, fue necesario determinar la fracción de masa de agua residual 3. Para ello, se emplearon los datos de la siguiente tabla:

Tabla III-14 Media de la masa de agua residual 3 y de la masa de agua 3 de los experimentos 3-a y 3-b

Experimentos	Masa de agua residual 3 [g]	Masa de agua 3 [g]
3-a	945,000	960,000
3-b	941,000	936,000
Media	943,000	948,000

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Se determinó dicha fracción dividiendo los valores de la media de masas de agua residual 3 entre la media de la masa de agua 3, como se muestra a continuación:

$$x_{\text{mar3}} = \frac{\text{media masa de agua residual 3}}{\text{media masa de agua 3}}$$

$$x_{\text{mar3}} = \frac{943,000 \text{ g}}{948,000 \text{ g}}$$

$$x_{\text{mar3}} = 0,995$$

A partir de esta fracción, se interpreta que la Masa de Agua Residual 3 corresponde al 99,5% de la Masa de Agua 3, quedando:

$$\text{MA3} = 52804,092 \text{ g}$$

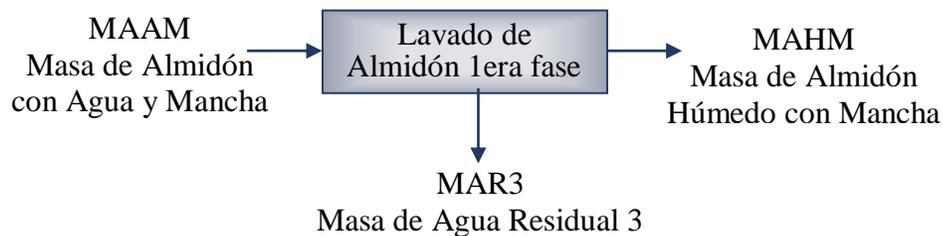
$$x_{\text{mar3}} = 0,995$$

$$\text{MAR3} = \text{MA3} * x_{\text{mar3}}$$

$$\text{MAR3} = 52804,092 * 0,995$$

$$\text{MAR3} = 52540,072 \text{ g}$$

$$\text{MAAM} = 55463,314 \text{ g}$$



$$\text{MAAM} = \text{MAR3} + \text{MAHM}$$

$$55463,314 = 52540,072 + \text{MAHM}$$

$$\text{MAHM} = 55463,314 - 52540,072$$

$$\text{MAHM} = 2923,242 \text{ g}$$

Segunda fase

En la descripción del proceso, se especifica que se emplea un total de 75,000 mL de agua por cada frasco en la centrifuga, lo que equivale a 300,000 mL al operar con los cuatro frascos disponibles. Después de la centrifugación inicial, se lleva a cabo un lavado secundario del almidón, seguido de una nueva centrifugación para eliminar las impurezas o manchas restantes. Esto incrementa el volumen total de agua empleada a aproximadamente 600,000 mL, correspondiente a una masa de almidón húmedo con mancha de 52,757 g, según el balance para los experimentos 3-a y 3-b, con una base de cálculo de 90,000 g.

Se determinó el factor de masa de agua 5 de la siguiente manera:

$$f_{ma5} = \frac{600,000 \text{ g}}{52,757 \text{ g}} \rightarrow f_{ma5} = 11,373$$

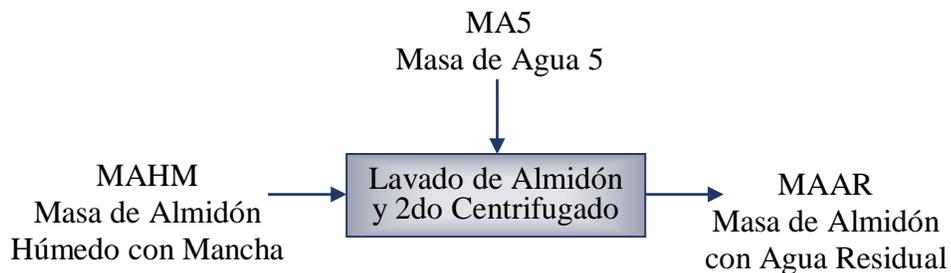
$$\text{MAHM} = 2923,242 \text{ g}$$

$$f_{ma5} = 11,373$$

$$\text{MA5} = \text{MAHM} * f_{ma5}$$

$$\text{MA5} = 2923,242 * 11,373$$

$$\text{MA5} = 33246,031 \text{ g}$$



$$\text{MAHM} + \text{MA5} = \text{MAAR}$$

$$2923,242 + 33246,031 = \text{MAAR}$$

$$\text{MAAR} = 36169,273 \text{ g}$$

3.5.1.10. Secado.

Primera fase

Para calcular la Masa de Almidón Húmedo, primero se determinó la fracción de masa de almidón húmedo presente en la Masa de Almidón Húmedo con Mancha. Esta fracción se calculó dividiendo la media de los valores de Masa de Almidón Húmedo de los experimentos 3-a y 3-b entre el valor de la Masa de Almidón Húmedo con Mancha, correspondiente a una base de cálculo de 90,000 g de masa inicial. Dicho valor es de 52,757 g, y el cálculo se realizó de la siguiente manera:

Tabla III-15 Media de la masa de almidón húmedo

Experimentos	Masa de almidón húmedo [g]
3-a	34,077
3-b	31,548
Media	32,813

Fuente: Elaboración Propia, 2024

$$x_{mah} = \frac{32,813 \text{ g}}{52,757 \text{ g}}$$

$$x_{mah} = 0,622$$

A partir de esta fracción, se concluye que el 66,2% del Almidón Húmedo con Mancha corresponde a Almidón Húmedo, mientras que el 37,8% restante corresponde a mancha. El cálculo de esta etapa se realizó de la siguiente manera:

$$MAHM = 2923,242 \text{ g}$$

$$MAH = MAHM * x_{mah}$$

$$MAH = 2923,242 * 0,622$$

$$MAH = 1818,257 \text{ g}$$

$$MAAR = 36169,273 \text{ g}$$



$$MAAR = MAR4 + MAH$$

$$36169,273 = MAR4 + 1818,257$$

$$MAR4 = 36169,273 - 1818,257$$

$$MAR4 = 34351,016 \text{ g}$$

Para explicar el aumento de la Masa de Agua Residual 4, primero se definió la cantidad de mancha que se retira junto con dicha agua residual. Esta cantidad se determinó restando la masa de almidón húmedo con mancha menos la masa de almidón húmedo. La diferencia entre estas masas corresponde a la mancha presente en el agua residual cuatro. Alternativamente, también se podría haber multiplicado la Masa de Almidón Húmedo por la fracción correspondiente al porcentaje de mancha, que es del 37,8 %.

$$MAHM = 2923,242 \text{ g}$$

$$MAH = 1818,257 \text{ g}$$

$$MM = MAHM - MAH$$

$$MM = 2923,242 - 1818,257$$

$$MM = 1104,985 \text{ g}$$

Se consideró que la cantidad de humedad de la Masa de Almidón Húmedo con Mancha se mantendrá constante hasta convertirse en la Masa de Almidón Húmedo. Por lo tanto, el agua residual 4 solo contendrá la mancha de fibra diluida con la Masa de Agua 5.

$$MAR4 = MA5 + MM$$

$$MAR4 = 33246,031 + 1104,985$$

$$MAR4 = 34351,016 \text{ g}$$

Este comportamiento en el aumento de masa se debe a que, durante la adición de la Masa de Agua 3, el almidón aún se encontraba disuelto en la yuca triturada. Al separarse mediante el proceso de centrifugación, el almidón absorbió el agua, lo que resultó en un comportamiento de humedad constante hasta convertirse en almidón

húmedo. Este fenómeno se manifiesta como un fluido no newtoniano, característico del almidón en un medio acuoso.

