

# **INTRODUCCIÓN**

## ANTECEDENTES

La hidrólisis enzimática de almidones ha tenido un desarrollo acelerado, ya que desde 1920 se han realizado numerosos ensayos y técnicas sobre ella. En 1945, se desarrollaron técnicas industriales novedosas que permitieron la obtención de un producto de gran pureza, estudios en base a diferentes enzimas demostraron que el uso de maltasa, glucoamilasa, amilasas tiene gran extensión específica y selectiva para la obtención de glucosa. Las amilasas principalmente la  $\alpha$ -amilasa, amiloglicosidasa y pulunansa son producidas por bacterias y hongos, son enzimas que degradan el almidón y tienen numerosas aplicaciones en la industria de procesos biotecnológicos, un ejemplo de ello es la producción de jarabes, que contiene oligosacáridos como maltosa y glucosa. (Espinal, Huanca, & Mollinedo, 2015)

Los jarabes de glucosa son producto de la hidrólisis del almidón y todos estos son mezclas de polímeros de D-glucosa. Los jarabes de glucosa se usan de acuerdo a sus diversas concentraciones en varias industrias tales como: panadería, confitería, procesado de frutas, alimentos compuestos, bebidas alcohólicas, misceláneos, bebidas frías, etc. Las reacciones para obtener jarabe de glucosa a partir del almidón pueden ser: Hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática. La hidrólisis enzimática en los últimos años ha desplazado a la hidrólisis ácida, debido a que se dispone de nuevas enzimas. La mayor parte de procesos que realizan hidrólisis de almidón usan proceso enzimático. Esto se debe a las ventajas que ofrece el mismo, como lo es el control de la formación de productos no deseables. (Quitiguiña & Santacruz, 2012)

La fuente de glucosa más utilizada a nivel mundial son las melazas, residuos de la industria azucarera, tanto de la caña de azúcar como de la remolacha. Sin embargo, en el mercado internacional, las melazas tienen cuatro usos básicos: producción de etanol, alimento animal, reprocesamiento industrial para extraer el azúcar contenido en ella, y en producciones industriales tales como: levadura, ácido cítrico, lisina, entre otros. Los ingenios azucareros en su mayor parte tienen una destilería anexa, donde consumen su melaza producida. Una fuente alternativa para la producción de glucosa a nivel industrial es la hidrólisis del almidón contenido de diversos cereales (maíz, arroz,

trigo), así como también de raíces y tubérculos (yuca, camote, papa, olluco, makal, malanga, jícama, entre otros). (Rios & Zelada, 2017)

Las papas recién cosechadas, contienen aproximadamente 80% de agua y 20% de materia seca. Cerca del 60-80% de la materia seca es almidón. El contenido de proteína de papa es similar a la de los cereales y es muy alto en comparación con otras raíces y tubérculos. (Arcos, 2015)

La papa ocupa un lugar privilegiado en la producción agrícola del país, contándose con diferentes variedades altamente cultivadas a nivel nacional y departamental. Además de pertenecer a una de las cuatro cadenas agroalimentarias establecidas como prioridad de desarrollo; es el tubérculo procedente de la planta (*Solanum tuberosum L.*), proveedora de una gran cantidad de nutrientes y de energía, por su contenido de almidón. (Montes , 2012)

Según el Sistema Integrado de Información Productiva (SIIP), 2021, la producción de papa es 1.380.517 toneladas, en una superficie de 185.562 hectáreas cultivadas. El departamento de Cochabamba se constituye como el principal productor de papa a nivel nacional, seguido de La Paz y Potosí. El departamento de Tarija cuenta con una producción de 80.434 toneladas, con una superficie cultivada de 10.835 hectáreas de papa, el rendimiento por hectárea cultivada equivale a 7,42 toneladas. El municipio de Padcaya, se constituye como el principal productor de papa a nivel departamental, seguido de Tarija, El Puente, San Lorenzo, Uriondo, Entre Ríos, Carapari, Yunchara, Villamontes, Bermejo y Yacuiba. (SIIP, 2021)

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Obtener jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática a partir del almidón de la papa, variedad Desirée (*Solanum tuberosum L.*) a escala laboratorio producida en el departamento de Tarija.

### **Objetivo específico**

- Caracterizar la materia prima almidón de papa variedad Desirée (*Solanum tuberosum L.*), con el fin de conocer la calidad de la misma se realiza análisis fisicoquímicos y microbiológicos.
- Seleccionar el proceso técnico experimental para la obtención de jarabe glucosado mediante hidrólisis.
- Ejecutar la fase experimental del proceso técnico, con la finalidad de determinar los parámetros óptimos de temperatura, pH y dosificación de enzima para un mejor rendimiento de jarabe glucosado.
- Realizar análisis fisicoquímicos y microbiológicos del jarabe glucosado obtenido, para determinar la calidad.
- Realizar el balance de materia y energía para obtener jarabe glucosado.
- Determinar el rendimiento porcentual y eficiencia del proceso de obtención de jarabe glucosado mediante hidrólisis.

### **JUSTIFICACIÓN**

El almidón es una de las principales moléculas de los carbohidratos en la nutrición humana. Durante la digestión, esta macromolécula se convierte en glucosa, que es la principal fuente de energía para el cerebro, ayudando a que el organismo siga con su funcionamiento normal; además, los carbohidratos para el organismo son una reserva de energía disponible y de rápido consumo.

Los jarabes de glucosa se producen a partir de almidón de maíz. Sin embargo, la producción nacional de maíz ya no es suficiente para cubrir las necesidades de consumo de los humanos y animales, ni a la creciente demanda de las industrias farmacéuticas y de alimentos por jarabes, debido a esto, se han propuesto nuevas alternativas de materias primas para el aislamiento de almidón y su posterior utilización para la producción de jarabes.

El jarabe de glucosa es uno de los productos de gran valor comercial que pueden sustituir a la azúcar de mesa, o puede ser utilizado para la obtención de jarabes de

fructosa. Como consecuencia de esto, surge la necesidad de buscar alternativas eficaces para producir jarabe de glucosa. En nuestro país este jarabe es muy limitado, por lo que debe importarse.

En este trabajo de investigación se busca fuentes alternativas de producción de glucosa, un azúcar que sirve como insumo para diferentes industrias tanto fermentativas como químicas. La materia prima empleada en el presente trabajo es la papa. En Bolivia es ampliamente producida, se cuenta con una gran gama de variedades de papa; en el departamento de Tarija se cuenta con una alta producción de papa de la variedad Desirée un 80 por ciento y el restante 20 por ciento corresponde a otras variedades como la papa marcela y papa imilla, que al procesarla se le dará un mayor valor agregado. Primero se obtendrá almidón, luego se hidrolizará y finalmente se obtiene glucosa. De esta manera se incentiva la obtención de glucosa de otras fuentes que no sean tradicionales y escasas como la melaza de la caña de azúcar. Es importante porque además de presentar fuentes alternativas de obtención de glucosa por hidrólisis enzimática del almidón, se le da un gran valor agregado a este cultivo, y por ende se mejora la economía de los agricultores dedicados a la siembra de este tubérculo.

En el presente trabajo, se destaca la importancia de dar uso a la papa de variedad Desirée, enfocado a la obtención de jarabe de glucosa a partir del almidón de papa mediante hidrólisis enzimática.

### **Justificación económica**

Con la ejecución del presente proyecto se busca generar un valor agregado a la materia prima lo cual en caso de ejecutarse causará varios impactos positivos en la economía del sector agropecuario del departamento de Tarija. Es importante resaltar que la producción de jarabe glucosado a partir de almidón de la papa, es un producto que podría potenciar un mercado importante como ser la industria alimentaria (confitería, heladería, panadería, mermeladas, gelatinas y frutas enlatadas), en la industria farmacéutica, en bebidas fermentadas vodka, cervecerías y en productos de cuero; esto representa una alternativa que busca iniciar el proceso investigativo a que pueda dar curso a nuevos proyectos de trabajo dirigido al rubro alimenticio y no alimenticio,

generando nuevas fuentes de empleo para los futuros profesionales pertenecientes a esta área de conocimientos.

Además, se busca generar ingresos a los productores y poder aumentar la producción cultivada de papa, ya que se cuenta con tierras aptas para el cultivo de papa en las zonas del departamento de Tarija, colaborando al sector rural a mejorar su calidad de vida, generando ingresos económicos que contribuyan en su canasta alimenticia. La demanda de papa será constante entonces el precio por lo mismo se mantendrá estable que no afecte a ningún sector.

### **Justificación tecnológica**

Con la ejecución del presente trabajo de investigación se pretende dar importancia al procesamiento de la papa para la obtención de jarabe glucosado. Este subproducto proveniente de la papa con importantes cantidades de almidón y azúcares, el desarrollo de nuevas tecnologías nos permite obtener un nuevo producto a partir de esta materia prima en condiciones determinadas para su posterior aplicación, sea en el sector alimenticio o en el no alimenticio. Se espera dar un aporte al sector industrial, y además permitir la implementación del estudio de nuevos productos con el desarrollo de la investigación aplicada en donde se utilizarán nuevas metodologías como la hidrólisis del almidón de papa por acción enzimática de las enzimas  $\alpha$ -amilasa y glucoamilasa para la obtención de jarabe glucosado a partir de almidón de papa, en condiciones determinadas para su posterior aplicación, como un producto destinado a la elaboración de bebidas, farmacéutica, entre otras, es decir, que se de uso tanto en la industria alimenticia y la no alimenticia.

Se busca dar un aporte al sector industrial, que permita la implementación el estudio de nuevos productos. Generando así una alternativa oportuna de poder ser aprovechados en el estudio de este tubérculo (papa), obteniendo derivados como almidón, fibra, harina y demás, que permitan desarrollar las aplicaciones industriales más adecuadas, conduciéndolas a un aprovechamiento integral de la misma.

**Justificación social**

Con este trabajo de investigación se busca contribuir al mejoramiento del sector industrial alimenticio y no alimenticio. Al elaborar jarabe glucosado a partir de almidón de papa, un producto muy aplicable, utilizado como espesante, gelificante, endulzante, etc. Así también, aportará a mejorar los ingresos económicos de los productores y proveedores de papa, por ende, se tendrá una mayor producción de papa al tener terrenos aptos para su producción de la misma en el departamento de Tarija, porque se incrementará la demanda de la misma y además se tendrá una alternativa para poder comercializar el producto con un valor agregado.

Los resultados de la investigación servirán como aporte técnico y científico para futuras investigaciones o proyectos productivos, como ser la obtención de bioetanol, vodka entre otros.

**Justificación ambiental**

Es importante destacar que el método seleccionado de hidrólisis enzimática para la obtención de jarabe glucosado no es un proceso contaminante por el hecho de no producir gases tóxicos ni desechos peligrosos, a diferencia de la hidrólisis ácida donde la concentración de ácido en los desechos es alta. Con la industrialización de la papa para obtener jarabe glucosado, sus propiedades fisicoquímicas de esta materia prima son muy favorables al medio ambiente, en caso de utilizar la cáscara como abono orgánico en forma de compost en los terrenos que la requieran y de esta forma evitar que se convierta en focos de contaminación.

**CAPÍTULO I**  
**MARCO TEÓRICO**

## 1.1 Jarabe de Glucosa

La norma para azúcares CODEX, define al jarabe de glucosa como una solución acuosa concentrada y purificada de sacáridos nutritivos obtenidos del almidón y/o la inulina. El jarabe de glucosa tiene un contenido equivalente de dextrosa de no menos del 20% m/m (expresado como D-glucosa sobre peso seco), y un contenido total de sólidos de no menos del 70% m/m. (Codex Alimentarius , 1999)

Cabe señalar que en la industria y en gran parte de la literatura especializada, se llaman jarabes glucosados a hidrolizados a partir de un DE (Equivalente de dextrosa), indicativo del contenido de azúcares reductores de un edulcorante, calculado como dextrosa y expresado como porcentaje de sólidos totales. Las características de los jarabes se obtienen según las condiciones de hidrólisis y el medio utilizado para dicha hidrólisis. (Huanca Lopez, 2014)

### 1.1.1 Caracterización fisicoquímica y sensorial

En cuanto a propiedades fisicoquímicas, el jarabe de glucosa presenta las siguientes especificaciones (ver Tabla I-1).

**Tabla I-1: Características fisicoquímicas del jarabe de glucosa**

Especificaciones Fisicoquímicas		
Compuesto	Unidad	Cantidad
Solidos solubles	°Brix	52,1 – 83,1
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1,41
pH	-	4,5 - 5,5

**Fuente:** Gayoso, 2018

El jarabe puede presentarse como un compuesto de sacarosas como la glucosa, fructosa, maltosa, donde se caracteriza organolépticamente según las siguientes especificaciones físicas (ver Tabla II-2).

**Tabla I-2: Características sensoriales del jarabe de glucosa**

Características Sensoriales	
<b>Apariencia</b>	Líquido viscoso
<b>Color</b>	De incoloro a amarillo
<b>Olor</b>	Característico y libre de olores extraños
<b>Sabor</b>	Dulce
<b>Imagen</b>	

**Fuente:** Gayoso, 2018

## 1.2 Papa

La papa (*Solanum tuberosum L.*) es una planta originaria de América del Sur, de la región de la cordillera andina. El cultivo de la papa se realiza desde tiempos inmemorables, pues los antiguos pobladores de los andes peruanos, ecuatorianos y bolivianos acostumbraban a sembrar en terrazas, las variedades cultivadas comprendían el *Solanum andigenum*. Luego, este cultivo ha sido mejorado, de donde se obtuvo el *Solanum tuberosum L.* (Guzmán, 2018)

La papa (*Solanum tuberosum L.*) es un cultivo alimenticio de mucha importancia en el mundo. En la producción mundial de papa es alrededor de 315 millones de toneladas año. Es uno de los alimentos principales de la canasta familiar y al igual que otros cultivos, su producción se ve limitado por factores como plagas y enfermedades, factores climáticos adversos y varios factores de fertilización, causando pérdidas en el rendimiento y elevado costo. En Bolivia la papa se cultiva principalmente a alturas de 1800 a 3180 m.s.n.m. (Pimentel, 2017)

La papa se cultiva en diferentes épocas del año según las regiones como, por ejemplo: en agosto en las zonas de los valles, en noviembre a diciembre en las zonas altas y en

febrero a mayo en las zonas sub andinas como ser Emborozú, Carapari y otros valles interandinos como sud tropical. (Guzmán, 2018)

### 1.2.1 Taxonomía

La papa (*Solanum tuberosum L.*) pertenece a la clase Angiospermae, familia *Solanaceae*. En la Tabla I-3, se detalla la taxonomía de la papa (ver Anexo A).