Segunda fase

Para calcular la Masa de Almidón Seco, primero se determinó la fracción de masa de almidón seco presente en la Masa de Almidón Húmedo. Esta fracción se calculó dividiendo la media de los valores de Masa de Almidón Seco de los experimentos 3-a y 3-b entre el valor de la media de la Masa de Almidón Húmedo, descritos en la tabla anterior. Dicho valor es de 32,813 g, y el cálculo se realizó de la siguiente manera:

Tabla III-16 Media de la masa de almidón Seco

Experimentos	Masas de almidón seco [g]
3-a	21,302
3-b	21,411
Media	21,357

Fuente: Elaboración Propia, 2024

$$x_{\text{mas}} = \frac{21,357 \text{ g}}{32,813 \text{ g}}$$

$$x_{\text{mas}} = 0,651$$

Esto indica que, después del secado, solo el 65,1% corresponde a almidón seco con una humedad del 10%, mientras que el 34,9% restante es el agua que se evapora en esta etapa. La Masa de Almidón Seco para esta etapa del proceso se calculó de la siguiente manera:

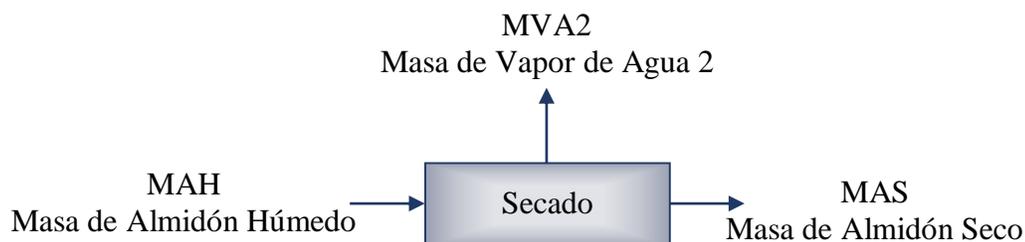
$$\text{MAH} = 1818,257 \text{ g}$$

$$x_{\text{mas}} = 0,651$$

$$\text{MAS} = \text{MAH} * f_{\text{mas}}$$

$$\text{MAS} = 1818,257 * 0,651$$

$$\text{MAS} = 1183,685 \text{ g}$$



$$\text{MAH} = \text{MVA2} + \text{MAS}$$

$$1818,257 = \text{MVA2} + 1183,685$$

$$\text{MVA2} = 1818,257 - 1183,685$$

$$\text{MVA2} = 634,572 \text{ g}$$

3.5.1.11. Molienda.

Con el propósito de calcular la Masa de Almidón Molido, primero se determinó el porcentaje de masa de almidón molido que quedó de la Masa de Almidón Húmedo. Este porcentaje se expresó de manera fraccionada y se calculó dividiendo la media de los valores de Masa de Almidón Molido de los experimentos 3-a y 3-b entre el valor de la media de la Masa de Almidón Seco, descritos en la Tabla III-16 (Media de la masa de almidón seco). Este último valor es de 21,357 g, y el cálculo de la fracción se realizó de la siguiente manera:

Tabla III-17 Media de la masa de almidón Molido

Experimentos	Masas de almidón molido [g]
3-a	20,005
3-b	18,342
Media	19,174

Fuente: Elaboración Propia, 2024

$$x_{\text{mam}} = \frac{19,174 \text{ g}}{21,357 \text{ g}}$$

$$x_{\text{mam}} = 0,898$$

Esta fracción indica que el 89,8% de la masa de almidón seco, tras esta etapa, se convierte en almidón molido, lo que representa una pérdida del 10,2% durante la molienda. La masa de almidón molido se calculó de la siguiente manera:

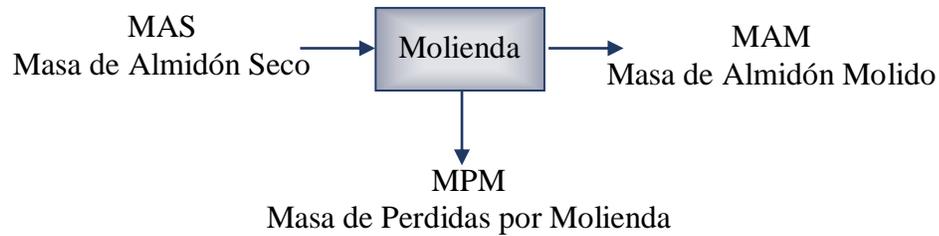
$$\text{MAS} = 1183,685 \text{ g}$$

$$x_{\text{mam}} = 0,898$$

$$\text{MAM} = \text{MAS} * x_{\text{mam}}$$

$$\text{MAM} = 1183,685 * 0,898$$

$$\text{MAM} = 1062,949 \text{ g}$$



$$\text{MAS} = \text{MPM} + \text{MAM}$$

$$1183,685 = \text{MPM} + 1062,949$$

$$\text{MPM} = 1183,685 - 1062,949$$

$$\text{MPM} = 120,736 \text{ g}$$

3.5.1.12. Tamizado.

Para calcular la Masa de Almidón Tamizado, primero se comenzó por determinar el porcentaje de almidón tamizado obtenido a partir de la Masa de Almidón Molido. Este porcentaje se expresó de manera fraccionada y se obtuvo dividiendo el promedio de los valores de la Masa de Almidón Tamizado de los experimentos 3-a y 3-b entre el promedio de la Masa de Almidón Molido, según lo descrito en la Tabla III-17. El valor de este último fue de 19,174 g, y la fracción se calculó de la siguiente manera:

Tabla III-18 Media de la masa de almidón Tamizado

Experimentos	Masas de almidón tamizado [g]
3-a	19,724
3-b	17,911
Media	18,818

Fuente: Elaboración Propia, 2024

$$x_{\text{mat}} = \frac{18,818 \text{ g}}{19,174 \text{ g}}$$

$$x_{\text{mat}} = 0,981$$

Esta fracción indica que el 98,1% de la masa de almidón molido, tras esta etapa, se convierte en almidón tamizado, lo que representa una pérdida del 1,9% durante el tamizado. La Masa de Almidón Tamizado se calculó de la siguiente manera:

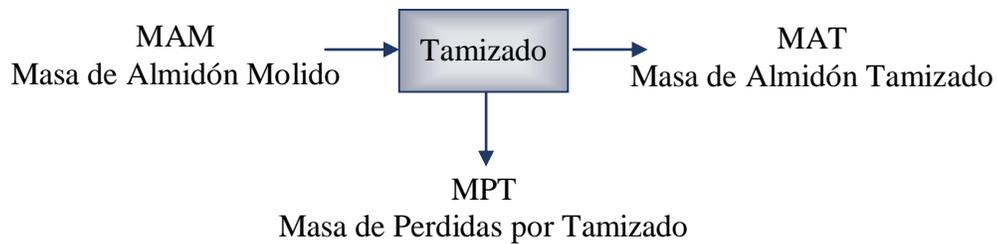
$$\text{MAM} = 1062,949 \text{ g}$$

$$x_{\text{mat}} = 0,981$$

$$\text{MAT} = \text{MAM} * x_{\text{mat}}$$

$$\text{MAT} = 1062,949 * 0,981$$

$$\text{MAT} = 1042,753 \text{ g}$$



$$\text{MAM} = \text{MPT} + \text{MAT}$$

$$1062,949 = \text{MPT} + 1042,753$$

$$\text{MPT} = 1062,949 - 1042,753$$

$$\text{MPT} = 20,196 \text{ g}$$

2.6.1.13. Envasado.

Para determinar la Masa de Almidón Envasado, primero se calculó el porcentaje de almidón envasado obtenido a partir de la Masa de Almidón Tamizado. Este porcentaje se expresó de manera fraccionada y se obtuvo dividiendo el promedio de los valores de la Masa de Almidón Envasado de los experimentos 3-a y 3-b entre el promedio de la Masa de Almidón Tamizado, según lo descrito en la Tabla III-18. El valor de este último fue de 18,818 g, y la fracción se calculó de la siguiente manera:

Tabla III-19 Media de la masa de almidón Envasado

Experimentos	Masas de almidón envasado [g]
3-a	18,478

3-b	17,611
Media	18,045

Fuente: Elaboración Propia, 2024

$$x_{\text{mat}} = \frac{18,045 \text{ g}}{18,818 \text{ g}}$$

$$x_{\text{mat}} = 0,959$$

Esta fracción indica que el 95,9% de la masa de almidón tamizado, tras esta etapa, se convierte en almidón envasado, lo que representa una pérdida del 4,1% durante el envasado. La Masa de Almidón Envasado se calculó de la siguiente manera:

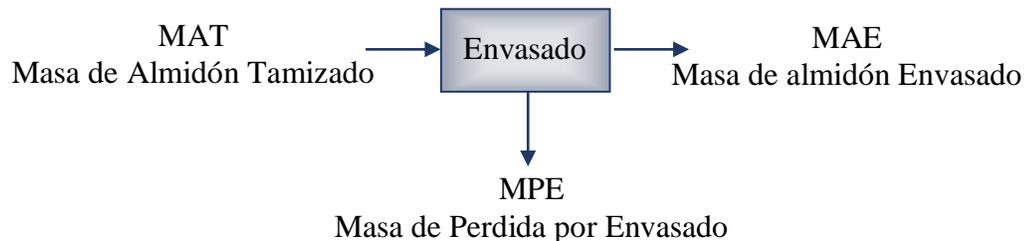
$$\text{MAT} = 1042,753 \text{ g}$$

$$f_{\text{mae}} = 0,959$$

$$\text{MAE} = \text{MAT} * f_{\text{mae}}$$

$$\text{MAE} = 1042,753 * 0,959$$

$$\text{MAE} = 1000,000 \text{ g}$$



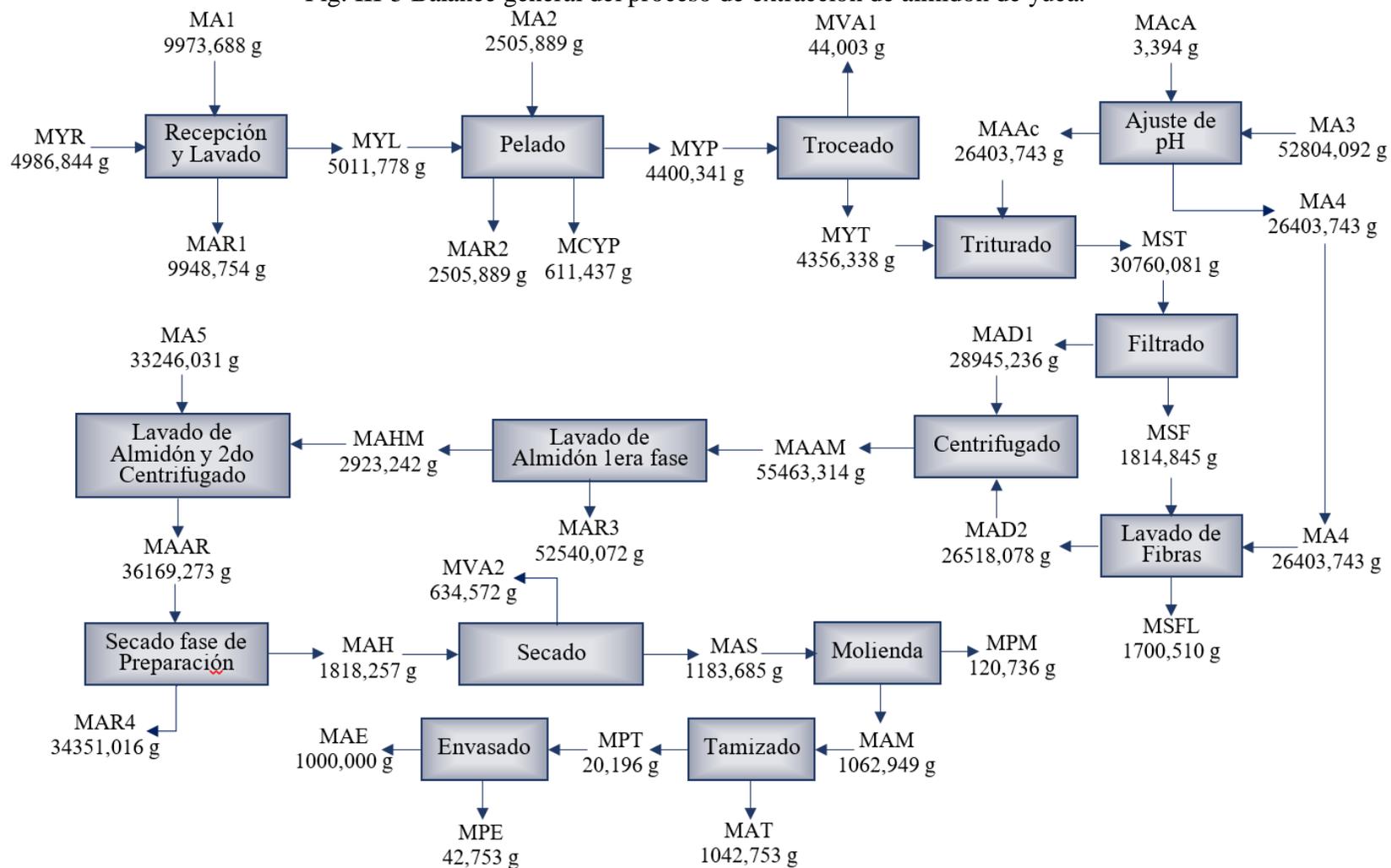
$$\text{MAT} = \text{MPE} + \text{MAE}$$

$$1042,753 = \text{MPE} + 100,000$$

$$\text{MPE} = 1042,753 - 1000,000$$

$$\text{MPE} = 42,753 \text{ g}$$

Fig. III-5 Balance general del proceso de extracción de almidón de yuca.



Fuente: Elaboración Propia, 2024

3.5.2. Balance de energía.

Para realizar el balance de energía, es necesario considerar los procesos que implican un intercambio de energía dentro del sistema. Para la determinación de los costos energéticos, se toma en cuenta la potencia consumida por cada equipo en función del tiempo.