**Tabla I-3: Taxonomía de la papa**

<b>Reino</b>	Vegetal
<b>Phylum</b>	Telemophytae
<b>División</b>	Tracheophytae
<b>Sub división</b>	Anthophyta
<b>Clase</b>	Angiospermae
<b>Sub clase</b>	Dicotyledneae
<b>Grado evolutivo</b>	Metachlamideae
<b>Grupo de ordenes</b>	Tetracíclicos
<b>Orden</b>	Poleoniales
<b>Familia</b>	Solanaceae
<b>Nombre científico</b>	<i>Solanum tuberosum L.</i>
<b>Nombre común</b>	Papa o patata

**Fuente:** Herbario Universitario (T.B.), 2022

### 1.2.2 Descripción morfológica

La papa es una planta suculenta, herbácea y anual por su parte aérea y perenne por sus tubérculos (tallos subterráneos) que se desarrollan al final de los estolones que nacen del tallo principal, y a veces de varios tallos, según el número de yemas que hayan brotado del tubérculo. (Guzmán, 2018)

Esta planta logra adaptarse a condiciones tropicales, llegando a ser cultivada desde los 450 hasta los 3000 m.s.n.m. (Salgado, 2018)

El tubérculo es un sistema morfológico ramificado, los ojos de los tubérculos tienen una disposición rotada alterna desde el extremo proximal del tubérculo donde va inserto el estolón hasta el extremo distal, donde los ojos son más abundantes. (Guzmán, 2018)



**Figura I-1** Papa variedad Desirée  
**Fuente:** Servicio agrícola y ganadero, 2019

### **1.2.2.1 Germinación**

a) El tubérculo semilla, para germinar, tiene que pasar por un periodo de reposo o dormancia de 2 a 3 meses; después de ese periodo emite brotes de 0,5 a 1 cm de longitud y es cuando el tubérculo está apto para la siembra. La emergencia de la planta sucede después de 15 días de haber sido sembrada, cuando es principalmente acondicionada o inducida a la brotación. caso contrario demorara unos 20 a más días para emerger.

b) La semilla sexual germina generalmente después de 8 a 10 días de haber sido sembrada y haber pasado por un periodo de dormancia de 4 a 6 meses. Esta semilla es utilizada en programas de mejoramientos genéticos para la obtención de nuevas variedades. Tienen como ventaja, su bajo costo y facilidad de transporte, ya que con 60 gr es posible la siembra de papa. La planta mide entre 0,50 – 1,50 m. según la variedad. (Guzmán, 2018)

### **1.2.2.2 Raíces**

En las plantas provenientes de semilla sexual, la raíz principal es filiforme, a partir de la cual aparecen ramificaciones laterales que forman un sistema fibroso. La raíz formada a partir de semilla tubérculo es fibrosa, no existe una raíz principal y posee muchas raíces adventicias. Su mayor crecimiento lo desarrolla en los primeros 0,20 m. de profundidad, extendiéndose lateralmente de 0,30 hasta 0,60 m. las raíces laterales fibrosas pueden llegar hasta 1,20 m. de profundidad en suelos francos y profundos como tal. (Guzmán, 2018)

### **1.2.2.3 Tallos**

Los tallos de la planta de papa se clasifican en: aéreos que son los principales, estolones y los tubérculos. Las plantas provenientes de semilla tubérculo pueden producir varios tallos aéreos, herbáceos y erguidos resultados del desarrollo de las yemas que se encuentran en los ojos del tubérculo. Los tallos aéreos laterales son órganos que se ramifican a partir de los tallos principales, pueden producirse varios tallos como también yemas en el tubérculo y pueden alcanzar alturas desde los 50 cm y de 1 m en las variedades criollas. Las especies silvestres pueden alcanzar 3 m de longitud. El diámetro de los tallos oscila entre 5 a 25 mm, siendo estos de forma redondeada, triangular o cuadrangular, los colores varían desde verde claro hasta púrpura dependiendo de la variedad. (Salgado, 2018)

### **1.2.2.4 Estolones**

Morfológicamente descritos, los estolones de la papa son tallos laterales que crecen horizontalmente por debajo del suelo a partir de yemas de la parte subterránea de los tallos. Los estolones largos son comunes en las papas silvestres y el mejoramiento de la papa tiene como una de las metas obtener estolones cortos. Los estolones pueden formar tubérculos mediante un agrandamiento de su extremo terminal. Sin embargo, no todos los estolones llegan a formar tubérculos. Un estolón no cubierto con suelo, puede desarrollarse en un tallo vertical con follaje normal. (Garnica, 2015)

### **1.2.2.5 Tubérculos**

Los tubérculos son tallos que se originan al extremo del estolón y tienen yemas y ojos. La formación de los tubérculos es consecuencia de la proliferación del tejido de reserva que estimula el aumento de las células hasta un factor de 64 veces. Los hidratos de carbono se almacenan dentro de las células del parénquima de reserva, de la medula y la corteza en forma de gránulos de almidón. (Garnica, 2015)

### **1.2.2.6 Rizomas**

Son tallos subterráneos de los que surgen las raíces adventicias. Los rizomas producen unos hinchamientos denominados tubérculos, siendo estos en formas ovales o redondeado. (Salgado, 2018)

### **1.2.2.7 Hojas**

El follaje normalmente alcanza una altura entre 0,60 a 1,50 m. las hojas son compuestas y pinnadas. Las hojas primarias de plántulas pueden ser simples, pero una planta madura contiene hojas compuestas en par y alternadas. Las hojas se ordenan en forma alterna a lo largo del tallo dando un aspecto frondoso al follaje. (Garnica, 2015)

### **1.2.2.8 Flores**

El pedúnculo de la inflorescencia está dividido generalmente en dos ramas, cada una de las cuales se subdivide en otras dos ramas. De esta manera se forma una inflorescencia llamada cimosa. De las ramas de las inflorescencias salen los pedicelos, en cuyas puntas superiores se encuentran los cálices. Cada pedicelo tiene una coyuntura o articulación en la cual se desprenden del tallo las flores o los frutos. Esta articulación es pigmentada en algunas variedades cultivadas. Las flores de la papa son bisexuales (tienen ambos sexos), y poseen las cuatro partes esenciales de una flor: cáliz, corola, estambres y pistilo. (Garnica, 2015)

### **1.2.2.9 Brotes**

Los brotes crecen de las yemas que se encuentran en los ojos del tubérculo y el color es una característica varietal importante. Los brotes pueden ser blancos, parcialmente coloreados en la base o el ápice, o casi totalmente coloreados. Los brotes blancos, cuando se exponen indirectamente a la luz, se tornan verdes. El extremo basal del brote forma normalmente la parte subterránea del tallo y se caracteriza por la presencia de lenticelas. Después de la siembra, esta parte rápidamente produce raíces y luego estolones o tallos laterales. El extremo apical del brote da origen a las hojas y representa la parte del tallo donde tiene lugar el crecimiento del mismo. (Guzmán, 2018)

### **1.2.2.10 Fruto, semilla**

El fruto de la planta de papa es una baya, la cual puede presentar una forma redonda, alargada, ovalada o cónica; su diámetro generalmente varía entre 1 y 3 cm, y su color puede ser desde verde a amarillento o de marrón rojizo a violeta. Las bayas, que poseen dos lóculos y pueden contener aproximadamente entre 200 y 400 semillas, se presentan

agrupadas en racimos terminales, los cuales se van inclinando a medida que avanza el desarrollo de los frutos. Una planta puede dar en promedio unas 20 bayas.

Las semillas son muy pequeñas, aplanadas, de forma arriñonada, y pueden ser de colores claros, amarillentos o con diversos tonos de marrón. En promedio, un gramo puede contener unas 1500 semillas. (Guzmán, 2018)

### **1.2.3 Descripción de la variedad Desirée**

La papa (*Solanum tuberosum L.*) variedad Desirée es el producto de selección a partir del cruce *Urgenta x Depesche*, el estudio fue realizado por la compañía ZPC de Leeuwarden, en Holanda, y fue liberada para su producción comercial desde 1962. (Brenes & Gómez, 2009)

La papa Desirée es una planta de crecimiento intermedio, semi erecta, de buen vigor, follaje de color verde grisáceo oscuro, sus tubérculos son de forma oval alargado, ojos superficiales piel rosada y pulpa amarillo claro. Tiene un rendimiento alto, y una buena resistencia al virus, moderada susceptibilidad al virus del enrollamiento de las hojas de la papa y susceptible a la sarna común (*Streptomyces scabies*). (Guzmán, 2018)

El departamento de Tarija cuenta con zonas propicias para la producción de papa tal es el caso de la llanura de zona de Iscayachi, Rejara; en el valle central de Tarija como la comunidad de San Andrés, Camacho, La Huerta; en los valles sur de Entre Ríos, Triángulo de Bermejo como ser la comunidad de Nogalitos, El Salado, La Goma, son aptas para las variedades (*Solanum tuberosum L.*) sin dejar atrás a la zona del chaco húmedo que representa una zona potencial para variedades de llanos, determinándose como una región de producción comercial y las zonas altas representan áreas de producción de tubérculo para semilla. (Montes , 2012)

#### **1.2.3.1 Característica de la planta**

- Ciclo vegetativo de 90 – 120 días.
- Resistencia media a tizón tardío (*Phytophthora infestans*).
- Planta vigorosa que alcanza entre los 50-60 cm de altura.
- Flor violeta.

- Follaje de desarrollo rápido.
- Madurez temprana.
- Rendimiento elevado.

#### **1.2.3.2 Características del tubérculo**

- Tubérculo ovalado-largo.
- Piel lisa y color rojo brillante.
- Pulpa color crema.
- Buena para hervir y para freír. (Salgado, 2018)

#### **1.2.4 Composición química y valor nutricional de la papa**

La papa, es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, después del arroz y el trigo, su importancia radica en su alto rendimiento en cuanto al uso de tierra y requerimiento de agua, así como por sus propiedades nutricionales. Este tubérculo es una excelente fuente de carbohidratos (60 - 80 %), tiene un contenido de proteínas similar al de los cereales y más alto que al de otros tubérculos y raíces (aprox. 2,57 %) y muy poca cantidad de lípidos (0,1 %). (Quiroga , 2018)

Además, aporta con una diversa cantidad de micronutrientes, tal como la vitamina C (11,4 mg/100 g), en cuyo caso puede llegar a proporcionar aproximadamente la mitad del requerimiento diario de un adulto; pero también contiene riboflavina, niacina y tiamina, y minerales como el fósforo, calcio, hierro, potasio y magnesio. Por otro lado, si el consumo de este tubérculo es realizado con la cáscara, esto implicaría mejorar la riqueza de la ingesta, con aproximadamente 3 gramos de fibra por porción, un valor similar al que resultaría consumiendo cereales. (Quiroga , 2018)

La composición química y contenido nutricional que se detalla (ver Tabla I-4), puede variar de acuerdo con las características genéticas del cultivar, sistema de producción agrícola seleccionado (densidad de plantas, características del suelo), condiciones climáticas y prácticas de manejo agronómico.

**Tabla I-4: Composición química y contenido nutricional de la papa (*Solanum tuberosum L.*) en su estado fresco**

Componentes (mg/100 g)	Valor promedio	Componentes (mg/100 g)	Valor promedio
<b>Humedad</b>	73,1 - 88,8	<b>Hierro</b>	0,3 - (3,8 ± 0,4)
<b>Lípidos</b>	0,06 ± 0,01	<b>Calcio</b>	0,87 - 17,0
<b>Fibra cruda</b>	0,3 - (0,5 ± 0,08)	<b>Potasio</b>	5,3 - (651,9 ± 91,9)
<b>Cenizas</b>	0,6 - (1,2 ± 0,08)	<b>Fósforo</b>	46 - (60,7 ± 4,8)
<b>Almidón</b>	9,1 - 19,5	<b>Ácido ascórbico</b>	2,8 - (42,0 ± 1,8)
<b>Azúcares reductores</b>	0,2 - 1,3	<b>Niacina (VIT B3)</b>	1,2 - 1,7
<b>Proteínas</b>	1,7 - 4,2	<b>Tiamina (VIT B1)</b>	0,08 - 0,11
		<b>Riboflavina (VIT B2)</b>	0,03 - 0,04

**Fuente:** Beltran, 2020

### 1.3 Almidón

El almidón es una mezcla de dos polímeros, amilosa y amilopectina, cuya proporción relativa en cualquier almidón, así como el peso molecular específico y el tamaño de los gránulos, determinan sus propiedades fisicoquímicas y su potencialidad de aprovechamiento en ciertos procesos industriales.

Los almidones son principales constituyentes de muchos alimentos. Son carbohidratos naturales que forman las reservas de nutrientes de las plantas, el cual representa una fracción importante en un gran número de productos agrícolas como los cereales (maíz, trigo, arroz) cuyo contenido de almidón presente va del 30 - 80 %, en las leguminosas (frijol, chícharo, haba) con un 25 – 30 % de este carbohidrato, y los tubérculos (papa, yuca), en los que el almidón representa entre un 60 - 90 %, algunas frutas como el plátano y el mango en estado inmaduro llegan a contener hasta un 70 % de almidón como tal. (Lipa & Maquera, 2013)

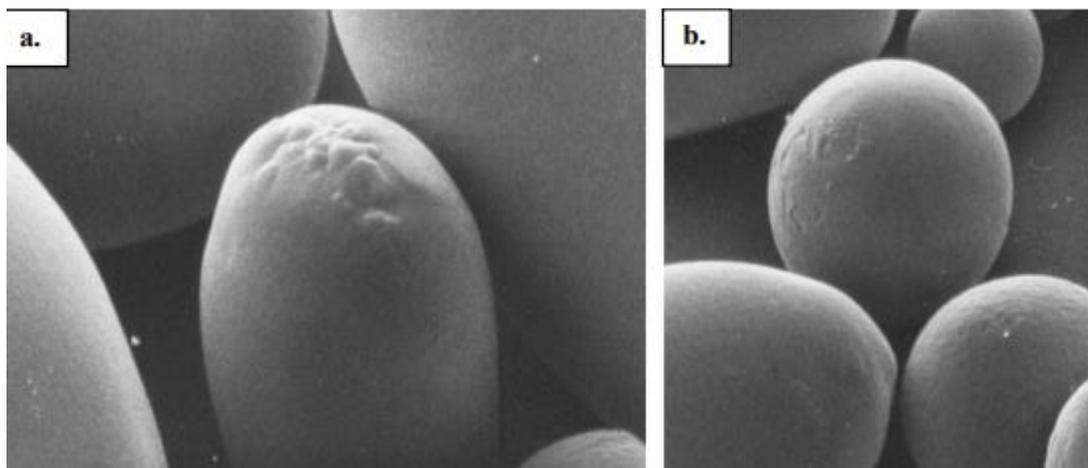
#### 1.3.1 Almidón de papa

El almidón de papa tiene características singulares, tales como un alto contenido de fósforo, alta viscosidad, alto poder de hinchamiento, alta claridad del gel, baja tendencia a la retrogradación, así como gran tamaño de los gránulos. (Peña, 2017)

La alta calidad del almidón de papa se atribuye en parte a su gran tamaño granular, la distribución, el contenido mineral, la relación amilosa/ amilo pectina y alto contenido de ésteres de fosfato de almidón. (Peña, 2017)

El almidón se organiza en partículas discretas, gránulos cuyo tamaño, forma, morfología, composición y estructura supramolecular depende de la fuente botánica. Los gránulos de almidón tienen un aspecto característico, de modo que se puede identificar su origen con la ayuda del microscopio. El tamaño varía, desde los gránulos minúsculos de arroz y avena a los grandes de la papa y plátano. Y las formas pueden ser regulares (por ejemplo, esférica, ovoide o angulares) o bastante irregular como tal. (Peña, 2017)

Para el almidón de papa, en promedio el tamaño del gránulo varía de 1 a 20  $\mu\text{m}$  para los pequeños, y de 20 a 110  $\mu\text{m}$  para gránulos grandes. El grado de variación en la estructura granular de almidones de cultivar a cultivar es bastante alto en las papas, en comparación con otras fuentes botánicas de almidón. Curiosamente, los pequeños gránulos de almidón de papa son esféricos o de forma oval, pero los grandes son generalmente elipsoidales a cúbicas o de forma irregular. (Peña, 2017)



**Figura I-2** Barrido de micrografías electrónicas (SEM). **a)** La presencia de protuberancias en algunos gránulos de almidón de papa. **b)** La fragmentación de la superficie en algunos gránulos de almidón de papa.

**Fuente:** Peña, 2017

### 1.3.2 Composición química del almidón

La composición química de los almidones depende de la fuente botánica, proceso de obtención y purificación, así como de las condiciones de almacenamiento. El contenido de humedad en los gránulos de almidón varía de acuerdo al tipo de almidón va de un 10 a 12% en cereales; de 14 a 19% en almidones de tubérculos y raíces. Además, todos los almidones contienen pequeñas cantidades de proteínas, lípidos, fósforo y trazas de materiales inorgánicos. (Lipa & Maquera, 2013)

El almidón está compuesto esencialmente de polímeros de D-glucosa (98 – 99 %). Químicamente, el almidón o fécula es un polisacárido homogéneo formado por la mezcla de dos polisacáridos diferentes como ser: amilosa y amilopectina, que constituye aproximadamente el 25 % en peso de polímeros de glucosa lineal (amilosa) y el 75 % de polímeros de glucosa ramificada (amilopectina). La amilosa tiene un peso molecular promedio de  $10^5 - 10^6$  g/mol, está construido de unidades de glucosa con enlace  $\alpha$ -1,4. La amilopectina es mucho más grande como tal, tiene un peso molecular de  $10^7 - 10^9$  g/mol; esta molécula de amilopectina tiene una estructura altamente ramificada, debido a que aproximadamente el 5 % de las unidades de glucosa son enlaces  $\alpha$ -1,6. (Rios & Zelada, 2017)

En forma general presentan la composición química siguiente: 0,06 – 0,045 % de proteína, 0,05 – 0,5 % de cenizas y el resto lo forma el almidón. Todos estos constituyentes juegan, en menor o mayor medida, un papel importante en las propiedades funcionales del almidón. (Aguilar, 2007)

De acuerdo al contenido de amilosa, los almidones se pueden clasificar en diferentes grupos como son los almidones cerosos que contienen muy poca cantidad de amilosa, alrededor de 1 %, los normales contienen entre 18 – 30 % de amilosa y los altos en amilosa que contienen 70 % o más de este polímero. (Aguilar, 2007)

### 1.3.3 Estructura química del almidón

El almidón está compuesto esencialmente de D-glucosa, aunque puede contener otros constituyentes en bajos niveles como los lípidos de 0,5 a 1%, bajos niveles de minerales

como fósforo y nitrógeno e inclusive trazas de proteínas, dependiendo de la fuente botánica usada para su extracción.

Químicamente, el almidón está compuesto por dos polímeros: amilosa, un polímero considerado esencialmente lineal, y amilopectina, la cual es altamente ramificada (Hoseney, 1998). Ambos polímeros presentan diferencias en sus propiedades estructurales y funcionales.

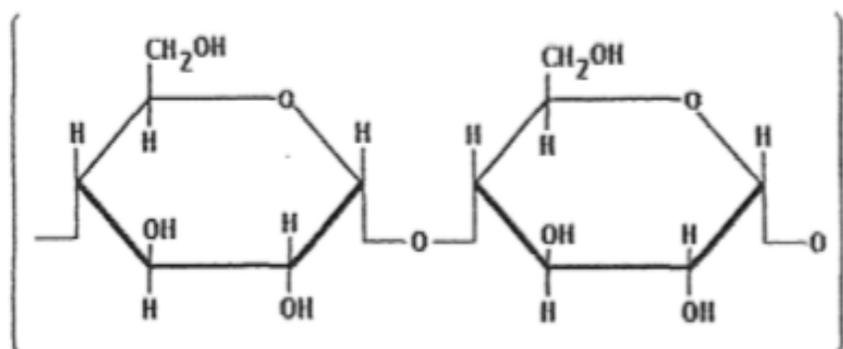
La mayoría de los almidones están compuestos de 25% de amilosa y 75% de amilopectina, sin embargo, en almidones modificados genéticamente la proporción de amilopectina puede alcanzar hasta 99% con bajo contenido de amilosa o denominados cerosos y en almidones de alto contenido de amilosa entre 50 y 70%. (Conde, 2003)

### **1.3.3.1 Amilosa**

La amilosa es considerada como un polímero lineal adquiriendo una forma helicoidal formada por moléculas de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  - (1,4), aunque se ha reportado un bajo grado de ramificación y de cadenas de poca longitud unidas a la cadena central por enlaces  $\alpha$  - (1,6). (Hoseney, 1998)

Las moléculas de amilosa contienen, en promedio de 500 a 6000 unidades de D-glucosa repartidas en un número de cadenas que va de 1 a 20. Cada cadena presenta un grado de polimerización (GP) promedio de 500 siendo GP el número de unidades de glucosa que se encuentran unidas en una cadena. (Mc Allisrer, 1979)

La amilosa es un polímero lineal formado por cadenas de glucosas unidas por enlaces, con peso molecular en el orden de  $10^5$  -  $10^6$  g/mol. Esta molécula no es soluble en agua, pero puede formar micelas hidratadas por su capacidad para enlazar moléculas vecinas por enlaces puentes de hidrógeno y generar una estructura helicoidal, que es capaz de desarrollar un color azul por la formación de un complejo con el yodo. Los almidones con menos contenido de amilosa son más susceptibles a la degradación, mientras que los almidones de camote y papa con alto contenido de amilosa son más resistentes. (Rios & Zelada, 2017)



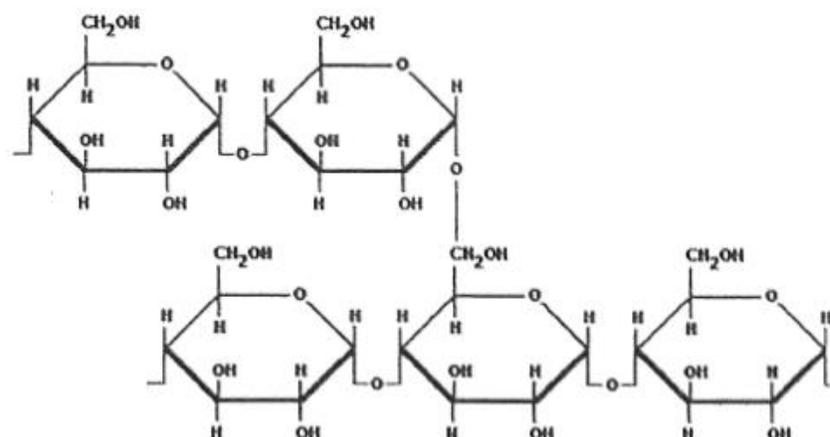
**Figura I-3** Estructura química de la amilosa

**Fuente:** Martínez , 2007

### 1.3.3.2 Amilopectina

La amilopectina es el componente principal en la mayoría de los almidones, alcanzando en ciertos casos niveles de hasta 98-99%. Consiste de unidades de D-glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -(1,4), presentando un grado de ramificación localizadas cada 15 a 25 unidades lineales de glucosa y estas cadenas laterales. (Hoseney, 1998)

La amilopectina es un polisacárido semicristalino, es una molécula de mayor tamaño que la amilosa, su peso molecular se encuentra entre  $10^7$  - $10^9$  g/mol. El peso molecular y el grado de ramificación de la amilopectina varía ampliamente; esta variedad estructural contribuye a las diferencias en las propiedades químicas y físicas del almidón proveniente de diferentes fuentes. El análisis estructural de los gránulos muestra que las cadenas laterales de la amilopectina forman dobles hélices y están arregladas de tal manera que se forman paquetes que contienen entre 9 y 17 cadenas laterales en intervalos regulares de aproximadamente 9-10 nm de largo sobre el eje de la molécula y, dan lugar a las lamelas cristalinas, que se encuentran alternadas con lamelas amorfas formadas por las regiones donde se localizan puntos de ramificación y por los espacios entre los agregados de dobles hélices. (Rios & Zelada, 2017)



**Figura I-4** Estructura química de la Amilopectina.

**Fuente:** Martinez , 2007

### 1.3.4 Características de algunos almidones comunes

El almidón se encuentra en las células vegetales bajo la forma de partículas insolubles o gránulos. El almidón consta de dos tipos de polímeros de la glucosa distintos: la amilosa y la amilopectina los cuales se encuentran en diferentes proporciones, se puede (ver Tabla I-5). (Carrión, 2018)

**Tabla I-5: Características de algunos almidones comunes**

Tipo	Amilopectina %	Amilosa %	Tamaño (micras)
Maíz	73	23	5 – 25
Maíz amiláceo	20 – 45	55 – 80	5 – 25
Papa	78	22	5 – 100
Arroz	83	17	2 – 55
Yuca	82	18	5 – 35
Maíz céreo	99 – 100	0 – 1	5 – 25
Sorgo	99 – 100	0 – 1	5 – 45
Trigo	76	24	11 – 41
Oca	71	29	20 – 29
Mashua	73	27	5 - 10

**Fuente:** Carrión, 2018

### 1.3.5 Diferencias del almidón según su origen

Las fuentes convencionales más importantes para la extracción de almidón son los granos de cereales como maíz, trigo, arroz y sorgo. La tendencia actual es buscar

fuentes no convencionales como alternativas para obtener almidones que amplíen la gama de usos en la industria. Entre las materias primas que pueden ser utilizadas como nuevas fuentes de extracción de este polímero se encuentran los tubérculos como papa, yuca, camote y oca. Además, según estudios realizados, el proceso industrial de obtención de almidón a partir de tubérculos resulta más económico en comparación de aquel obtenido a partir de fuentes convencionales como el maíz o trigo, debido a las menores fuerzas mecánicas que se aplican durante el proceso de extracción y procesamiento de almidón. (Rios & Zelada, 2017)

Los almidones nativos de las diferentes especies vegetales tienen como característica fundamental que sus propiedades fisicoquímicas y funcionales están influenciadas por sus estructuras granular y molecular. Las propiedades más importantes a considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y otras aplicaciones industriales incluyen las fisicoquímicas: gelatinización y retrogradación; y las funcionales: solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico de sus pastas y geles. (Rios & Zelada, 2017)

Respecto a los almidones de yuca, camote y papa, las propiedades de los almidones de estas especies difieren considerablemente, no solo en las proporciones relativas de amilosa y amilopectina, sino también en las características de estas moléculas, en las cantidades de componentes no amiláceas de los gránulos de almidón, tales como lípidos, proteínas y grupos fosfato. (Rios & Zelada, 2017)

La amilopectina en la papa es la única que posee en su molécula grupos éster fosfato, unidos más frecuentemente en una posición O-6, mientras que el tercio restante lo hace en la posición O-3. (Rios & Zelada, 2017)

En la Tabla I-6 se muestra un resumen de las composiciones químicas de algunos almidones comunes.

**Tabla I-6: Composición química de los almidones de yuca, camote y papa**

Componentes	Yuca (%)	Camote (%)	Papa (%)
<b>Humedad</b>	9,48	9,83	19,00
<b>Proteína cruda</b>	0,06	0,22	0,06
<b>Grasa cruda</b>	0,20	0,31	0,05
<b>Fibra cruda</b>	1,01	0,28	NR
<b>Cenizas</b>	0,29	0,26	0,40
<b>ELN (extracto libre nitrógeno)</b>	98,44	98,93	99,49
<b>Amilosa</b>	17,00	19,6	21,00
<b>Amilopectina</b>	83,00	80,4	79,00

Fuente: Rios & Zelada, 2017

A continuación, en la Tabla I-7 se muestra un resumen de algunas características fisicoquímicas de los almidones de yuca, camote y papa, en las cuales se demuestran los diferentes comportamientos de los gránulos de almidón en los diferentes procesamientos industriales.

**Tabla I-7: Características fisicoquímicas de los almidones de yuca, camote y papa**

Tipo de almidón	Poder de humectación (%)	Solubilidad a 95°C (%)	Temperatura de Gelatinización (°C)
<b>Yuca</b>	48	48	52 – 64
<b>Camote</b>	100	82	56 – 69
<b>Papa</b>	85	85	58 – 70

Fuente: Rios & Zelada, 2017

### 1.3.6 Propiedades del Almidón

Las propiedades más importantes a considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y otras aplicaciones industriales incluyen las fisicoquímicas y las funcionales.

#### 1.3.6.1 Propiedades Fisicoquímicas

De las propiedades fisicoquímicas de los almidones, la gelatinización y la viscosidad son dos de las más importantes; debido a que en base a ellas puede determinarse tanto la fuente de almidón como la aplicabilidad industrial del mismo.

### **1.3.6.1.1 Gelatinización**

Es un proceso hidrotérmico de acción irreversible, es decir, el almidón absorbe agua para formar un líquido viscoso y al enfriarse se transforma en gel. Los gránulos de almidón en suspensión acuosa y expuesta a temperaturas mayores de 58 °C se hinchan o pierden su forma (gelatinización). (Carrión, 2018)

Cuando se calienta el almidón en presencia de agua, se produce imbibición, o incorporación de agua en el gránulo. Esto se produce primero en las áreas menos densas y, posteriormente, en las regiones más cristalinas de la molécula de almidón. Esta es una etapa reversible en el proceso de gelatinización. A medida que el calentamiento continúa, los gránulos de almidón captan más agua irreversiblemente y se hinchan; algunas cadenas cortas de amilosa salen de los gránulos. Este proceso endotérmico, llamado gelatinización, es un colapso o interrupción del orden molecular del gránulo de almidón que se manifiesta por cambios irreversibles como la hinchazón granular, la fusión de la zona cristalina nativa, la pérdida de birrefringencia y la solubilización del almidón y es responsable del espesamiento de los sistemas alimenticios. Las soluciones de almidón gelatinizado son opacas y frágiles, y la estructura cristalina y ordenada del almidón se pierde. La gelatinización puede ser sinónimo de formación de un gel, aunque la gelatinización y formación del gel pueden ser consideradas como acontecimientos secuenciales. (Peña, 2017)

El grado de gelatinización es un parámetro importante que se ve afectado por la temperatura, la presión, la concentración de almidón y el tiempo de tratamiento. Aparte de la temperatura, la gelatinización también se inicia por altas presiones hidrostáticas, aunque la degradación de los gránulos sucede de diferente manera, por lo que la viscosidad suele ser menor que después del tratamiento con calor, debido que los gránulos de almidón se mantienen intactos en su mayoría y la amilosa solubiliza pobremente. (Rega, 2016)

### **1.3.6.1.2 Retrogradación**

Después de la gelatinización y tras el enfriamiento, especialmente durante el almacenamiento, la retrogradación se produce como resultado de la reasociación y la cristalización de moléculas de almidón (formación de dobles hélices y cristalitas), principalmente de la amilosa de forma rápida, seguido de una lenta recristalización de las moléculas de amilopectina, y que modifican aún más la estructura del gel; por lo tanto influye en la textura y el tiempo de vida de los productos derivados del almidón gelificado. La retrogradación de la amilosa determina la dureza inicial y la pegajosidad del gel de almidón. El desarrollo, a largo plazo, de la estructura del gel y la cristalinidad del almidón procesado, que están involucrados en el envejecimiento del pan y pasteles, se considera que es debida a la retrogradación de la amilopectina. (Peña, 2017)

La retrogradación del almidón suele ir acompañada de una serie de cambios físicos tales como el aumento de la viscosidad y turbidez de los geles, formación de geles, exudación de agua, precipitación de partículas de almidón insolubles y el incremento del grado de cristalinidad. (Peña, 2017)

### **1.3.6.2 Propiedades Funcionales**

Durante mucho tiempo se ha reconocido que las propiedades funcionales dependen de una serie de factores integrados que incluyen la composición del polímero, la estructura molecular, la organización entre cadenas y constituyentes menores tales como lípidos, grupos fosfato éster (típicas de amilopectina de papa) y proteínas. Como resultado, los almidones de diferentes orígenes botánicos difieren en sus propiedades físicas y funcionales. Además, la modificación química, enzimática y física de almidón, ya sea con la preservación o destrucción del gránulo nativo, amplía las propiedades de funcionalidad. (Peña, 2017)

#### **1.3.6.2.1 Tamaño del gránulo**

El tamaño del gránulo de almidón los grandes tienden a hincharse y absorber más agua, antes que los pequeños. El almidón está organizado en partículas conocidas como

gránulos cuya morfología, composición química y estructura molecular son características de cada especie. Cuando se extraen y se secan los gránulos de almidón tienen la apariencia de polvo blanco. (Carrión, 2018)

El gránulo de almidón consiste generalmente en varias capas, colocadas alrededor de una región central llamada núcleo, el gránulo de almidón puede soportar cierto esfuerzo mecánico y es prácticamente insoluble en agua fría; estos están compuestos por dos polímeros (amilosa y amilopectina) los cuales representan, aproximadamente 98-99% del peso seco. (Carrión, 2018)

La proporción de los dos  $\alpha$ -glucanos (amilasa y amilopectina) en los gránulos de almidón, así como su estructura molecular influyen, en las propiedades de solubilidad, la temperatura de gelatinización, viscosidad, gelificación y retrogradación del almidón y, por tanto, representan los principales parámetros de calidad, textura y estabilidad de los almidones. (Peña, 2017)

En general, el tamaño del granulo del almidón oscila entre menos de 1  $\mu\text{m}$  (0,001mm) a más de 100  $\mu\text{m}$  (0,1 mm); generalmente, el tamaño del gránulo del almidón está referido al diámetro promedio del gránulo de almidón. Los gránulos de almidón tienen un tamaño que oscilan entre 3 y 20  $\mu\text{m}$  (0,003 y 0,02) mm de diámetro para los cereales; para los tubérculos y raíces el tamaño oscila entre 10 y 100  $\mu\text{m}$  (0,01 – 0,1) mm. (Fernandez & Perales, 2008)

#### **1.3.6.2.2 Temperatura y tiempo de calentamiento**

La temperatura final y el tiempo de cocimiento, son factores que condicionan la viscosidad del producto. Ambas cuando más alta es la temperatura de cocimiento, menor será la viscosidad del producto, pues la desintegración del gránulo hinchado será más grande a mayor tiempo de cocimiento por acción de la temperatura y agitación dada. (Vega, 2014)

La temperatura de gelatinización se alcanza dependiendo del origen del almidón, aproximadamente a 58-71 °C. Los almidones de raíces, como la papa y la yuca, los almidones céreos espesan más pronto y a temperaturas más bajas que los almidones de

cereales. También, esta temperatura depende de la cantidad de agua presente, el pH, así como la presencia de sal, azúcar, grasa o proteína. Las modificaciones también pueden influir en la temperatura de gelatinización. Los gránulos de almidón dañados muestran una temperatura de gelatinización, aparentemente menor, porque se hinchan más fácilmente con agua. (Peña, 2017)

Los almidones de arroz (intervalo de gelatinización de 68-77°C), trigo (58- 64°C), papa (58°C) y tapioca (59°C), tienen propiedades viscoamilográficas distintas a la de los almidones de maíz y de sorgo, por lo que ocupan otro lugar específico en el mercado. (Aguilasocho, 2004)

#### **1.3.6.2.3 pH**

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, mientras que en condiciones muy ácidas puede favorecer la hidrólisis del enlace glicosídico del almidón con la consecuente pérdida y a la viscosidad de sus suspensiones. (Vega, 2014)

#### **1.3.6.2.4 Poder de hinchamiento**

El poder de hinchamiento de un almidón es el peso de gránulos dilatados por gramo de almidón seco. (Carrión, 2018)

Un hinchamiento irreversible de los gránulos de almidón ocurre cuando estos son calentados por arriba de su temperatura de gelatinización. Cada granulo sufre este fenómeno de manera diferente, reflejándose así diferencias en la organización molecular dentro del granulo. (Aguilasocho, 2004)