3.5.2.1. Balance de energía en el secador.

Para determinar la cantidad de aire que se ocupara en el secador definimos el volumen de aire que entra en el mismo, las dimensiones internas del sacador son de:

$$\text{Ancho} = 45,000 \text{ cm}$$

$$\text{Fondo} = 37,500 \text{ cm}$$

$$\text{Alto} = 35,500 \text{ cm}$$

Ecuación III-1 Volumen del aire en el secador

$$Volumen_{\text{Aire}} = \text{Ancho} * \text{Fondo} * \text{Alto} = 45,000 \text{ cm} * 37,500 \text{ cm} * 35,500 \text{ cm}$$

$$Volumen_{\text{Aire}} = 59906,250 \text{ cm}^3 \approx 60,000 \text{ L} \approx 0,060 \text{ m}^3$$

Determinando el dato densidad del aire y su Capacidad Calorífica a 40,000 °C de la Tabla A-9 del libro “Mecánica de Fluidos, Fundamento y Aplicaciones” (Çengel & Cimbala, 2005).

$$\rho_{\text{Aire}} = 1,127 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{p\text{Aire}} = 1,007 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$m_{\text{Air}} = Volumen_{\text{Aire}} * \rho_{\text{Aire}} = 0,06 \text{ m}^3 * 1,127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$MAIR = 67,620 \text{ g} = 0,068 \text{ kg}$$

$$MAH = 1818,257 \text{ kg}$$

El dato de Entalpia de Evaporización de agua saturada se saca de la Tabla A-5 del libro “Termodinámica” (Çengel & Boles, 2006).

$$\lambda_{\text{Evap}} = 2256,500 \text{ kJ/kg}$$

Las temperaturas presentes en el proceso de secado será la temperatura del almidón húmedo, la temperatura final del almidón y la temperatura del sistema.

$$T_{\text{AH}} = 20,000 \text{ °C} = 293,150 \text{ K}$$

$$T_{Sist} = 40,000 \text{ } ^\circ\text{C} = 313,150 \text{ K}$$

$$T_{fin} = 40,000 \text{ } ^\circ\text{C} = 313,150 \text{ K}$$

$$Q_{Entregado} = Q_{Absorbido}$$

Ecuación III-2 Ecuación del Calor Requerido

$$Q_{Entregado} = m_{Aire} * Cp_{Aire} * (T_{Fin} - T_{sis}) + \lambda_{Evap} * m_{AH}$$

$$= 0,068 \text{ Kg} * 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (313,150 - 313,150)\text{K} + 2256,500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 1818,257 \text{ kg}$$

$$Q_{Entregado} = 4102917,321 \text{ kJ}$$

$$Cp_{Alm} = \frac{Q_{Abs} - m_{Aire} * Cp_{Aire} * (T_{Fin} - T_{sis})}{m_{AH} * (T_{Fin} - T_{AH})}$$

$$= \frac{4102917,321 \text{ kJ} - 0,068 \text{ kg} * 1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} * (313,150 - 313,150)\text{K}}{1818,257 \text{ kg} * (313,150 - 293,150)\text{K}}$$

$$Cp_{Alm} = 112,826 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

El calor necesario para la etapa de secado de la yuca es de 4102917,321 kJ y el Cp de almidón es de 112,826 kJ/kg K.

3.5.2.2. Consumo de energía.

Por otro lado, fue fundamental calcular la energía consumida en función de la potencia de cada equipo utilizado durante la fase experimental, con el fin de determinar el costo de operación.

Dado que la potencia eléctrica representa la cantidad de energía desarrollada o consumida por un equipo en una unidad de tiempo, su expresión matemática se define de la siguiente manera:

Ecuación III-3 Ecuación Potencia

$$P = I * V$$

Donde:

P: Potencia eléctrica (W)

I: Intensidad de la corriente (A)

V: Diferencia de potencial (V)

De todas maneras, basándose en la ecuación anterior se puede tener la fórmula para calcular la energía eléctrica:

Ecuación III-4 Ecuación de Energía

$$E = P * t$$

Donde:

E: energía eléctrica (kW-h)

P: Potencia Eléctrica (kW)

t: diferencia de potencial (h)

Las características de cada equipo fueron obtenidas a partir de sus placas de información. En la siguiente tabla se presentan las condiciones de operación de cada equipo y su costo de uso para extraer 1000 g de almidón de yuca, considerando que, en la ciudad de Tarija, el costo promedio de 1 kW-h es de 0,79 Bs.

Tabla III-20 Condiciones de operación de los equipos y costos de uso.

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo de operación (min)	Tiempo de operación (h)	Energía Consumida (kWh)	Costo de Energía [Bs]
Balanza Analítica	0,014	50,000	0,833	0,012	0,009
Licuada	0,500	50,000	0,833	0,417	0,329
Centrifuga	0,080	5000,000	83,333	6,667	5,267
Estufa	0,300	18000,000	300,000	90,000	71,100
Moledora	0,500	62,500	1,042	0,521	0,411
Tamizadora	0,920	500,000	8,333	7,667	6,057
Balanza de infrarrojos	0,400	500,000	8,333	3,333	2,633
Envasadora	0,700	50,000	0,833	0,583	0,461
Total =	3,414	24212,500	403,542	109,199	86,267

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Un análisis más detallado de los costos de la realización de toda la investigación se lo desarrollo en el apartado del ANEXO VI “Costos de la Investigación”.

3.5.3. Determinación del rendimiento.

Para determinar el rendimiento en el proceso de extracción de almidón de yuca se aplica la siguiente ecuación:

Ecuación III-5 Rendimiento del proceso

$$\% \text{ Rend} = \frac{\text{Masa Final}}{\text{Masa Inicial}} * 100\%$$

En donde la masa inicial es la cantidad de materia prima, es decir masa de la yuca amarilla junto con su cáscara y la masa final es la cantidad de Almidón Extraído ya envasado:

$$\% \text{ Rend} = \frac{1000,000 \text{ g}}{4986,844 \text{ g}} * 100\%$$

$$\% \text{ Rend} = 20,053 \%$$

Los rendimientos de cada experimento realizado se presentan en el ANEXO II: 'Detalle de Experimentos del Diseño Factorial'. El análisis del rendimiento en función del porcentaje de almidón presente en la yuca y del rendimiento del proceso de extracción se encuentra en el apartado 3.3.1.

3.6. CARACTERIZACIÓN DEL ALMIDÓN EXTRAÍDO.

Es fundamental caracterizar el producto obtenido para determinar sus propiedades y, en función de ello, evaluar su conservación. Por esta razón, el almidón extraído fue analizado mediante las técnicas descritas en la siguiente tabla.

Tabla III-21 Análisis proximales del almidón de yuca extraído CEANID

Parámetro	Técnica y/o método de ensayo	Unidad	Resultado
Cenizas	NB 39034:10	g/100,000 g	0,270
Fibra	Digestión Acida	g/100,000 g	n.d
Grasa	NB 313019:06	g/100,000 g	0,030
Hidratos de Carbono	NB 312031:06	g/100,000 g	88,980
Humedad	NB 313010:05	g/100,000 g	10,360
Proteína Total	NB/ISO 8968-1:08	g/100,000 g	0,340
Valor Energético	NB 312032:06	Kcal/100,000 g	358,000

Fuente: (Elaboración Propia en base a Resultados de Análisis, 2024)

De los resultados obtenidos, se puede interpretar que un contenido de cenizas tan bajo (0,27%) indica una alta pureza del almidón. Asimismo, la ausencia de fibra sugiere un proceso de extracción bastante eficiente, lo que amplía las posibilidades de aplicabilidad del almidón obtenido. En cuanto a los hidratos de carbono, el alto porcentaje (88,98%) confirma que el producto está compuesto principalmente por almidón. Por otro lado, el nivel de humedad (10,36%) se encuentra dentro de los parámetros establecidos, siendo este un valor moderado y adecuado para la mayoría de los almidones. Cabe destacar que un exceso de humedad podría favorecer el crecimiento de microorganismos y la degradación del producto. Además, el bajo contenido de proteínas (0,34 %) es característico del almidón puro y resulta deseable para muchas aplicaciones. Respecto al valor energético, las 358kcal/100g reflejan el aporte calórico del producto.