#### **1.3.6.2.5 Sinéresis en refrigeración y congelación**

Cuando un gel de almidón cocido y enfriado se mantiene en reposo, se produce más asociación de tipo cristalino de la amilosa, y se manifiesta claramente la pérdida de

agua del gel y la retracción. Esta agua perdida desde el gel cocido y frío es agua de sinéresis o humedecimiento. Esto ocurre cuando la amilosa sufre retrogradación, cuando el gel se ha formado inapropiadamente, y especialmente cuando el gel se ha expuesto a los efectos de ciclos de congelación-descongelación. A medida que el agua se congela y se descongela, el agua formada por fusión de los cristales de hielo no es capaz de reasociarse con el almidón. Las estructuras de amilosa resultantes son frágiles, perdiendo fácilmente el agua atrapada. Por tanto, en productos comerciales para controlar este efecto indeseable se usan almidones modificados o almidones que contienen sólo amilopectina no gelificante. (Peña, 2017)

### **1.3.7 Temperatura de gelatinización de almidones de tubérculos**

Los almidones nativos de las diferentes especies de vegetales tienen como característica fundamental que sus propiedades fisicoquímicas y funcionales estarán influenciadas por sus estructuras granular y molecular. Las propiedades más importantes a considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y otras aplicaciones industriales incluyen las fisicoquímicas: gelatinización y retrogradación; y las funcionales: solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico de sus pastas y geles en general. (Hernández, Torruco, Chel, & Betancur, 2008)

Los gránulos de almidón se encuentran en un sistema polimérico semicristalino, donde la cristalinidad varía de 15 a 45%, y es atribuida a las cadenas cortas lineales de la amilopectina, que forman dobles hélices organizadas en una estructura cristalina tridimensional. Durante el proceso de gelatinización, el orden molecular dentro de los gránulos es destruido gradual e irreversiblemente a su estado natural, por esto la temperatura de gelatinización es característica para cada tipo de almidón y depende fundamentalmente de la transición vítrea de la fracción amorfa del almidón a trabajar. (Hernández, Torruco, Chel, & Betancur, 2008)

En la Tabla I-8, se observan las temperaturas de gelatinización, la temperatura inicial ( $T_i$ ), temperatura pico ( $T_p$ ), y la temperatura final ( $T_f$ ), realizado en un trabajo de

investigación caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. (Hernández, Torruco, Chel, & Betancur, 2008)

**Tabla I-8: Temperatura de gelatinización de distintos almidones**

<b>Almidones</b>	<b>T<sub>i</sub> (°C) (Temperatura de inicial)</b>	<b>T<sub>p</sub> (°C) (Temperatura de pico)</b>	<b>T<sub>f</sub> (°C) (Temperatura de final)</b>
<b>Macal</b>	72,5	78,4	84,0
<b>Camote</b>	55,2	61,3	68,2
<b>Yuca</b>	57,8	65,2	75,3
<b>Sagú</b>	62,2	74,9	89,2
<b>Maíz</b>	62,3	66,3	72,9
<b>Papa</b>	60	69	80

**Fuente:** Hernández, Torruco, Chel, & Betancur, 2008

#### **1.4 Hidrólisis del almidón**

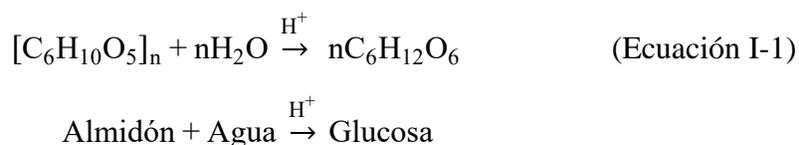
Se conoce como hidrólisis del almidón a la transformación del mismo en compuestos más livianos como los azúcares. (Rios & Zelada, 2017)

Industrialmente la hidrólisis se realiza por métodos enzimáticos o con soluciones de ácidos, tales como ácido clorhídrico o sulfúrico; y se aplica calor para facilitar el rompimiento de los enlaces glucosídicos. (Rios & Zelada, 2017)

Un factor que afecta el grado de hidrólisis de los diferentes tipos de almidones es el tamaño promedio de los gránulos de almidón. Se ha comprobado que los gránulos de menor tamaño se hidratan con mayor rapidez que los gránulos de mayor tamaño, ya que estos presentan una mayor superficie de contacto relativa. Otros factores que influyen en el grado de hidrólisis son la cantidad de lípidos y su interacción con las moléculas de amilosa, extensión e interacción de las cadenas de almidón, así como el contenido de fósforo. Se ha observado también una fuerte resistencia a la hidrólisis por parte del complejo amilosa lípidos. (Rios & Zelada, 2017)

### 1.4.1 Hidrólisis ácida del almidón

En 1811, Kirchoff fue el primero en obtener un subtítulo del azúcar a través de la hidrólisis ácida del almidón. Desde entonces, este proceso ha sido modificado y mejorado para producir jarabes, glucosa cristalizada y otros productos de gran valor comercial. (Rios & Zelada, 2017). La reacción química de este proceso se representa en la ecuación I-1:



El almidón sometido a hidrólisis ácida, ya sea con ácido clorhídrico (comúnmente utilizado) o ácido sulfúrico, sufre una serie de modificaciones, en donde las regiones amorfas asociadas con moléculas de amilopectina, son más susceptibles a la degradación que las regiones cristalinas. (Rios & Zelada, 2017)

Los enlaces  $\alpha$ -D-1,4, tanto de la amilosa como de la amilopectina, son menos estables al ataque del ácido que los enlaces  $\alpha$ -D-1,6. El rompimiento de los enlaces no ocurre al azar, al realizar la hidrólisis ácida, el primer producto en aparecer es la D-glucosa, seguida de disacáridos y trisacáridos. (Rios & Zelada, 2017)

Esto se debe a que los enlaces terminales de las moléculas son rápidamente hidrolizados, y por tanto aparece inicialmente la glucosa. El porcentaje de degradación depende de la concentración del ácido, de la temperatura y del tiempo de hidrólisis. Los ácidos más utilizados para la producción de dextrinas son el ácido clorhídrico, el ácido nítrico y el ácido sulfúrico. (Rios & Zelada, 2017)

La hidrólisis ácida del almidón a glucosa, es una técnica que tiene muchas desventajas, tales como: formación de productos no deseables, flexibilidad muy pobre (el producto final sólo se puede modificar cambiando el grado de hidrólisis), por último, es necesario que el equipo resista al ácido, y a las altas temperaturas requeridas durante este proceso. (Rios & Zelada, 2017)

Dentro de los productos de degradación, además de la glucosa; se tiene hidroximetilfurfural, ácido levulónico y ácido fórmico, que le da al jarabe un sabor amargo. (Rios & Zelada, 2017)

#### **1.4.2 Hidrólisis enzimática del almidón**

Es la hidrolisis que se produce mediante un grupo de enzimas llamadas hidrolasas. Estas enzimas ejercen un efecto catalítico hidrolizante, es decir, producen la ruptura de enlaces por agua según la ecuación I-2:



En algunos casos este grupo puede ser transferido por la enzima a otras moléculas y se considera la hidrólisis misma como una transferencia del grupo al agua. (Garena, 2013)

Para la hidrólisis del almidón se usa la  $\alpha$ -amilasa lo que le hace ideal para la etapa de la hidrólisis de la suspensión del almidón que tienen que ser llevada a la temperatura de (70 - 90) °C para el rompimiento de estos gránulos de almidón provenientes de un tubérculo. (Anaya & Mantero, 2019)

Los productos obtenidos de cultivos de hongos o bacterias, bajo un ambiente de almidón denominados enzimas amilasas, catalizan la ruptura de enlaces  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6. Los pasos o etapas para la hidrólisis del almidón son: gelatinización, licuefacción y sacarificación. Para las dos últimas etapas es necesario usar una enzima específica que se encarga de las rupturas parciales y totales de los enlaces involucrados en la cadena de almidón. (Rios & Zelada, 2017)

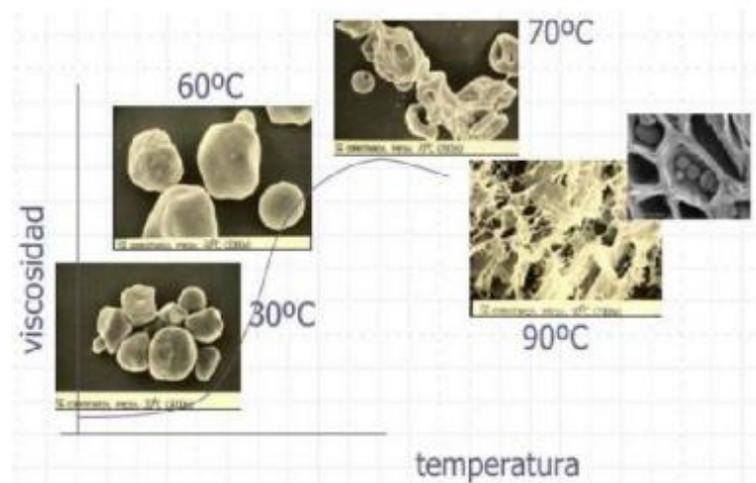
A continuación, se presenta el proceso de hidrolisis enzimática del almidón:

##### **1.4.2.1 Gelatinización**

La gelatinización del almidón es el colapso (ruptura) del orden molecular, manifestado por cambios irreversibles del gránulo de almidón en las propiedades tales como la fusión de las zonas cristalinas del gránulo, pérdida de birrefringencia (se pierde el alto grado de orden molecular dentro del gránulo) y solubilización de las moléculas que conforman el almidón. (Rios & Zelada, 2017)

Estos cambios se observan luego de que el gránulo de almidón, al entrar en contacto con el agua fría, se hidrata; y al aplicarle calor, el gránulo empieza a hincharse, hasta que en cierta temperatura la estructura del gránulo se altera, perdiendo birrefringencia. La amilosa difunde hacia el agua y la amilopectina queda dentro del gránulo, hasta que se pierde su estructura. Las moléculas de amilosa en el almidón contribuyen a la viscosidad (ver Figura I-5). (Rios & Zelada, 2017)

El grado de gelatinización es un parámetro importante que se ve afectado por la temperatura, la presión, la concentración de almidón y el tiempo de tratamiento. La viscosidad suele ser menor después del tratamiento con calor, debido a que los gránulos de almidón se mantienen intactos en su mayoría, y la amilosa solubiliza pobremente. (Rios & Zelada, 2017)



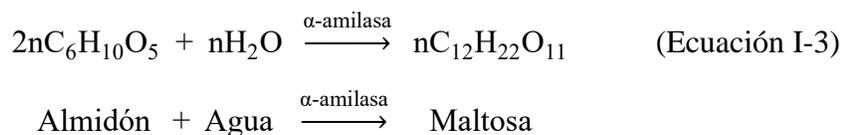
**Figura I-5** Cinética de la verificación de la gelatinización del almidón.  
**Fuente:** Rios & Zelada, 2017

#### 1.4.2.2 Licuefacción

Es el primer paso en la producción de glucosa, en este la alta concentración de almidón, hasta 45% es calentada para gelatinizarlo. Se efectúa por medio de la actividad de una enzima  $\alpha$ -amilasa, las hay de distintos orígenes y con distinta tolerancia a la temperatura. En la licuefacción se remite a bajar la viscosidad de la pasta obtenida, esta etapa es crítica puesto que, si la pasta de elevada viscosidad se enfría, se produce una cristalización de la amilosa, la que se torna insoluble (almidón retrogrado). La

amilosa en estas condiciones constituye una pérdida ya que no es hidrolizada por las enzimas. (Zambrano, 2013)

La reacción que ocurre en esta etapa es la siguiente:



La  $\alpha$ -amilasa es una endoenzima, específicamente una endohidrolasa que corta en forma al azar el almidón en los enlaces  $\alpha$ -1,4, tanto de amilosa como de la amilopectina con lo cual producen dextrinas de 10 a 20 unidades de glucosa; se le da el nombre de enzima licuante debido a que su presencia provoca la rápida reducción de la viscosidad de las soluciones de almidón. Su accionar degrada la amilosa en maltosa y pequeños compuestos de glucosa, transformando así una sustancia inicialmente viscosa (almidón) en una sustancia dulce y menos viscosa debido a los productos formados. Sin embargo, esta enzima solo es capaz de degradar parcialmente la amilopectina debido a que no es capaz de desdoblar los enlaces glicosídicos 1-6 encontrados en los puntos de ramificación de la cadena del polisacárido. (Zambrano, 2013)

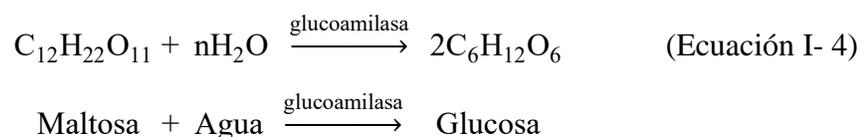
Para la hidrólisis en la etapa de licuefacción, se usa la enzima  $\alpha$ -amilasa lo que le hace ideal para la primera etapa de la hidrólisis de la suspensión del almidón que tienen que ser llevadas a las temperaturas de (70 - 90) °C para el rompimiento de estos gránulos de almidón provenientes de un tubérculo y un pH de (5 – 6,5). (Huayta, 2016)

El almidón previamente gelatinizado se somete al proceso de licuefacción con la enzima  $\alpha$ -amilasa. Se ajusta la temperatura de 70 °C y el pH a 6,0 utilizando una solución de ácido cítrico, luego se adicionó la enzima  $\alpha$ -amilasa para obtener una relación enzima/sustrato. Se adicionó de cloruro de calcio y se dejó reaccionar durante 60 - 120 minutos en el agitador orbital. (Rios & Zelada, 2017)

### 1.4.2.3 Sacarificación

Los procesos enzimáticos para la producción de glucosa requieren de una segunda etapa después de la licuefacción del almidón. Esta etapa se efectúa por medio de una

enzima que actúa frente a cualquiera de los dos tipos de enlaces presentes, conocida como amiloglucosidasa o glucoamilasa. Esta enzima es producida por numerosos tipos de hongos y algunas bacterias. (Cueva & Pazos , 2015)



La glucoamilasa también llamada amiloglucosidasa, es una de las enzimas producidas en mayor cantidad por la industria biotecnológica. Se emplea en el procesado del almidón degradándolo y liberando residuos de glucosa al medio. Es una exoenzima, específicamente una exohidrolasa ya que actúa sobre el terminal de la molécula produciendo cada vez una molécula de glucosa; su nombre sistemático es el siguiente 1,4- $\alpha$ -D-glucano glucohidrolasa. (Cueva & Pazos , 2015)

La amiloglucosidasa ( $\alpha$ -1,4-D-glucano glucohidrolasa) es una exohidrolasa también conocida como glucoamilasa, que hidroliza los enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6 de la amilosa y la amilopectina, separando unidades de glucosa a partir del extremo no reductor de la cadena. Debido al bajo grado de especificidad de esta enzima, puede ser usada para catalizar la hidrólisis de los enlaces  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6 glucosídicos. La velocidad de hidrólisis del almidón catalizado por esta enzima, se incrementa en proporción directa con el peso molecular del sustrato. (Rios & Zelada, 2017)

Según (Fernandez & Perales, 2008), mencionan que las temperaturas de hidrólisis enzimática para obtener glucosa en el proceso de sacarificación, está comprendida entre los intervalos de (40°C - 60°C) y un pH del proceso de (4,0 – 5,5).

### 1.4.3 Enzimas

El proceso de conversión de almidón gelatinizado a un jarabe glucosado generalmente está representado en 2 etapas: licuefacción y sacarificación. La licuefacción se presenta cuando se emplea la enzima  $\alpha$ -amilasa (durante o después de gelatinizar el almidón), cortando las cadenas de los polímeros amilosa y amilopectina en cadenas de tamaño regular, dando como resultado dextrinas, maltosa, maltotriosa y maltopentosa. Para la producción de glucosa, se requiere de una segunda etapa consecutiva a la licuefacción

denominada sacarificación, adicionando la enzima amiloglucosidasa (AMG) dando como principal producto la glucosa.