Por otra parte, en el laboratorio SGLAB se realizaron análisis para determinar el porcentaje de pureza del almidón, así como los porcentajes de amilosa y amilopectina presentes en el almidón extraído. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla III-22 Análisis de pureza del almidón de yuca extraído SGLAB

Nuestra Referencia			01	Limite permisible
Referencia Cliente			Almidón de yuca 3-ab	
Parámetros	Método	Unidad	Resultado	
Amilosa	Volumétrico	%	23,94	SLR
Amilopectina	Gravimétrico	%	75,3	SLR
Almidón	Cálculo	%	99,24	SLR

Fuente: (Elaboración Propia en base a Resultados de Análisis, 2024)

La amilosa y la amilopectina tienen un impacto significativo en las propiedades funcionales del almidón. La amilosa, debido a su estructura lineal, forma geles más fuertes y estables, mientras que la amilopectina, por su naturaleza ramificada, aporta viscosidad y textura. Un contenido de amilosa del 23,94% y de amilopectina del 75,3%

sugiere un equilibrio adecuado entre estas propiedades, lo que lo hace idóneo para diversas aplicaciones, como espesante alimentario, excipiente farmacéutico, y en la producción de películas y recubrimientos, entre otros usos.

3.6.1. Análisis comparativo con estándares comerciales.

El almidón extraído de yuca cumple con los estándares comerciales establecidos, posicionándose como un producto de alta pureza y calidad. Su bajo contenido de cenizas, grasa y fibra lo hacen competitivo frente a otras fuentes de almidón, como el producido por la empresa Eco Andes, así como el almidón de maíz, papa y arroz. Además, su elevado contenido de hidratos de carbono, junto con un nivel de humedad adecuado, garantizan su aplicabilidad en diversas industrias.

Tabla III-23 Comparación con estándares comerciales

Parámetro	Almidón de Yuca Extraído	Estándares Comerciales	Almidón de Yuca Eco Andes	Almidón de Maíz	Almidón de Papa	Almidón de Arroz
Cenizas	0,27%	≤ 0,3%	0,20	0,1%	0,4%	0,3%
Fibra	Ausencia	≤ 0,2%	0,90	0,2%	0,3%	0,1%
Grasa	0,03%	≤ 0,1%	0,02	0,06%	0,1%	0,04%
Hidratos de Carbono	89%	≥ 88%	88,69%	87,6%	84%	89,5%
Humedad	10,36%	≤ 12%	15	10%	13%	10,5%
Proteínas	0,34%	≤ 0,4%	0,19	0,3%	0,4%	0,3%
Valor Energético	358 kcal/100g	350-360 kcal/100g	348 kcal/100g	357 kcal/100g	355 kcal/100g	356,5 kcal/100g

Fuente: Elaboración Propia, 2024

En comparación con otros almidones, el almidón de yuca extraído demuestra características competitivas y, en algunos casos, superiores. Su contenido de cenizas (0,27%) se mantiene en un nivel intermedio, siendo más bajo que el del almidón de papa (0,4%) y de arroz (0,3%), pero ligeramente superior al de maíz (0,1%). La ausencia de fibra lo distingue positivamente frente a los demás almidones, que presentan contenidos entre 0,1% y 0,3%, lo que indica un proceso de extracción

eficiente. Además, su contenido de grasa (0,03%) es notablemente bajo, solo superado por el almidón Eco Andes (0,02%), lo que sugiere una buena estabilidad del producto.

En cuanto a los hidratos de carbono, con un 89%, se posiciona entre los más altos, solo ligeramente por debajo del almidón de arroz (89,5%), pero superior a los de maíz (87,6%) y papa (84%). Su nivel de humedad (10,36%) es muy similar al del maíz y el arroz, y significativamente mejor que el de la papa (13%) y el Eco Andes (15%), lo que indica una mejor conservación. Por último, el contenido proteico (0,34%) se mantiene en niveles comparables con los demás almidones comerciales.

3.6.2. Análisis de humedad final.

Si bien la humedad también representa un porcentaje del peso final, esta fue controlada para no superar los parámetros establecidos, ya que, de lo contrario, podría degradar el almidón y provocar tanto el crecimiento de microorganismos como la aglomeración del producto. Por esta razón, para el análisis de humedad final, se decidió realizar una curva de secado basada en el experimento que presentó el mayor rendimiento según sus variables, correspondiente al tercer experimento del diseño factorial.

Para el cálculo de la variación de humedad, se determinó la humedad en base húmeda utilizando los valores de masa inicial y final, tanto para la curva de secado como para su réplica, como se muestra a continuación:

Donde:

Hum_{Hum} : Humedad en base húmeda

$Masa_H$: Masa Húmeda (masa inicial)

$Masa_S$: Masa Seca (masa final)

$Masa_A$: Masa de Agua

$Masa_{Solid}$ = Masa de Sólidos

% Hum_{Sec} : Humedad en base seca

Ecuación III-6 Ecuación Humedad en Base Húmeda

$$Hum_{Hum} = \frac{Masa_H - Masa_S}{Masa_H}$$

$$Hum_{Hum1} = \frac{Masa_{H1} - Masa_{S1}}{Masa_{H1}} = \frac{33,964 \text{ g} - 16,754 \text{ g}}{33,964 \text{ g}}$$

$$Hum_{Hum1} = 0,507$$

$$Hum_{Hum2} = 0,505$$

Ecuación III-7 Ecuación Masa de agua

$$Masa_A = Hum_{Hum} * Masa_H$$

$$Masa_{A1} = Hum_{Hum1} * Masa_{H1} = 0,507 * 33,964 \text{ g}$$

$$Masa_{A1} = 17,220 \text{ g}$$

$$Masa_{A2} = 16,614 \text{ g}$$

Ecuación III-8 Ecuación Masa de sólidos

$$Masa_{Sold} = Masa_{Hum} - Masa_A$$

$$Masa_{Sold1} = Masa_{Hum1} - Masa_{A1}$$

$$Masa_{Sold1} = 16,744 \text{ g}$$

$$Masa_{Sold2} = 16,285 \text{ g}$$

Utilizando las masas de sólidos obtenidas en cada réplica, se determinó el porcentaje de humedad en base seca del almidón para cada punto de tiempo a 40 °C. Este cálculo se realizó considerando que la masa húmeda del almidón varía en función del tiempo de secado. Por lo tanto, se sustituyeron los valores en la fórmula correspondiente para cada intervalo de tiempo, generando así las respectivas columnas de porcentaje de humedad en base seca.