#### **1.4.3.1 Alfa-amilasa o ( $\alpha$ -amilasa)**

La alfa-amilasa o  $\alpha$ -amilasa, también conocida como  $\alpha$ -1,4 glucanohidrolasa; es una glucanasa endoactiva que catalizan la hidrólisis al azar de los enlaces  $\alpha$ -(1,4) glicosídicos de la región central de las cadenas de amilosa y amilopectina excepto en las proximidades de los puntos de ramificación. La velocidad de hidrólisis es más lenta en los enlaces cercanos a los puntos de ramificación. La hidrólisis de la amilopectina por esta enzima produce glucosa, maltosa y una serie de dextrinas que contienen enlaces ramificados conformados por 4 o más residuos de moléculas de glucosa que presentan enlaces  $\alpha$ -1,6 provenientes de las uniones glucosídicas de la estructura original. Los productos obtenidos en mayor concentración son maltosa, maltotriosa y maltopentosa, hidrolizando completamente la maltohexosa. (Cruz, 2012)

Para la hidrólisis del almidón se usa la  $\alpha$ -amilasa lo que le hace idea para la primera etapa de la hidrólisis de la suspensión del almidón que tienen que ser llevadas a la temperatura de (70 - 90) °C para el rompimiento de estos gránulos de almidón provenientes de un tubérculo. (Huayta, 2016)

#### **1.4.3.2 Glucoamilasa o Amiloglucosidasa (AMG)**

La enzima glucoamilasa tiene la capacidad de hidrolizar tanto los enlaces  $\alpha$  (1 ,4) como los  $\alpha$  (1 ,6) glicosídicos de moléculas de almidón; su acción prolongada puede causar la ruptura total del polisacárido, el principal producto final de la acción de la glucoamilasa sobre el almidón es la glucosa, lo que la diferencia claramente de las  $\alpha$ -amilasa y  $\beta$ -amilasa. Su actividad máxima entre pH 4,0 y 5,5 y temperatura alrededor de 45-65°C. La velocidad de reacción cae rápidamente a medida que disminuye el tamaño de la molécula de sustrato, siendo máxima sobre almidones previamente sometidos a licuefacción. (Zambrano, 2013)

La enzima glucoamilasa tiene una actividad óptima en el rango de pH de 4,0 a 5,0 y muestran una temperatura óptima en el rango de 40 °C a 60 °C, para la obtención de jarabe glucosado por hidrólisis enzimática. (Fernandez & Perales, 2008)

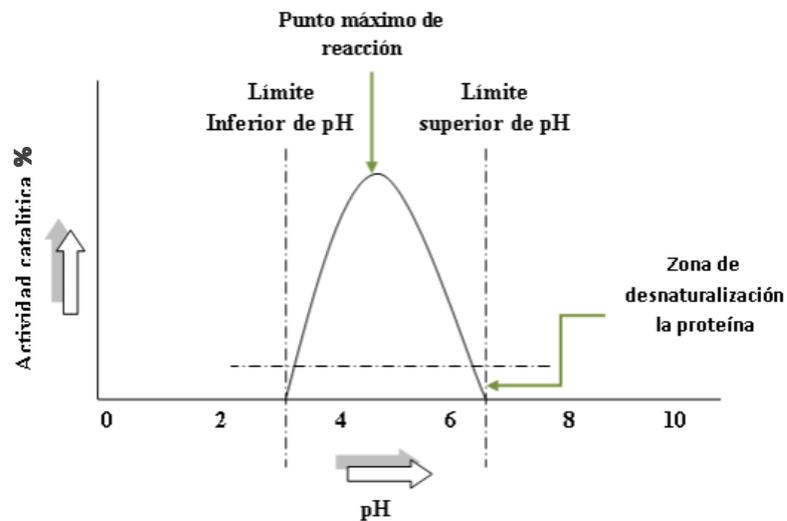
#### **1.4.4 Factores que influyen en la cinética de la hidrólisis enzimática**

La velocidad a la que las reacciones enzimáticas proceden, depende de varios factores; dentro de los que destacan el pH del medio de reacción, la temperatura, la concentración de sustrato y de enzima, entre los más importantes.

##### **1.4.4.1 Efecto del pH**

Todas las enzimas tienen un pH óptimo de actividad o supervivencia el cual se encuentra entre un valor mínimo y máximo (ver Figura I-6), y es altamente dependiente de la temperatura, el sustrato y la concentración de enzimas. El pH es una función logarítmica que representa el cambio de 10 unidades de hidrógeno por cada unidad de pH lo que significa que pequeño cambio puede ocasionar la desnaturalización de la proteína. (Villada, 2010)

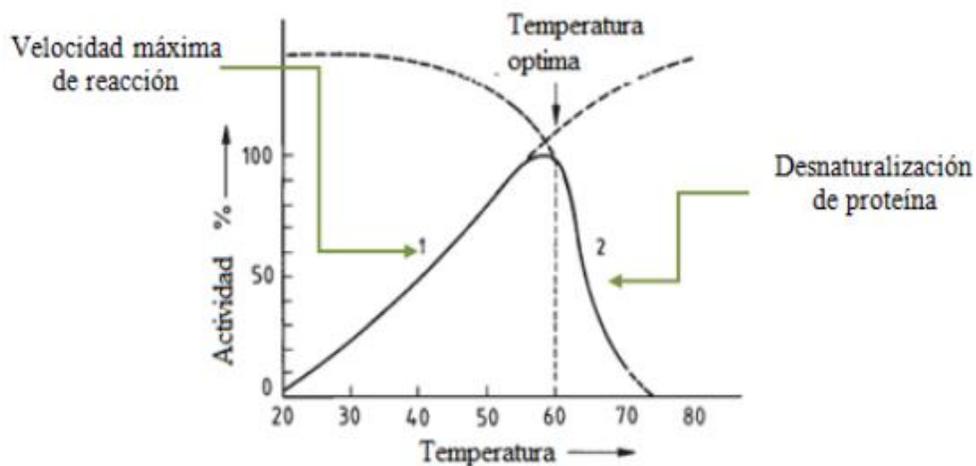
El pH óptimo reportado por (Calcáneo, 1981), para la enzima  $\alpha$ -amilasa es de un pH 6 a 60°C y 7 a una temperatura mayor, es decir su pH depende de la temperatura. La enzima glucoamilasa trabaja óptimamente a un rango pH desde 4,0 a 4,5 y a una temperatura de 40°C a 60°C. En temperaturas altas y tiempos prolongados, pueden favorecer la polimerización de glucosa (producción de azúcares no convenientes en el producto final). (Lipa & Maquera, 2013)



**Figura I-6** Efecto del pH en la cinética de la hidrolisis enzimática.  
**Fuente:** Villada, 2010

#### 1.4.4.2 Efecto de la temperatura

Las reacciones enzimáticas catalíticas obtienen las condiciones óptimas de reacción al encontrar la temperatura más adecuada para llevar a cabo la reacción (ver Figura I-7). La existencia de una dependencia directa entre el incremento termodinámico y la tasa de reacción hasta cierto punto donde la enzima es desnaturalizada. La temperatura óptima de reacción es dependiente del tipo de enzima a usar y el proceso que se pretende utilizar. (Villada, 2010)



**Figura I-7** Temperatura óptima de la actividad enzimática.  
**Fuente:** Villada, 2010

#### **1.4.4.3 Tiempo de reacción sustrato/enzimas**

En el proceso de hidrólisis enzimática, el tiempo que puede llegar a reaccionar el sustrato con las enzimas debe ser muy cuidado debido a que a medida que se aumenta el periodo de reacción, las glucosas pueden volver a integrarse formando otros productos como HMF (Hidroxi Metil Furfural) y furfural, contribuyendo a una próxima fermentación. (Mejia, Martinez, Betancourt, & Castrillon, 2007)

#### **1.4.4.4 Concentración de sustrato**

La cantidad de sustrato utilizado para la reacción catalizada enzimáticamente afecta la naturaleza de la relación enzima-sustrato, afectando las funciones estructurales que los relacionan y confieren las características de selectividad ocasionando una inestabilidad de la enzima. (Lipa & Maquera, 2013)

La concentración de sustrato es uno de los factores más importantes que influyen sobre la velocidad inicial de la reacción. El empleo de elevadas concentraciones tiene dos ventajas inmediatas que a altas velocidades de reacción iniciales y a alta producción de azúcares reductores totales. Pero tiene los inconvenientes que a mayor concentración de sustrato menor es su conversión, puede aparecer inhibición de sustrato y, por tanto, disminución de la velocidad de reacción. (Romero, 2003)

#### **1.4.4.5 Concentración de enzima**

También la reacción enzimática depende de la concentración del enzima. Mientras que el sustrato se encuentre en exceso; la velocidad de reacción es directamente proporcional a la concentración de la enzima. (Lipa & Maquera, 2013)

Tras un período inicial de intensa actividad catalítica, caracterizada por fuertes interacciones enzima-sustrato, alrededor del 20% del enzima se encuentra libre en disolución, pero únicamente el 40% de esta muestra actividad catalítica. El 60% restante, no activo, corresponde a enzimas cuantificables, cara a la concentración en disolución, pero desactivados. Tras este rápido descenso inicial de la concentración libre de enzimas y de la actividad, la cuantificación enzimática permanece

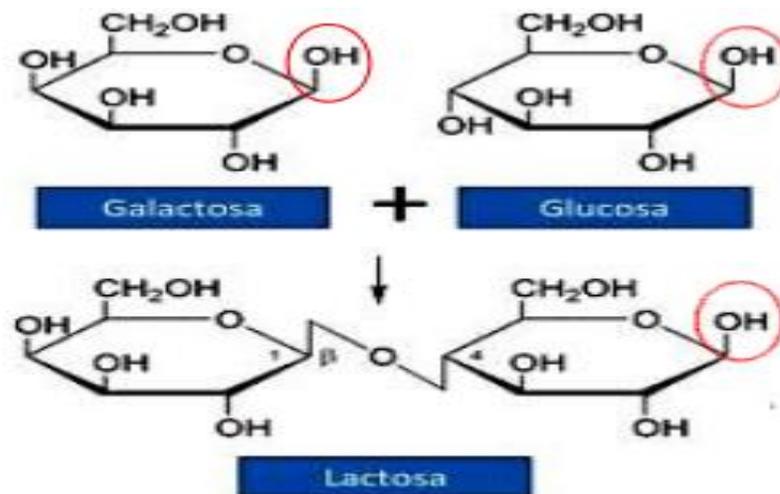
prácticamente constante mientras la actividad catalítica progresivamente va descendiendo. (Romero, 2003)

#### 1.4.5 Análisis fisicoquímico en los jarabes de glucosa

Para la caracterización de un jarabe líquido de glucosa o fructosa se considera que éste debe disponer de azúcares reductores presentes en forma de DE (equivalentes de dextrosa), los cuales ayudan a clasificar a los jarabes dentro de un rango y así direccionar su aplicabilidad en el rubro industrial alimenticio y no alimenticio.

##### 1.4.5.1 Azúcares Reductores

Los azúcares reductores son aquellos azúcares que poseen su grupo carbonilo (grupo funcional), intacto, un grupo hemiacetal (una interacción entre C-2 y C-5,) que le confiere la característica de poder reaccionar con otros compuestos. En solución acuosa, dicho grupo aldehído libre tiene la capacidad de reducción de agentes oxidantes. Las formas cíclicas hemiacetales de los azúcares tiene la potencialidad de generar trazas de la forma abierta (grupos aldehídos libres) como tal (ver Figura I-8). (Garena, 2013)



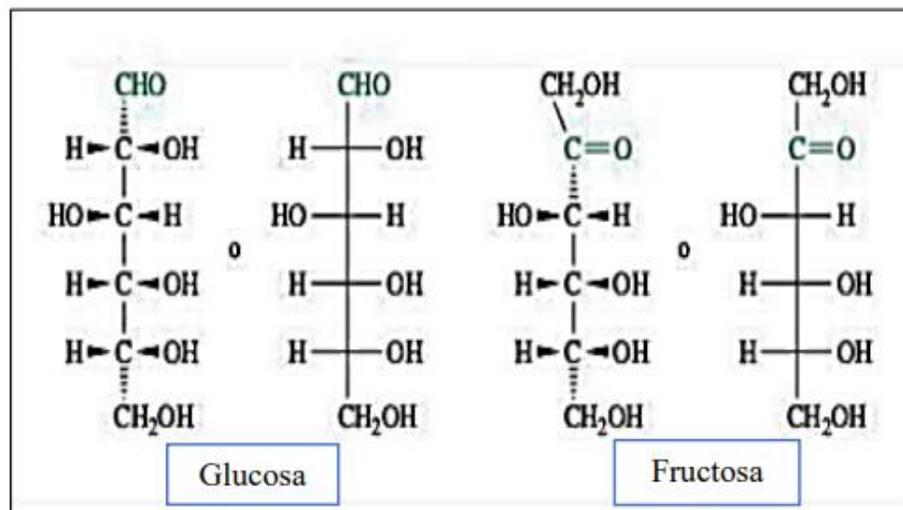
**Figura I-8** Representación de estructura química de azúcares reductores.

**Fuente:** Garena, 2013

Azúcares reductores son aquellos que como la glucosa, fructosa, lactosa y maltosa presentan un carbono libre en su estructura y pueden reducir, en determinadas condiciones, a las sales cúpricas. (Garena, 2013)

La determinación de los azúcares reductores, se obtiene por medio de una curva de calibración, siguiendo el método de Miller o DNS (ácido dinitrosalicílico), reactivo que tiene la capacidad de oxidar a los azúcares reductores, dando resultados colorimétricos, este método emplea 3,5-ácidodinitrosalicílico para la hidrólisis de polisacáridos presentes en una muestra, seguido de la determinación espectrofotométrica a 540 nm de los azúcares reductores. Esta técnica sirve para cuantificar los azúcares reductores producidos durante una fermentación o para cuantificar los productos de una reacción enzimática. (Garena, 2013)

La razón por la cual son llamados grupos reductores se debe a que los monosacáridos como la glucosa y fructosa presentan en su estructura uniones de enlaces glucosídicos, (ver figura I-9). (Jeréz, 2008)



**Figura I-9** Proyección de Fischer de los azúcares reductores.

**Fuente:** Jeréz, 2008

### 1.4.5.2 Grados Brix

Se define como la concentración de sólidos solubles y es una medida de la densidad, así 1°Brix, es la densidad a 20°C, de una solución de sacarosa al 1%. (Rega, 2016)

#### 1.4.5.2.1 Importancia de los ° Brix para evitar la fermentación

En la etapa de concentración de los jarabes es de mucha importancia llegar a los grados Brix adecuados, para evitar la contaminación con levaduras producidas por un

porcentaje de agua muy elevado que hacen que las levaduras se desarrollen naturalmente, se activen y fermenten el jarabe de glucosa. Todos los jarabes tienen levaduras osmofílicas que son tolerantes a soluciones con una concentración relativamente alta de azúcares, esto beneficia al jarabe matando las bacterias por hidrólisis osmótica. (Quitiguiña & Santacruz, 2012)

#### **1.4.6 Normas de calidad de jarabes alimenticios**

Las normas de calidad para un jarabe son muy importantes porque aseguran que el producto tenga una buena calidad y sea apto para el consumo humano. Según investigaciones realizadas se puede evidenciar que hasta la fecha no se realizaron estudios de elaboración de jarabes de glucosa a partir de almidón de papa como tal, por ello no existe una tabla o cuadro donde se haga la comparación respectiva del mismo. Sin embargo, se aprecian normativas para alimentos relacionados a jarabes de glucosa como el que se obtiene en el presente trabajo de investigación, se citan los siguientes:

##### **1.4.6.1 Normativa Boliviana IBNORCA**

En Bolivia existe la normativa NB 38023 establecida por IBNORCA, la cual está encargada de verificar y hacer cumplir las normas establecidas para productos alimenticios (jarabes) destinados a consumo humano. Tales requisitos se realizan en base a la miel comercial.

##### **1.4.6.1.1 Requisitos organolépticos**

**Tabla I-9: Condiciones organolépticas para jarabes según IBNORCA**

<b>Parámetros</b>	<b>Requisitos en base a lo establecido por IBNORCA</b>
<b>Color</b>	Serán variables, desde casi incoloras hasta pardo oscuro, pero debe ser uniforme en todo el volumen del envase que la contenga.
<b>Sabor y aroma</b>	Debe tener sabor y aroma característicos y estar libre de sabores y aromas objetables, absorbidos de materias extrañas durante su elaboración, envasado o almacenamiento.
<b>Consistencia</b>	Debe presentarse como un líquido denso, viscoso y translucido o bien, cristalizado total o parcialmente.

**Fuente:** IBNORCA, 2017

### 1.4.6.1.2 Requisitos fisicoquímicos

**Tabla I-10: Condiciones fisicoquímicas para jarabes según IBNORCA**

Requisito	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Azúcar reductor (calculados como azúcar invertido)	%	65,0	-	NB 38033
Acidez libre	mEq/kg	-	40,0	NB 38026
Densidad relativa a 20 °C	-	1,37	-	NB 38034
pH	-	3,9	-	NB 38028

Fuente: IBNORCA, 2017

### 1.4.6.1.3 Requisitos microbiológicos

**Tabla I-11: Condiciones microbiológicas para jarabes según IBNORCA**

Microorganismo	Unidad	Lotes mayores o iguales a 10 000 kg	Lotes menores a 10 000 kg
Coliformes totales	UFC/g	n=5 c=2 m=10	Máximo: $1 \times 10^4$
Hongos y levaduras	UFC/g	n=5 c=2 m=10	Máximo: $1 \times 10^2$

Fuente: IBNORCA, 2017

La miel, al no tratarse de un jarabe elaborado de un tubérculo o cereal, pero sí perteneciente al rubro de edulcorantes o jarabes de uso alimenticio, serán considerados algunos de los requisitos observados en las tablas (I-9, I-10, I-11) para hacer la comparación con los análisis obtenidos en este trabajo de investigación, para así poder ayudar a caracterizar y clasificar al jarabe de glucosa elaborado a partir de almidón de papa producida en el departamento de Tarija.

### 1.4.6.2 Norma general de jarabes en México

A continuación, la norma mexicana NMX-F169-1984 es aplicable para alimentos para consumo humano, se muestra las especificaciones sensoriales microbiológicas, químicas y físicas de cualquier jarabe elaborado en cualquier industria de México que debe de cumplir en las siguientes tablas:

#### 1.4.6.2.1 Requisitos organolépticos

**Tabla I-12: Especificaciones sensoriales de jarabes en México**

Propiedades	Descripción
Color	Característico
Olor	Característico y libre de olores extraños
Sabor	Dulce, característico y libre de sabores extraños
Consistencia	Fluido viscoso

**Fuente:** Normas Mexicanas, Dirección General de Normas, 2016

#### 1.4.6.2.2 Requisitos fisicoquímicos

**Tabla I-13: Especificaciones químicas y física de los jarabes**

Especificaciones	Unidad	Mínimo	Máximo
Cenizas	%	0	3
pH	-	3	7
Grados Brix	°Brix	59,1	-

**Fuente:** Normas Mexicanas, Dirección General de Normas, 2016

La tabla I-12 y I-13, muestran las normas a las cuales se deben sujetar los productores de cualquier tipo de jarabe.

#### 1.4.6.3 Evaluación sensorial de los alimentos

La evaluación sensorial es una ciencia multidisciplinaria en la que utilizan penalistas humanos para medir, evocar, analizar e interpretar las reacciones a aquellas características de alimentos u otras sustancias, que son percibidas por los sentidos de la vista, gusto, olfato, tacto y oído para medir las características sensoriales y la aceptabilidad de los productos alimenticios. (Quisbert, 2019)

La evaluación sensorial resulta un factor muy importante en estudios sobre los alimentos. Es aplicable a muchos sectores, tales como el desarrollo y mejoramiento del producto, controlado de calidad, estudios sobre almacenamiento, desarrollo y procesos. (Quisbert, 2019)

**CAPÍTULO II**  
**PARTE EXPERIMENTAL**

## 2.1 Caracterización de la materia prima

La papa (*Solanum tuberosum L.*) variedad Desirée producida en el departamento de Tarija, proveniente de la provincia Arce, municipio de Padcaya, comunidad El Salado, la extracción del almidón se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (L. O. U.), es la materia prima utilizada en el presente proyecto de investigación.

Con la finalidad de determinar la caracterización de sus propiedades físicoquímico del almidón de papa, se determinó mediante los métodos y descritos en la Tabla II-1, en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo CEANID, pertenecientes a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

**Tabla II-1: Parámetros y métodos físicoquímico para el análisis del almidón de papa**

Parámetros	Técnica y/o método de ensayo	Normas	Unidad
Azúcares totales	Volumetría	Reducción de Cu	%
Cenizas	Gravimetría	NB 39034:10	%
Fibra	Gravimetría	NB 35004:14	%
Grasa	Gravimetría	NB 35003:14	%
Hidratos de carbono	Cálculo	Cálculo	%
Humedad	Gravimetría	NB 35005: 14	%
Proteína total (N <sub>x6,25</sub> )	Volumetría	NB 35002:14	%
Valor energético	Cálculo	Cálculo	kcal/100 g

**Fuente:** CEANID, 2022

En la Tabla II-2, se muestra los parámetros y métodos, para determinar el análisis microbiológico de la materia prima (almidón de papa), en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo CEANID, perteneciente a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

**Tabla II-2: Parámetros y métodos microbiológico del almidón de papa**

Parámetros	Técnica y/o método de ensayo	Normas	Unidad
Bacterias aerobias mesófilas	Recuento de placa	NB 32003:05	UFC/g
Coliformes totales	Recuento de placa	NB 32005:02	UFC/g
Mohos y levaduras	Recuento de placa	NB 32006:03	UFC/g

Fuente: CEANID, 2022

## 2.2 Caracterización del producto terminado

En la Tabla II-3, se muestran los parámetros y métodos que se utilizó para determinar la composición fisicoquímica del producto terminado (jarabe glucosado). Estos parámetros fueron determinados en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID); pertenecientes a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

**Tabla II-3: Parámetros y métodos fisicoquímico del producto terminado**

Parámetros	Técnica y/o método de ensayo	Normas	Unidad
Cenizas	Gravimetría	NB 38025:06	%
Densidad relativa	Gravimetría	NB 38034:06	-
Fibra	Gravimetría	NB 35004:14	%
Grasa	Gravimetría	NB 35003:14	%
Hidratos de carbono	Cálculo	Cálculo	%
Humedad	Gravimetría	NB 38027:06	%
Proteína total (N <sub>x6,25</sub> )	Volumetría	NB/ISO 8968-1:08	%
Solidos solubles	Refractómetro	NB 36003:02	°Brix
Valor energético	Cálculo	Cálculo	kcal/100 g

Fuente: CEANID, 2022

Con la finalidad de conocer el analisis microbiológico en el producto terminado (jarabe glucosado), se realizaron los parámetros descritos en la Tabla II-4, en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID); pertenecientes a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

**Tabla II-4: Parámetros y métodos microbiológico del producto terminado**

Parámetros	Técnica y/o método de ensayo	Normas	Unidad
Coliformes totales	Recuento de placa	NB 32005:02	UFC/g(ml)
Mohos y levaduras	Recuento de placa	NB 32006:03	UFC/g(ml)

**Fuente:** CEANID, 2022

### 2.3 Selección del método en el proceso de hidrólisis para la obtención de jarabe glucosado a partir del almidón de papa

Para seleccionar el método de obtención de jarabe glucosado a partir del almidón de papa, se consideran dos métodos: hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática. Asimismo, se asigna una calificación de acuerdo a la escala de Likert. En la Tabla II-5, se observan las calificaciones ponderadas que permiten seleccionar el método más adecuado.

**Tabla II-5: Escala de calificación Likert en el proceso de hidrólisis**

Escala de puntuación	Puntuación
Excelente	5
Muy buena	4
Buena	3
Regular	2
Mala	1

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

En la Tabla II-6, se muestra las calificaciones ponderadas, según el peso que se considera adecuado para cada factor evaluado. El factor se determina de acuerdo a las condiciones a desarrollar el proyecto, que permite seleccionar el método más óptimo (con mayor puntaje).

**Tabla II-6: Valores de ponderación para la selección del método de la hidrólisis**

Factor evaluado	Comentarios del evaluador		Calificación	Calificación
	Hidrólisis ácida	Hidrólisis enzimática	Hidrólisis ácida	Hidrólisis enzimática
<b>Aplicabilidad del proceso</b>	En el proceso para la obtención de azúcares reductores. se requiere de temperaturas superiores a los 120 °C. y concentración de pH muy ácidos menores a 3.	Trabaja a temperaturas máximas de 90 °C y pH mínimo de 4,0 y es muy utilizada en las industrias.	3	4
<b>Generación de subproductos y residuos</b>	En el proceso de hidrólisis ácida se tienen, además de la glucosa, hidroximetilfurfural, ácido levulónico y ácido fórmico. Formación de productos no deseables y flexibilidad muy pobre (el producto final sólo se puede modificar cambiando el grado de hidrólisis).	El residuo proveniente de la hidrólisis enzimática, es más limpio por la menor concentración de ácido. Fácil control de la formación de productos no deseables y mayor flexibilidad del producto.	3	4
<b>Costos</b>	Los equipos y reactivos para llevar a cabo la hidrólisis ácida requieren que sean más sofisticados y los reactivos difíciles de conseguir en cantidad, debido al uso limitado de cierta cantidad en el país.	Se cuenta con los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de hidrólisis ya sea en un rotavapor o por medio de un baño maría con agitación y en cuanto a los reactivos no es difícil su adquisición porque se encuentra en venta libre.	3	4
<b>Confiabilidad del proceso</b>	El método de hidrólisis ácida, utiliza ácidos en concentraciones altas no tiene mucha confiabilidad por las desventajas que presentan estos.	Se considera que el método de hidrólisis enzimática proporciona una mejor calidad de azúcares.	3	4
<b>Complejidad de operación del proceso</b>	La operación es simple, flexible y se da en menor tiempo de concentración.	La hidrólisis enzimática requiere de mucho tiempo.	4	4
<b>Influencia de la temperatura</b>	En la hidrólisis ácida trabaja con temperaturas superiores a los 120 °C.	En la hidrólisis enzimática no se requiere temperaturas superiores a los 90 °C, haciendo más fácil es trabajo.	4	5
<b>Facilidad de conseguir el equipo en Laboratorio</b>	Aplica un equipo de concentración con más soporte a corrosiones.	El equipo de laboratorio es de fácil acceso para la realización del proceso.	3	5

Fuente: Elaboración propia, 2022

La Tabla II-7, hace referencia a la calificación obtenida de dos tipos de hidrólisis, representados en una matriz de decisión.

**Tabla II-7: Matriz de decisión para el método (proceso tecnológico) de obtención de jarabe glucosado a partir de almidón de papa**

<b>Selección del método experimental</b>					
<b>Factor evaluado</b>	<b>Valoración porcentual (%)</b>	<b>Hidrólisis ácida</b>		<b>Hidrólisis enzimática</b>	
		<b>Calificación</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Calificación</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Aplicabilidad del proceso</b>	20	3	12	4	16
<b>Generación de subproductos y residuos</b>	10	3	6	4	8
<b>Costos</b>	20	3	12	4	16
<b>Confiabilidad del proceso</b>	20	3	12	4	16
<b>Complejidad de operación del proceso</b>	10	4	8	4	8
<b>Influencia de la temperatura</b>	10	4	8	5	10
<b>Facilidad del conseguir el equipo en Laboratorio</b>	10	3	6	5	10
<b>Total</b>	<b>100</b>		<b>64</b>		<b>84</b>

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

En la Tabla II-7 se observa que el método técnico con mayor puntaje es la hidrólisis enzimática con un valor de 84 de 100 puntos.

## **2.4 Diseño experimental para el proceso de obtención de jarabe glucosado**

### **2.4.1 Diseño factorial en la etapa de sacarificación para el proceso de hidrólisis enzimática**

Para determinar las variables significativas del presente trabajo de investigación, se plantea un diseño factorial con dos niveles y tres factores con dos repeticiones, por tanto, el número de tratamientos son 16, en la etapa de sacarificación.

Según la revisión bibliográfica, en la etapa de sacarificación se utiliza la enzima amiloglicosidasa AMG - glucoamilasa, denominada enzima sacarificante. Dicha enzima hidroliza tanto los enlaces  $\alpha$ -1,4 como  $\alpha$ -1,6 del almidón, por lo tanto, convierte a las dextrinas en glucosa o dextrosa. Se plantea realizar un estudio de las variables que influyen en este proceso como el pH, la temperatura del proceso y la cantidad de enzima glucoamilasa.

Según varios autores mencionan que las mejores temperaturas de hidrólisis enzimática para obtener glucosa en la etapa de sacarificación, está comprendida entre los 40 °C hasta los 60 °C. Además (Estrada , 2017), en su trabajo de investigación de parámetros operativos para la obtención de jarabe de glucosa a partir de almidón de Oca; en el proceso de sacarificación trabajó con valores de pH 6,2 a 7 y rangos de temperatura de 40 a 50 ° C.

Según (Fernandez & Perales, 2008), en su trabajo realizó el proceso de hidrólisis enzimática en la etapa de sacarificación a temperaturas comprendidas entre 50 °C y 70 °C, con un pH de 4,0 y 5,0. Verifica que la enzima glucoamilasa tiene una actividad en el rango de pH de 4,0 a 5,0 y una temperatura en el rango de 50 °C a 60 °C.

El pH de trabajo en procesos de sacarificación está comprendido entre 4,0 a 5,5. Según (Pardo & colaboradores , 2004), en su trabajo de estudio cinético de hidrólisis enzimática de almidón de papa; trabajo con valores de pH de 2,2 a 6,2, donde se comprueba que la enzima trabaja en un rango promedio de 4,0 a 5,5, mientras que la temperatura se mantuvo constante a 60 °C.

En la Tabla II-8, muestra los niveles de variación de los factores en el proceso de hidrólisis enzimática. En vista de la información recabada para el presente trabajo, se fija dos intervalos de temperaturas 45 °C y 60 °C, pH del proceso de sacarificación 4,0 y 5,0, la cantidad de enzima glucoamilasa 0,5 g y 0,7 g (según especificación técnica del proveedor se debe usar 1 gramo/litro).

**Tabla II-8: Niveles de variación de los factores en la etapa de sacarificación del proceso de hidrólisis enzimática**

Nivel	Factor A pH	Factor B Temperatura (°C)	Factor C Cantidad de enzima glucoamilasa (g)
Superior	5,0	60	0,7
Inferior	4,0	45	0,5

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Tomando estos datos como punto de partida se realiza un diseño factorial de  $2^3$  (dos niveles, tres variables).

Donde:

$$N^{\circ} \text{ variables} = 3$$

$$\text{Niveles} = 2$$

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

Como se harán dos repeticiones entonces.

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

Como variable respuesta será la cantidad de azúcares reductores producidos.

La Tabla II-9, muestra el orden de los factores en el diseño experimental en la etapa de sacarificación, para ejecutar el proceso de hidrólisis enzimática dentro del laboratorio de operaciones unitarias.

**Tabla II-9: Matriz de diseño experimental en la etapa de sacarificación del proceso de hidrólisis enzimática**

Muestra	pH	Temperatura (°C)	Cantidad de enzima glucoamilasa (g)	Azúcares reductores (%)
1	-1	-1	-1	X <sub>1</sub>
2	1	-1	-1	X <sub>2</sub>
3	-1	1	-1	X <sub>3</sub>
4	1	1	-1	X <sub>4</sub>
5	-1	-1	1	X <sub>5</sub>
6	1	-1	1	X <sub>6</sub>
7	-1	1	1	X <sub>7</sub>
8	1	1	1	X <sub>8</sub>

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

La Tabla II-10, se muestra la matriz con los datos incluidos el orden de los factores en el diseño experimental para ejecutar el proceso de hidrólisis enzimática dentro del laboratorio de operaciones unitarias.

**Tabla II-10: Matriz con los datos del diseño experimental en la etapa de sacarificación del proceso de hidrólisis enzimática**

Muestra	pH	Temperatura (°C)	Cantidad de enzima glucoamilasa (g)	Azúcares reductores (%)
1	4,0	45	0,5	X <sub>1</sub>
2	5,0	45	0,5	X <sub>2</sub>
3	4,0	60	0,5	X <sub>3</sub>
4	5,0	60	0,5	X <sub>4</sub>
5	4,0	45	0,7	X <sub>5</sub>
6	5,0	45	0,7	X <sub>6</sub>
7	4,0	60	0,7	X <sub>7</sub>
8	5,0	60	0,7	X <sub>8</sub>

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

## 2.5 Procedimientos y técnicas para la obtención de los resultados

### 2.5.1 Equipos, materiales de laboratorio, utensilios e insumos utilizados para obtener jarabe glucosado

Para llevar a cabo la parte experimental del trabajo de investigación, se utilizó los siguientes equipos, materiales, utensilios e insumos:

#### 2.5.1.1 Equipos a utilizar en el proceso de obtención de jarabe glucosado

En la Tabla II-11, se detallan los equipos utilizados en la parte experimental para obtener jarabe glucosado.

**Tabla II-11: Equipos utilizados en el proceso de obtención de jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática a partir de almidón de papa**

Secadora a infrarrojos	
<b>Modelo:</b> MA 100	
<b>Marca:</b> Sartorius	
<b>Capacidad:</b> 1 g – 15 g	
<b>Precisión:</b> 0,01 g	
<b>Descripción:</b> Equipo utilizado para determinar el % de humedad de las muestras de materia prima.	
Evaporador rotativo (Rota-vapor)	
<b>Modelo:</b> LR 4000/1/2/3	
<b>Marca:</b> Heidolph	
<b>Velocidad:</b> 270 rpm	
<b>Tensión:</b> 230/240 V	
<b>Potencia:</b> 0,92 Kw	
<b>Rango de temperatura:</b> 0/180 °C	
<b>Frecuencia:</b> 50 /60 Hz	
<b>Descripción:</b> Equipo utilizado en la etapa de sacarificación y para la separación del líquido sobrante del producto terminado.	

<b>Baño maría</b>	
<b>Modelo:</b> RWR2	
<b>Marca:</b> MLW – VEB MLW LABORTECHNIK ILMENAU/GDR	
<b>Velocidad:</b> 105 W	
<b>Tensión:</b> 220 V	
<b>Frecuencia:</b> 50 Hz	
<b>Descripción:</b> Utilizado para calentar la muestra a hidrolizar.	
<b>Balanza analítica electrónica</b>	
<b>Modelo:</b> EU-C 500	
<b>Marca:</b> GIBERTINI	
<b>Capacidad:</b> 1 g – 510 g	
<b>Precisión:</b> 0,01 g	
<b>Dimensiones:</b> 215×330×95 mm	
<b>Peso:</b> 3 Kg	
<b>Descripción:</b> Equipo utilizado para determinar la masa de la materia prima, insumos y producto terminado.	
<b>Refractómetro digital ABBE</b>	
<b>Modelo:</b> -	
<b>Marca:</b> OPTIC ivymen SYSTEM	
<b>Rango de trabajo:</b>	
<b>Brix:</b> -	
<b>Descripción:</b> Equipo utilizado para determinar los grados brix en el proceso de hidrólisis y del producto final.	