Ecuación III-9 Ecuación Humedad en Base Seca

$$\% Hum_{Sec} = \frac{Masa_H - Masa_{Sold}}{Masa_H} * 100\%$$

$$\% Hum_{Sec1} = \frac{Masa_H - Masa_{Sold1}}{Masa_H} * 100\% = \frac{33,964 \text{ g} - 16,744 \text{ g}}{33,964 \text{ g}} * 100\%$$

$$\% Hum_{Sec1} = 50,701 \text{ g}$$

$$\% Hum_{Sec2} = 50,500 \text{ g}$$

En la Tabla III-9 se observa que las columnas del porcentaje de humedad en base seca, correspondientes a un tiempo de 5:45 horas o 6 horas, presentan valores próximos a 23% y 21%, respectivamente. Para corregir esta variación, se calculó una media del factor de corrección, dividiendo el porcentaje de humedad en base seca según los tiempos correspondientes de los experimentos del diseño factorial. Estos experimentos tenían masas iniciales similares a las de la serie 3-a y 3-b, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla III-24 Media del factor de corrección.

	tiempo [h]	% Hum base seca	% Hum experimentos	Factor de corrección de humedad
3-a	6:00	21,745	10,540	2,063
3-b	6:00	21,745	10,550	2,061
4-a	6:00	21,745	10,710	2,030
4-b	6:45	16,653	10,190	1,634
7-a	4:45	29,225	10,550	2,770
7-b	5:30	24,705	10,140	2,436
8-a	5:15	26,170	10,430	2,509
8-b	5:30	24,705	10,320	2,394
				2,237

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Con el factor de corrección de 2,237, se desarrollaron las columnas de % Humedad en Base Seca Corregida. En estas se observa que, para un tiempo de 5:45 horas o 6 horas, la humedad del almidón se encuentra entre 10,325 % y 9,68%, respectivamente. Estos valores concuerdan con la mayoría de los tiempos de secado obtenidos en las pruebas preliminares y los experimentos del diseño factorial.

Tabla III-25 Datos para la Curva de secado

	Rep 1	Rep 2	Rep 1	Rep 2	Rep 1	Rep 2
Tiempo (h)	Peso (g)		% Humedad en Base Seca		% Humedad en Base Seca Corregida	
0:00	33,964	32,899	50,701	50,500	22,653	22,564
0:15	33,384	32,399	49,844	49,736	22,271	22,222
0:30	32,784	31,869	48,926	48,900	21,860	21,849
0:45	32,164	31,319	47,942	48,003	21,421	21,448
1:00	31,584	30,769	46,986	47,073	20,993	21,033

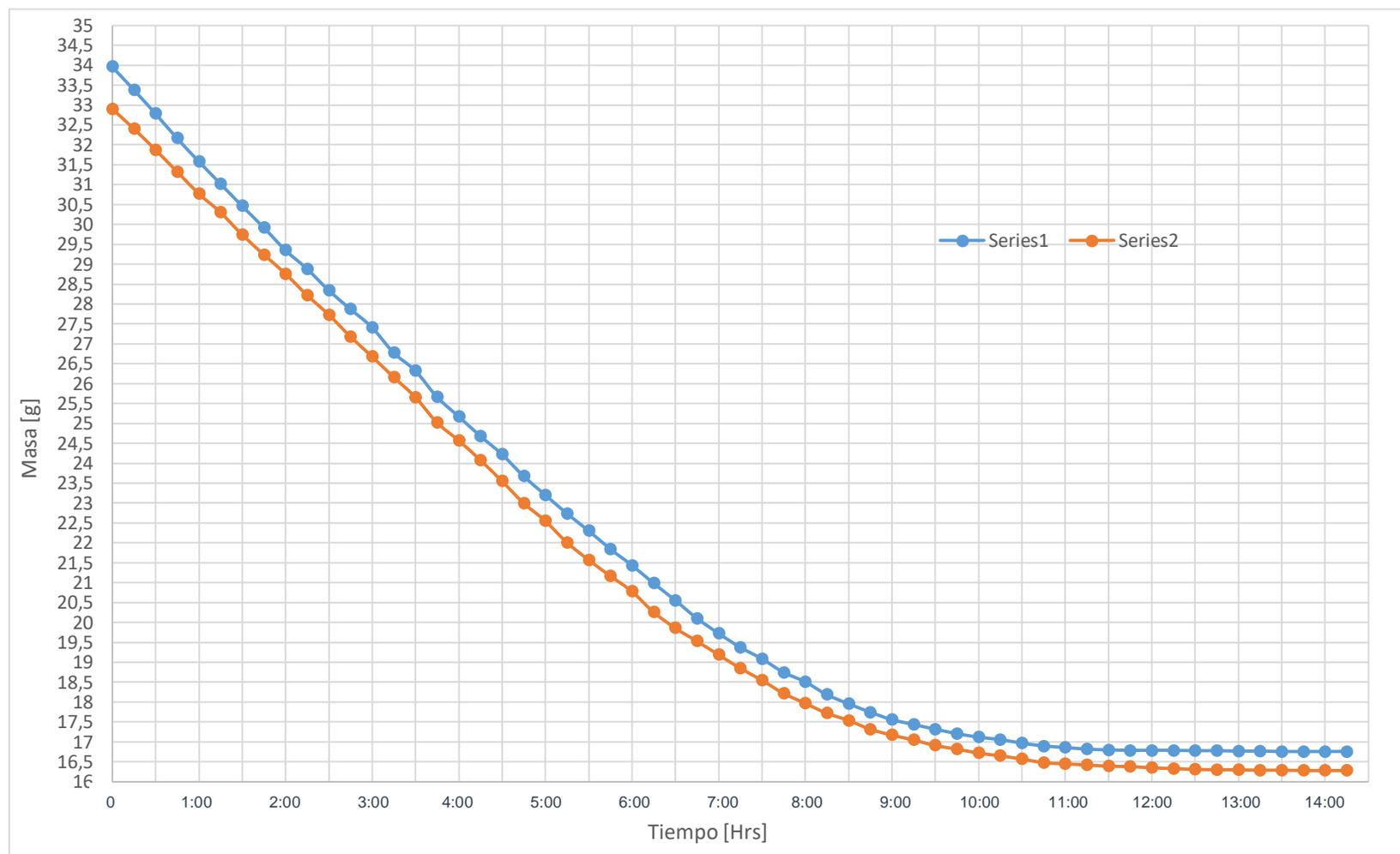
1:15	31,024	30,299	46,029	46,252	20,566	20,666
1:30	30,464	29,739	45,037	45,240	20,123	20,213
1:45	29,924	29,239	44,045	44,304	19,679	19,795
2:00	29,354	28,759	42,958	43,374	19,194	19,380
2:15	28,884	28,219	42,030	42,291	18,779	18,896
2:30	28,344	27,729	40,926	41,271	18,286	18,440
2:45	27,874	27,179	39,930	40,082	17,841	17,909
3:00	27,414	26,679	38,922	38,959	17,390	17,407
3:15	26,774	26,159	37,462	37,746	16,738	16,865
3:30	26,324	25,659	36,393	36,533	16,260	16,323
3:45	25,664	25,019	34,757	34,909	15,529	15,598
4:00	25,174	24,569	33,487	33,717	14,962	15,065
4:15	24,684	24,079	32,167	32,368	14,372	14,462
4:30	24,224	23,549	30,878	30,846	13,797	13,782
4:45	23,674	22,999	29,273	29,193	13,079	13,043
5:00	23,204	22,549	27,840	27,780	12,439	12,412
5:15	22,734	22,009	26,348	26,008	11,772	11,620
5:30	22,304	21,569	24,928	24,498	11,138	10,946
5:45	21,844	21,169	23,347	23,071	10,432	10,308
6:00	21,434	20,779	21,881	21,628	9,777	9,663
6:15	20,984	20,259	20,206	19,616	9,028	8,764
6:30	20,554	19,859	18,537	17,997	8,282	8,041
6:45	20,104	19,529	16,713	16,611	7,467	7,422
7:00	19,724	19,189	15,108	15,134	6,751	6,762
7:15	19,374	18,849	13,575	13,603	6,065	6,078
7:30	19,084	18,549	12,262	12,206	5,479	5,453
7:45	18,744	18,219	10,670	10,615	4,767	4,743
8:00	18,504	17,969	9,511	9,372	4,250	4,187
8:15	18,184	17,719	7,919	8,093	3,538	3,616
8:30	17,954	17,539	6,739	7,150	3,011	3,195
8:45	17,744	17,319	5,636	5,970	2,518	2,668
9:00	17,554	17,169	4,614	5,149	2,062	2,301
9:15	17,434	17,049	3,958	4,481	1,768	2,002
9:30	17,314	16,909	3,292	3,690	1,471	1,649
9:45	17,204	16,819	2,674	3,175	1,195	1,419
10:00	17,114	16,719	2,162	2,596	0,966	1,160
10:15	17,054	16,649	1,818	2,186	0,812	0,977
10:30	16,964	16,569	1,297	1,714	0,579	0,766
10:45	16,894	16,479	0,888	1,177	0,397	0,526
11:00	16,854	16,449	0,653	0,997	0,292	0,445
11:15	16,814	16,419	0,416	0,816	0,186	0,365
11:30	16,794	16,389	0,298	0,635	0,133	0,284