Agitador mecánico	
<b>Modelo:</b> LD – 601	
<b>Marca:</b> MTA-KUTESZ	
<b>Velocidad:</b> 45 W	
<b>Tensión:</b> 220 V	
<b>Frecuencia:</b> 50Hz	
<b>Descripción:</b> Utilizado para agitar la muestra en la etapa de licuefacción en el proceso de hidrólisis enzimática.	
Molino de martillo	
<b>Modelo:</b> S – 500	
<b>Marca:</b> Weber Bros & White Metal Laboratory	
<b>Numero de martillos:</b> 18	
<b>Potencia:</b> 1 Kw	
<b>Velocidad:</b> 9000 rpm	
<b>Descripción:</b> Equipo utilizado para moler el almidón de papa, que tiene la finalidad de reducir el tamaño de partícula.	
Tamiz vibratorio – Rotap de tamices	
<b>Marca:</b> ORTO ARLESA	
<b>Velocidad:</b> 2500 rpm	
<b>Tensión:</b> 230 V	
<b>Potencia:</b> 0,92 Kw	
<b>Intensidad de corriente:</b> 0,4 A	
<b>Frecuencia:</b> 50 Hz	
<b>Descripción:</b> Equipo utilizado para tamizar las partículas de diferente tamaño.	

Secador de tiro forzado	
<b>Modelo:</b> MOD-EL-1.4	
<b>Marca:</b> EUROBRAS	
<b>Potencia:</b> 1100 W	
<b>Volts:</b> 110/220 V	
<b>Descripción:</b> Equipo utilizado para calentar muestras de materia prima, disminuyendo la humedad del mismo.	
Extractor	
<b>Modelo:</b> Oster	
<b>Marca:</b> Oster profesional	
<b>Velocidad:</b> 2 velocidades	
<b>Potencia:</b> 2000 W	
<b>Capacidad de la jarra:</b> 1,2 litros	
<b>Descripción:</b> Equipo utilizado para triturar la papa, con el fin de desintegrar la misma, para liberar los gránulos de almidón contenido.	
Calentador con agitador magnético	
<b>Marca:</b> P SELECTA	
<b>Tensión:</b> 230 V	
<b>Potencia:</b> 640 W	
<b>Intensidad de corriente:</b> 2.7 A	
<b>Frecuencia:</b> 50/60 Hz	
<b>Descripción:</b> Utilizado para calentar y agitar la muestra en el proceso de gelatinización.	

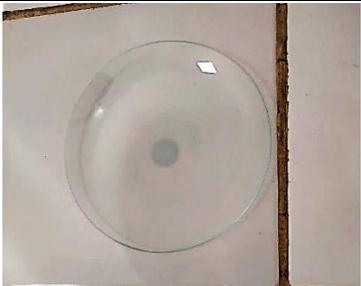
pH – metro digital	
<b>Marca:</b> ATC	
<b>Rango de temperatura:</b> 0 - 50 °C	
<b>Rango de pH:</b> 0 – 14	
<b>Descripción:</b> Utilizado para medir el pH en el proceso de hidrólisis para la obtención de jarabe glucosado.	

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.1.2 Materiales de laboratorio

En la Tabla II-12, se detallan los materiales de laboratorio utilizados en la parte experimental para obtener jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática a partir del almidón de papa.

**Tabla II-12: Materiales de laboratorio**

Vaso de precipitado	
<b>Marca:</b> Sanailab	
<b>Capacidad:</b> 1000 ml	
<b>Calidad:</b> Vidrio	
<b>Cantidad:</b> 1	
<b>Descripción:</b> Utilizado para preparar la solución de almidón en el proceso de hidrólisis para la obtención de jarabe glucosado.	
Vidrió reloj	
<b>Capacidad:</b> Pequeño	
<b>Calidad:</b> Vidrio	
<b>Cantidad:</b> 1	
<b>Descripción:</b> Utilizado para pesar la enzima para el proceso de hidrólisis para la obtención de jarabe glucosado.	

Termómetro	
<b>Escala:</b> -10 – 100 °C	
<b>Calidad:</b> Vidrio	
<b>Largo:</b> 31 cm	
<b>Diámetro:</b> 0,6 cm	
<b>Cantidad:</b> 1	
<b>Descripción:</b> Utilizado para medir la temperatura de la muestra en el proceso de hidrólisis, para la obtención de jarabe glucosado.	
Probeta	
<b>Marca:</b> Sanailab	
<b>Capacidad:</b> 100 ml	
<b>Calidad:</b> Vidrio	
<b>Cantidad:</b> 1	
<b>Descripción:</b> Utilizado para medir el volumen del agua para preparar la solución de almidón.	
Piseta	
<b>Capacidad:</b> 500 ml	
<b>Calidad:</b> PVC	
<b>Cantidad:</b> 1	
<b>Descripción:</b> Utilizado para enjuagar el material de laboratorio, ya sea para disolver o para lavar.	
Espátula	
<b>Capacidad:</b> Pequeña	
<b>Calidad:</b> Acero inoxidable	
<b>Cantidad:</b> 1	
<b>Descripción:</b> Utilizado para transferir y mezclar en el proceso para la obtención de jarabe glucosado.	

<b>Frascos</b>	
<b>Capacidad:</b> 300 ml	
<b>Calidad:</b> Vidrio	
<b>Cantidad:</b> 16	
<b>Descripción:</b> Utilizados para contener las muestras del producto hidrolizado a analizar.	
<b>Papel filtro</b>	
<b>Capacidad:</b> 80 cm x 60 cm	
<b>Calidad:</b> Papel	
<b>Cantidad:</b> 2	
<b>Descripción:</b> Utilizado para filtrar el producto hidrolizado.	
<b>Bolsas herméticas</b>	
<b>Marca:</b> FIVE STICK	
<b>Capacidad:</b> 15 cm x 20 cm	
<b>Calidad:</b> Polietileno (PE)	
<b>Cantidad:</b> 10	
<b>Descripción:</b> Utilizadas para envasar el almidón.	
<b>Papel aluminio</b>	
<b>Marca:</b> ALUMINIUM FOIL	
<b>Capacidad:</b> 30 cm x 5 m	
<b>Calidad:</b> Aluminio	
<b>Cantidad:</b> 3	
<b>Descripción:</b> Utilizado para tapar y ayudar a mantener el calor constante en el equipo del baño maría.	

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.1.3 Utensilios e insumos utilizados en proceso para la obtención de jarabe glucosado

En la Tabla II-13, se detallan los utensilios utilizados en la parte experimental para obtener jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática.

**Tabla II-13: Utensilios utilizados en el proceso de obtención de jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática**

Fuentes / recipientes	
<b>Marca:</b> AZZORTI	
<b>Capacidad:</b> 5000 ml, 3000 ml	
<b>Calidad:</b> Plástico y vidrio	
<b>Cantidad:</b> 2	
<b>Descripción:</b> Utilizados para lavar la papa en el proceso de obtención del almidón.	
Valde	
<b>Marca:</b> SUMAC	
<b>Capacidad:</b> 5000 ml	
<b>Calidad:</b> Plástico	
<b>Cantidad:</b> 1	
<b>Descripción:</b> Utilizado para el lavado y sedimentado del almidón.	
Cuchillo	
<b>Marca:</b> TRAMONTINA	
<b>Capacidad:</b> Mediano	
<b>Calidad:</b> Acero inoxidable	
<b>Cantidad:</b> 1	
<b>Descripción:</b> Utilizado para pelar la papa en el proceso de obtención de almidón.	

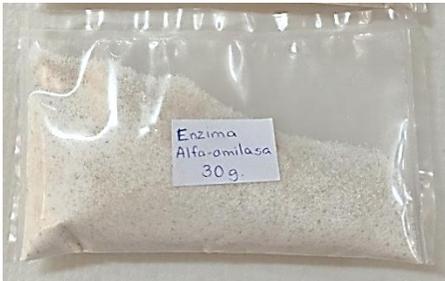
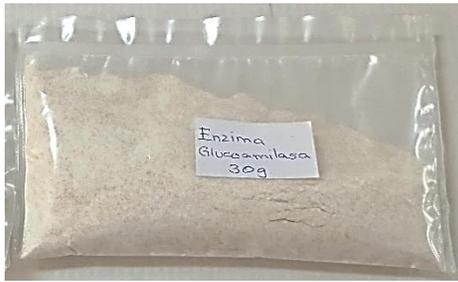
<b>Jarra graduada</b>	
<b>Marca:</b> Poliform Ltda.	
<b>Capacidad:</b> 1000 ml	
<b>Calidad:</b> Plástico	
<b>Cantidad:</b> 1	
<b>Descripción:</b> Utilizada para medir el volumen de agua.	
<b>Coladores</b>	
<b>Diámetro 1:</b> 20 cm	
<b>Profundidad 1:</b> 5 cm	
<b>Diámetro 2:</b> 10 cm	
<b>Profundidad 2:</b> 2,5 cm	
<b>Calidad:</b> Acero inoxidable y Plástico	
<b>Cantidad:</b> 2	
<b>Descripción:</b> Utilizados para filtrar en el proceso de obtención del almidón y para filtrar el producto hidrolizado, para pasar a concentrar el producto final.	

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

En la tabla II-14, se detallan los insumos utilizados en la parte experimental para obtener jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática.

**Tabla II-14: Insumos utilizados en el proceso de obtención de jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática**

<b>Ácido cítrico</b>	
<b>Estado:</b> Sólido	
<b>Apariencia:</b> Granulado blanquecino.	
<b>Marca:</b> CARGIL - Industria Colombiana.	
<b>Descripción:</b> Utilizado para evitar la oxidación de la papa pelada y también se usó para regular el pH en el proceso de hidrólisis.	

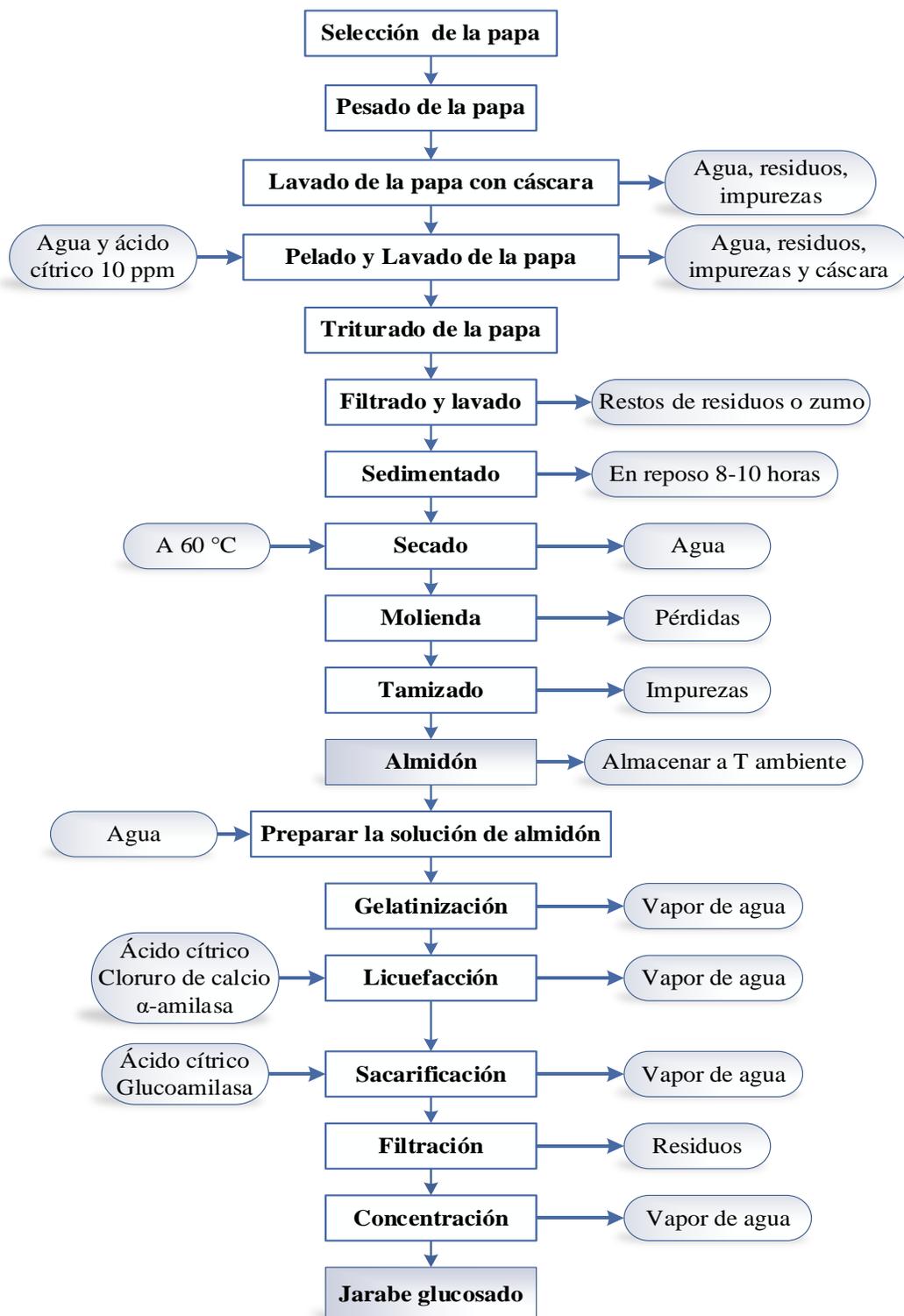
<b>Cloruro de calcio</b>	
<b>Estado:</b> Sólido	
<b>Apariencia:</b> Granulado blanquecino, libre de olores.	
<b>Marca:</b> CARGIL - Industria Colombiana.	
<b>Descripción:</b> Utilizado como estabilizante y activado de la enzima $\alpha$ -amilasa en la etapa de licuefacción en el proceso de hidrólisis.	
<b>Enzima <math>\alpha</math>-amilasa</b>	
<b>Estado:</b> Sólido	
<b>Apariencia:</b> Polvo, libre de olores.	
<b>Marca:</b> Línea AEB - Industria Francesa	
<b>Descripción:</b> Utilizado en la etapa de licuefacción actúa como catalizador, convierte los gránulos de almidón en dextrinas en el proceso de hidrólisis.	
<b>Enzima glucoamilasa</b>	
<b>Estado:</b> Sólido	
<b>Apariencia:</b> Polvo, libre de olores.	
<b>Marca:</b> Línea AEB - Industria Francesa	
<b>Descripción:</b> Utilizado en la etapa de sacarificación es posible la conversión de dextrinas a glucosa, en el proceso de hidrólisis.	
<b>Lugol</b>	
<b>Estado:</b> Líquido	
<b>Apariencia:</b> Líquido violeta.	
<b>Marca:</b> Industria Argentina	
<b>Descripción:</b> Utilizado como indicador en la prueba de yodo en la etapa de licuefacción, en el proceso de hidrólisis.	

<b>Agua destilada</b>	
<b>Estado:</b> Líquido	
<b>Apariencia:</b> Líquido incoloro, libre de olores.	
<b>Marca:</b> Industria Nacional	
<b>Descripción:</b> Utilizado para lavar el material de laboratorio, en el proceso de hidrólisis.	

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### **2.5.2 Proceso para la obtención de jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática a partir de almidón de papa**

A continuación, en la Figura II-1 se muestra el diagrama de flujo para la obtención de jarabe glucosado a partir de almidón de papa.



**Figura II-1** Diagrama de bloques del proceso experimental para obtener jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática de la papa.

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### **2.5.3 Descripción del proceso para obtener jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática a partir de almidón de papa**

Para realizar el trabajo es importante establecer, las operaciones involucradas para obtener jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática a partir de almidón de papa, se describen a continuación:

#### **2.5.3.1 Selección de la materia prima (papa)**

La materia prima adquirida proviene de la comunidad El Salado, municipio Padcaya, provincia Arce, Departamento de Tarija. En esta parte del proceso, se tomó en cuenta el estado de la papa, sin perforaciones, presencia de muestras extrañas y deben ser conservadas a temperatura ambiente para su posterior tratamiento (ver la Figura II-2).



**Figura II-2** Selección de la papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

#### **2.5.3.2 Pesado de la papa**

Después de la selección de la materia prima, estas deben ser pesadas para cuantificar el uso de la misma (ver la Figura II-3).



**Figura II-3** Pesado de la papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.3 Lavado de la papa con cáscara

El lavado de la papa con cáscara se realiza haciendo uso de una esponja para eliminar la tierra y las impurezas adheridas a la superficie de la papa (ver la Figura II-4).