11:45	16,784	16,379	0,238	0,574	0,106	0,256
12:00	16,784	16,349	0,238	0,391	0,106	0,175
12:15	16,784	16,329	0,238	0,269	0,106	0,120
12:30	16,774	16,309	0,179	0,147	0,080	0,066
12:45	16,774	16,299	0,179	0,086	0,080	0,038
13:00	16,764	16,299	0,119	0,086	0,053	0,038
13:15	16,764	16,289	0,119	0,025	0,053	0,011
13:30	16,754	16,289	0,060	0,025	0,027	0,011
13:45	16,754	16,279	0,060	0,037	0,027	0,000
14:00	16,754	16,279	0,060	0,037	0,027	0,000
14:15	16,754	16,279	0,000	0,000	0,000	0,000
14:30	16,754	16,279	0,000	0,000	0,000	0,000
14:45	16,754	16,279	0,000	0,000	0,000	0,000

Fuente: Elaboración Propia, 2024

El contenido de humedad es un parámetro crítico en la conservación del almidón de yuca, ya que afecta directamente su estabilidad durante el almacenamiento. El estudio de la cinética de secado del almidón de yuca reveló tres fases distintas: una fase inicial de secado rápido (0-2 horas), con una tasa de pérdida de humedad de aproximadamente 1,5% por hora; una fase intermedia (2-6 horas), donde la tasa se redujo a 0,8 % por hora; y una fase final de aproximación al equilibrio (6-14 horas). El punto crítico de 10% de humedad, establecido como estándar para este estudio, se alcanzó aproximadamente a las 6 horas de secado (10,097 % \pm 0,023 %), demostrando una excelente reproducibilidad entre réplicas. Estos resultados se pueden observar en la siguiente gráfica:

Fig. III-6 Curva de secado



Fuente: Elaboración Propia, 2024

Tras la molienda y el tamizado la humedad sube 0,3 a 0,5% aproximadamente cumpliendo así con la norma del CODEX STAN 176-1989, considerado óptimo para evitar el deterioro microbiológico y preservar la funcionalidad del almidón.

La comparación entre la humedad calculada y la corregida permitió ajustar los resultados a valores más precisos, confirmando la importancia de controlar este parámetro para garantizar la vida útil del producto.

3.6.3. Conservación del producto.

Basándonos en los análisis proximales de laboratorio, se demostró que el almidón de yuca extraído posee características favorables para una vida útil prolongada. La baja humedad (10,36 %) mejora significativamente la estabilidad del almidón y se encuentra dentro de los parámetros permisibles. Además, el tipo de envasado, realizado en bolsas plásticas de polietileno y al vacío, garantiza la nula proliferación de microorganismos debido a la ausencia de oxígeno.

El bajo contenido proteico (0,34%) reduce la cantidad de sitios hidrofílicos en la matriz del producto, lo que disminuye la propensión del almidón a captar humedad del aire. Asimismo, reduce el riesgo de deterioro al presentar una menor fuente de sustratos nutritivos para los microorganismos, lo que disminuye la actividad enzimática interna y previene reacciones de deterioro, como la oxidación y la reacción de Maillard (interacción entre proteínas y azúcares reductores).

La ausencia de fibras elimina un factor de degradación, ya que estas, al ser compuestos estructurales de origen vegetal, tienden a retener humedad y pueden servir como sustrato para microorganismos.

Para determinar la vida útil del producto, es necesario realizar un estudio específico que considere las condiciones críticas a las que el producto podría estar expuesto fuera del envase. No obstante, el cumplimiento de la norma CODEX en cuanto al porcentaje máximo de humedad, el tipo de envasado seleccionado y los análisis proximales del producto garantizan una adecuada conservación del mismo.

3.7. ANÁLISIS DEL COSTO DE PRODUCCIÓN.

Es importante analizar el costo total requerido para producir 1000 g, para ello, se tomaron en cuenta los siguientes factores: el costo de la materia prima, la energía consumida por todos los equipos, la cantidad de agua utilizada y la masa de ácido ascórbico empleada.

Tabla III-25 Análisis de Costo de Producción

Factores de Producción	Unidad	Costo Unitario [Bs]	Cantidad	Costo de producción [Bs]
Materia Prima	Kg	8,000	4,987	39,896
Energía usada por cada	KWh	0,790	109,199	86,267
Agua	L	0,750	100,000	75,000
Ácido Ascórbico	g	0,050	3,394	0,170
			Total [Bs]	201,333

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Se demuestra que, para extraer 1000 g de almidón de yuca, se tendrá un costo de producción de 201,333 Bs. Esto indica que cada gramo de almidón extraído tiene un costo de 0,201 Bs aproximadamente, lo que no lo hace rentable en comparación con los almidones comerciales, ya que estos no están elaborados a escala laboratorio, sino a escala industrial. El costo de los análisis y el costo total de la investigación se detallan en la Tabla AVI-7 del Anexo VI.

3.8. EVALUACIÓN DE LOS SUBPRODUCTOS GENERADOS

Durante el proceso de extracción de almidón, se generaron tres subproductos principales: cáscara de la yuca, agua residual y residuos sólidos (fibras).

3.8.1. Cáscara de la yuca.

Durante el pelado de la yuca, se obtuvo la cáscara como subproducto. Esta parte de la raíz contiene una alta concentración de glucósidos cianogénicos, por lo que no es apta para el consumo humano directo. Sin embargo, su contenido en fibra y otros compuestos podría explorar posibilidades de uso, como la elaboración de fertilizantes o la producción de bioenergía a partir de azúcares fermentables mediante hidrólisis

enzimática, tal como propone Souto (2016), tras un adecuado tratamiento. La gestión adecuada de este subproducto es fundamental para evitar impactos ambientales negativos.

3.8.2. Residuos sólidos (fibras).

Los residuos sólidos generados tras la etapa de filtrado corresponden principalmente a fibras no aprovechadas de la yuca. Estas fibras podrían contener trazas mínimas de almidón, procedentes del porcentaje de almidón no extraído durante el proceso. Sin embargo, su potencial reutilización en aplicaciones como alimentación animal, compostaje agrícola, producción de ciclodextrinas, síntesis de ácido glutámico o hidrólisis de azúcares fermentables, como la glucosa, podría maximizar el aprovechamiento de la materia prima y reducir el impacto ambiental del proceso.

3.8.3. Agua residual.

El agua residual obtenida tras el proceso de triturado y lavado del almidón contiene restos de ácido cianhídrico, asociado a los glucósidos cianogénicos presentes en la yuca. Además, presenta una ligera presencia de almidón suspendido de baja densidad y calidad, lo que representa una posible pérdida del producto principal. Aunque no se realizó un análisis químico detallado, estudios previos indican que este subproducto podría representar un desafío ambiental si no se gestiona adecuadamente. Se recomienda implementar medidas de tratamiento previo a su disposición para mitigar posibles impactos.

3.9. DISCUSIÓN PRELIMINAR.

El análisis de los resultados obtenidos en este estudio evidencia que el proceso de extracción de almidón de yuca amarilla tiene un rendimiento satisfactorio del 23,73 %, el cual supera algunas investigaciones previas y concuerda con otras, como las de Mina (2019), Mogollón (2018), López (2018), Olusola (2015) y Velasco (2008), con rendimientos de 9,5 %, 20 %, 12,95 %, 16,3 % y 25%, respectivamente.

La caracterización de la materia prima mostró una calidad adecuada, reflejada en un contenido de almidón promedio de 24,14%, el cual se encuentra cercano al punto

medio del rango general de almidón en yuca, que suele variar entre 20% y 30% según las diferentes variedades. Esto representa un indicador favorable para una extracción eficiente.

Sin embargo, las pérdidas observadas durante las etapas de molienda, tamizado y envasado resaltan oportunidades de mejora en la metodología aplicada. Variables como la relación masa-volumen, el pH del agua y el tiempo de triturado influyeron significativamente en los resultados finales. Por ejemplo, la relación masa-volumen 1:6 demostró ser la más efectiva según el diseño factorial, acercándose a la relación máxima 1:7 propuesta por Mogollón (2018). Asimismo, un pH de 5 resultó ser el más adecuado para maximizar el rendimiento del almidón, validando teorías reportadas sobre la degradación de la pared celular de la yuca, como la de Rong (2009).

Los subproductos generados, como el agua residual con trazas de ácido cianhídrico y las fibras remanentes, plantean desafíos ambientales, pero también presentan oportunidades de valorización a través de aplicaciones en compostaje o alimentación animal.

En términos generales, los hallazgos sugieren que, si bien el proceso aplicado es efectivo, la implementación de ajustes en las variables operativas podría aumentar el rendimiento global, optimizando tanto la recuperación de almidón como la gestión de los subproductos.

3.10. RESUMEN DE LOS RESULTADOS.

3.10.1. Caracterización de la materia prima.

La yuca amarilla utilizada presentó un contenido promedio de almidón de 24,14%, con bajos niveles de ceniza (1,01%), fibra (0,9%), y proteína total (2,01%).

3.10.2. Rendimiento del proceso de extracción.

El rendimiento promedio fue de 23,73% en las pruebas óptimas, mientras que el rendimiento global alcanzó 20,053%.

La mayor eficiencia se obtuvo con una relación masa-volumen de 1:6, un pH ajustado a 5, y un tiempo de triturado de 1 minuto.

3.10.3. Características del producto final.

El almidón obtenido presentó una alta pureza, con un contenido de hidratos de carbono del 88,98% y una humedad final del 10,36%, asegurando una buena calidad para su conservación.

Estos resultados validan la metodología aplicada y destacan áreas para futuras optimizaciones, especialmente en la reducción de pérdidas durante las etapas del proceso y el manejo de los subproductos generados.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente proyecto de investigación, “Extracción de Almidón a Partir de Yuca Amarilla (*Manihot Esculenta* Crantz) a Escala Laboratorio”, se concluye lo siguiente:

- La Yuca Amarilla (*Manihot Esculenta* Crantz) utilizada en la investigación presenta.

Parámetro	Valor (g/100 g)
Acidez	0,14
Ceniza	1,01
Fibra	0,90
Humedad	65,23
Proteína Total	2,01
Porcentaje almidón en la yuca	
Almidón Total	24,14%

- Se seleccionó el método de extracción por vía húmeda, optimizando los parámetros operacionales como la calidad del producto final hasta un rendimiento del 23,73%. Se comprobó que el proceso de lavado de fibras y lavado de almidón es crucial para separar impurezas y obtener un producto final sin presencia de fibras.
- Mediante el análisis estadístico, se evaluó y confirmó que las variables seleccionadas para el proceso de extracción en el diseño factorial son significativas. El mejor rendimiento fue de 23,73% y se obtuvo con un tiempo de triturado de 1 min, una relación masa-volumen de 1:6 y un pH de 5,02.
- La metodología de investigación Experimental fue mixta con un enfoque cuantitativo y documental, para evaluar el rendimiento del proceso. El proceso experimental inició con la recepción y preparación de la materia prima, seguida del pelado, triturado y ajuste de pH para facilitar la liberación del almidón. Posteriormente, se realizó el lavado y centrifugado, asegurando la separación del almidón del resto de los componentes de la yuca. La fase final incluyó el secado, molienda, tamizado y envasado, obteniendo un producto con características óptimas. Los datos obtenidos fueron comparados con estudios previos y estándares comerciales para validar la metodología aplicada y la metodología cuantitativa fue

el rendimiento de extracción y el diseño factorial 2^3 , que permitió evaluar de manera sistemática las variables críticas del proceso.

- Se realizó un balance de materia, completo para todas las etapas, con una eficiencia global del 20.053%. Donde por cada kilogramo de yuca procesado se obtuvo aproximadamente 200,524 g de almidón seco. Asimismo, se evaluó el consumo energético de cada etapa del proceso, evidenciando que el centrifugado y secado fueron las etapas con mayor demanda energética.
- Del balance de materia, se determinó que la relación global entre la masa inicial de materia prima y el volumen total de agua es de aproximadamente 1:13,39.
- El almidón extraído presenta según los análisis proximales que por cada 100 gramos de almidón:

Parámetro	Valor (g/100 g)
Cenizas	0,27
Fibra	n.d
Grasa	0,03
Hidratos de Carbono	88,98
Humedad	10,36
Proteína Total	0,34
Valor Energético	358
Composición de la Yuca	
Amilosa	23,94 %
Amilopectina	75,30 %
Almidón	99,24 %

- Se determinó que una humedad final del 10,36% es adecuada para la conservación del almidón, minimizando el riesgo de proliferación microbiológica y degradación del producto y el tiempo óptimo de secado es de 5,5 a 6 horas en un área de 10 cm² de platillos de aluminio a 40 °C.
- El envasado al vacío garantiza la ausencia de desarrollo microbiológico debido a la falta de oxígeno en el envase.

- El análisis de costos indica que la obtención de 1000 g de almidón de yuca tiene un costo de 201,333 Bs, es decir, cada gramo de almidón extraído tiene un valor de 0,201 Bs aproximadamente.

4.2. RECOMENDACIONES.

- Es recomendable realizar un estudio sobre la extracción de almidón de otros tipos de yuca, como la yuca morada o la yuca blanca.
- Se recomienda a la carrera de Ingeniería Química desarrollar un proyecto de planta piloto utilizando la técnica empleada en la presente investigación, con énfasis en la obtención de subproductos procesados y reciclados a partir de los desechos generados.
- Se recomienda a la carrera de Ingeniería Química iniciar la investigación sobre el tratamiento del ácido cianhídrico presente en el agua residual.
- Se recomienda al Laboratorio de Operaciones Unitarias obtener o desarrollar un sistema de purificación de agua residual de la misma naturaleza que la utilizada en este proyecto, para futuras investigaciones.