**Figura II-4** Lavado de la papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.4 Pelado y lavado de la papa

Posteriormente se procede al pelado de la papa que consiste en el retiro de la cáscara de la papa de forma manual, haciendo uso de un cuchillo de acero inoxidable, seguidamente se lavó la papa y se coloca en inmersión con una solución de ácido cítrico en una concentración de 10 ppm para evitar la oxidación (ver la Figura II-5).



**Figura II-5** Pelado de la papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.5 Triturado de la papa

Se realizó el triturado en una extractora con el fin de desintegrar la papa, para liberar los gránulos de almidón contenido (ver la Figura II-6).



**Figura II-6** Triturado de la papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.6 Filtrado y lavado del zumo de papa

En esta etapa se realizó la separación del almidón, se pasó por un filtro de mallas evitando que queden fibra del zumo u otros residuos.

Posteriormente se procedió a lavar el almidón con agua a 10 °C debido a que el almidón en agua fría es insoluble y facilita la sedimentación. Dejando reposar por 60 minutos luego se eliminó toda el agua superficial. Se repite el proceso dos veces más para eliminar la fibra y otras impurezas (ver la Figura II-7).

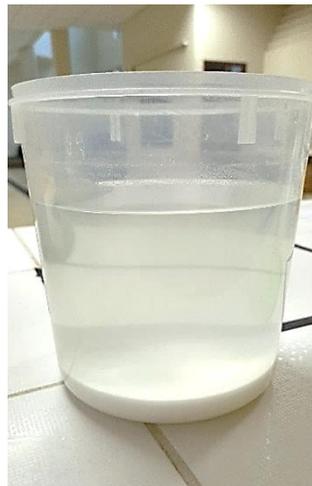
**Lavado 1****Lavado 2****Lavado 3**

**Figura II-7** Proceso de lavado de almidón de papa

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.7 Sedimentado del almidón

En la Figura II-8, se observa el sedimentado, almacenando el zumo en un recipiente. Este proceso se demora entre 8 a 10 horas para la sedimentación del almidón, luego se hizo una decantación separación solido-líquido.



**Figura II-8** Sedimentación del almidón de papa

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.8 Secado del almidón

Se procedió a secar el sedimentado en el secador tiro forzado de bandejas durante un periodo de 8 horas, a una temperatura constante de 60 °C. Se procede a introducir las muestras en bandejas de papel aluminio, sobre la bandeja de malla milimétrica que se encuentran dentro de la cámara de secado (ver la Figura II-9).



**Figura II-9** Secado del almidón de papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.9 Molienda del almidón

El almidón seco proveniente de la etapa de secado, con un contenido de humedad del 5,56 %, el almidón tiende a cohesionarse formando agregados que se llevó a molienda en un molino de martillos, con la finalidad de tener un menor tamaño de partícula, pasando a la etapa de tamizado (ver la Figura II-10).



**Figura II-10** Molienda del almidón de papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.10 Tamizado de almidón

Se realizó el tamizado con la finalidad de usar un solo tamaño de partícula, para que esta tenga una mayor superficie de contacto y favorecer en el rendimiento de azúcares reductores en la etapa de hidrólisis enzimática. Una vez terminado la molienda, se procede a tamizar la muestra obtenida de almidón seco molido, en el rotap vibratorio eléctrico que tiene abertura de malla de 0,5 mm, 0,25 mm y 0,063 mm en la serie de Tyler, el tiempo utilizado para realizar la etapa de tamizado fue de 10 minutos y una velocidad de 4000 rpm (ver la Figura II-11). El tamaño de partícula usado en el proceso de hidrolisis es de 0,063 mm.

Según (Fernandez & Perales, 2008) en general, el tamaño del granulo del almidón oscila entre menos de 1  $\mu\text{m}$  (0,001mm) a más de 100  $\mu\text{m}$  (0,1 mm); generalmente, el tamaño del gránulo del almidón está referido al diámetro promedio del gránulo de almidón. Los gránulos de almidón tienen un tamaño que oscilan entre 3 y 20  $\mu\text{m}$  (0,003 y 0,02) mm de diámetro para los cereales; para los tubérculos y raíces el tamaño oscila entre 10 y 100  $\mu\text{m}$  (0,01 – 0,1) mm.



**Figura II-11** Tamizado del almidón de papa seco molido  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.11 Almidón obtenido

En la Figura II-12 se observa el almidón seco obtenido de la etapa de tamizado de tamaño de 0,063 mm, el tamaño del granulo de almidón está dentro de los intervalos de referencia (0,01 - 0,1) mm, y paso posteriormente a ser envasado en una bolsa hermética para ser almacenado.



**Figura II-12** Almidón de papa obtenido  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.12 Preparar la solución

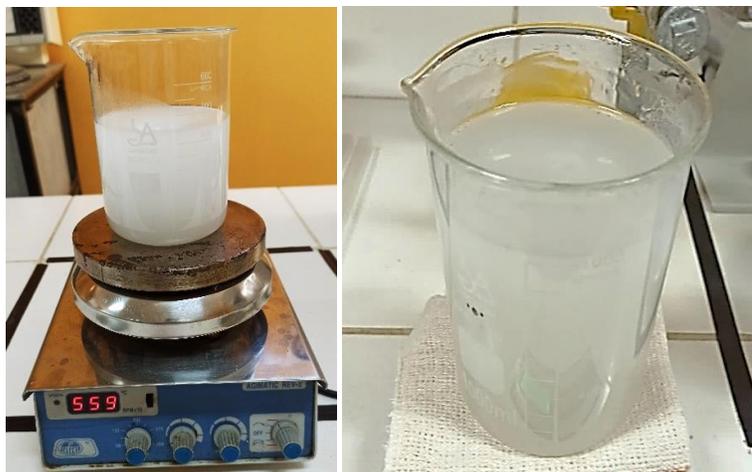
En la etapa de preparación de la solución, se trabajó en una relación del 4,76 % de almidón seco. En la balanza digital, se efectuó el peso de 25 gramos de almidón de papa y se prepara la solución en 499,1 gramos de agua (ver la Figura II-13).



**Figura II-13** Dilución del almidón seco  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.13 Gelatinización

Esta etapa consiste que la solución anterior, con ayuda de un calentador con agitación magnética, se realiza el calentamiento hasta 60 °C durante 15 minutos, esto debido a que el gránulo de almidón es insoluble en agua fría ya que su estructura es altamente organizada (ver la Figura II-14).



**Figura II-14** Gelatinización del almidón seco

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.14 Licuefacción

Según (Rios & Zelada) indica que el intervalo de temperatura del proceso de hidrólisis del almidón es de 70°C - 90°C para el rompimiento de los gránulos de almidón proveniente de un tubérculo y un pH del proceso de 5 - 6,5.

Para el proceso de licuefacción se corrige el pH con la adición de una solución de ácido cítrico para llegar a un pH (5,8). Luego se adiciona la enzima  $\alpha$ -amilasa (0,5 gramos), (según especificación del proveedor, se debe usar 1 gramo/litro), a una temperatura de 70 °C y por un tiempo de 60 minutos (ver Figura II-15), determinando cada 20 minutos los °Brix y aplicando la prueba del yodo, para observar la transformación de almidón en dextrinas (ver Figura II-17).



**Figura II-15** Etapa de licuefacción  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.15 Sacarificación

Según (Fernandez & Perales) indica que las temperaturas de hidrólisis enzimática para obtener glucosa en el proceso de sacarificación, está comprendida entre los intervalos de (40°C - 60°C) y un pH del proceso de (4,0 – 5,5).

Para el proceso de sacarificación se ajusta el pH a (5,0) con una solución de ácido cítrico. Se adiciona la cantidad de enzima amiloglicosidasa (0,7 g), (según especificación del proveedor, se debe usar 1 gramo/litro) y se lleva a calentamiento a la temperatura de (45 °C) y agitación constante, el proceso se llevó a cabo durante 120 minutos (ver la Figura II-16), determinando cada 40 minutos y aplicando la prueba del yodo, para observar que la enzima glucoamilasa la cual hidroliza la dextrina hasta transformarse en glucosa (ver la Figura II-17).



**Figura II-16** Etapa de sacarificación  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

- **Prueba del yodo**

La prueba del yodo es una reacción química usada para determinar la presencia o alteración del almidón. Esta reacción es el resultado de la formación de cadenas de poliyoduro a partir de la reacción del almidón con el yodo presente en la solución de un reactivo llamado lugol. La amilosa forma hélices donde se juntan las moléculas de yodo, formando un color azul oscuro. La amilopectina, forma hélices mucho más cortas y las moléculas de yodo son incapaces de juntarse, obteniéndose un color entre naranja y amarillo. A medida que avanza la hidrólisis enzimática, se observa un cambio de color de azul a rosa, esto debido a que el almidón se está convirtiendo en sus respectivas dextrinas. (Escuela superior politécnica de Chimborazo, 2021)

En la Figura II-17, se observa el cambio de color a medida que avanza la hidrólisis enzimática, es decir se produce la conversión de almidón en sus respectivas dextrinas y posteriormente a glucosa.



**Figura II-17** Prueba del yodo a medida que avanza la hidrólisis enzimática

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.16 Filtración

Se hace una filtración para descartar los residuos sobrantes con ayuda de papel filtro, a cada una de las muestras para pasar posteriormente a concentración (ver Figura II-18).



**Figura II-18** Filtración de la muestra  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.17 Concentración

Con la ayuda del rota-vapor se hizo la separación del agua sobrante, para tener una óptima concentración, el jarabe se deja concentrar durante un periodo de 90 minutos, con una agitación de 30 rpm, a una temperatura de 60 °C (ver la Figura II-19).



**Figura II-19** Separación del agua sobrante del producto final  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 2.5.3.18 Jarabe glucosado

Finalmente se obtiene el producto que es el jarabe glucosado a partir de almidón de papa (ver la Figura II-20).



*Figura II-20* Producto final

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

**CAPÍTULO III**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Una vez realizada la parte experimental prosigue el procesamiento de los resultados, con los cuales se desea determinar el mejor experimento en la etapa de sacarificación en el proceso de hidrólisis enzimática.

### 3.1 Características de la materia prima

Las características de la materia prima, se realizó tomando en cuenta las propiedades fisicoquímicas del almidón de papa.

En la Tabla III-1, se muestran los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico del almidón de papa, la extracción del almidón se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (L.O. U.). El análisis se realizó en el Centro de Análisis de Investigación y Desarrollo (CEANID), perteneciente a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (ver Anexo B).

**Tabla III-1: Análisis fisicoquímico del almidón de papa**

N°	Parámetros	Técnica y/o método de ensayo	Unidad	Resultado
1	Azúcares totales	Reducción de Cu	%	0,09
2	Cenizas	NB 39034:10	%	0,32
3	Fibra	NB 35004:14	%	n.d
4	Grasa	NB 35003:14	%	0,13
5	Hidratos de carbono	Cálculo	%	93,45
6	Humedad	NB 35005: 14	%	5,66
7	Proteína total (N <sub>x6,25</sub> )	NB 35002:14	%	0,44
8	Valor energético	Cálculo	kcal/100 g	376,73
<i>n.d: No detectado</i>				

**Fuente:** CEANID, 2022

En la Tabla III-2, se muestran los resultados obtenidos de los análisis microbiológicos del almidón de papa, la extracción del almidón se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (L.O. U.). El análisis se realizó en el Centro de Análisis de Investigación y Desarrollo (CEANID), perteneciente a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (ver Anexo B).

**Tabla III-2: Análisis microbiológico del almidón de papa**

N°	Parámetros	Normas	Unidad	Resultado
1	Bacterias aerobias mesófilas	NB 32003:05	UFC/g	6,8 x10 <sup>3</sup>
2	Coliformes totales	NB 32005:02	UFC/g	<1,0 x10 <sup>1</sup>
3	Mohos y levaduras	NB 32006:03	UFC/g	3,4 x10 <sup>3</sup>

Fuente: CEANID, 2022

### 3.2 Secado del almidón de papa

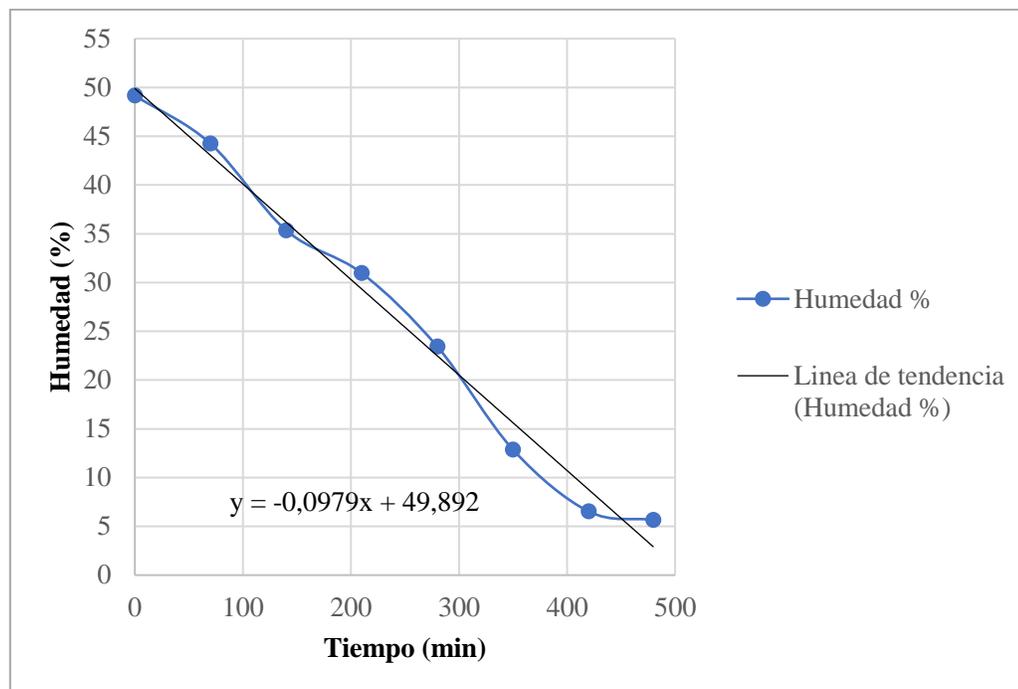
Para llevar a cabo el proceso de hidrólisis se necesita la materia prima seca. Se procedió al secado del almidón, en un deshidratador de tiro forzado, a 60 °C de temperatura y un tiempo determinado de 480 minutos (8 horas). En la Tabla III-3, muestra los valores del porcentaje de humedad inicial 49,17% y humedad final 5,66% del almidón determinados en el medidor de humedad infrarrojo, se determinó en intervalos de 70 minutos a completar los 480 minutos.

**Tabla III-3: Control de humedad a T=60°C, t=480 min (8 horas)**

Tiempo (min)	Humedad %
0	49,17
70	44,24
140	35,35
210	30,96
280	23,42
350	12,86
420	6,53
480	5,66

Fuente: Elaboración propia, 2022

La Figura III-1, muestra la curva de la variación del porcentaje de humedad del almidón respecto al tiempo.



**Figura III-1** Porcentaje de humedad del almidón de papa

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 3.3 Resultados del proceso de hidrólisis enzimática

En la Tabla III-4, se presentan los resultados del porcentaje de azúcares reductores, obtenidos de la parte experimental y analizados por el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), así como sus respectivas replicas (ver Anexo C).

**Tabla III-4: Resultados del porcentaje de azúcares reductores en la etapa de sacarificación del proceso de hidrólisis enzimática**

Nº	pH	Temperatura (°C)	Cantidad de enzima glucoamilasa (g)	Azúcares reductores (%) I	Azúcares reductores (%) II
1	-1	-1	-1	3,70	3,72
2	1	-1	-1	4,25	4,30
3	-1	1	-1	4,35	4,31
4	1	1	-1	4,20	4,24
5	-1	-1	1	4,53	4,56
6	1	-1	1	4,73	4,72
7	-1	1	1	4,20	4,17
8	1	1	1	4,59	4,61

**Fuente:** CEANID, 2022

En la Tabla III-4, se observa que el valor de los azúcares reductores oscila entre 3,70% y 4,73%, estos valores son el resultado de un tiempo de 3 horas de hidrólisis enzimática y se demuestra la posibilidad de obtener azúcares a partir de la hidrólisis enzimática del almidón de papa seco molido.

### **3.3.1 Análisis estadístico del diseño factorial realizado en la etapa de sacarificación del proceso de hidrólisis enzimática**

El análisis estadístico del diseño experimental, se realizó mediante IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 21.0 para Windows, mismo que permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos, obteniendo de esta manera los resultados más significativos.

El diseño factorial, se realiza con el propósito de establecer si los factores pH, temperatura y cantidad de enzima tienen influencia en el porcentaje de azúcares reductores en el proceso de hidrólisis enzimática.

A continuación, se presentan Tabla III-5, los resultados obtenidos de forma experimental dentro de la etapa de sacarificación del proceso hidrolisis, efectuados según el diseño factorial elaborado para el caso.

**Tabla III-5: Matriz de diseño experimental para la etapa de sacarificación del proceso de hidrólisis enzimática**

Nº	pH	Temperatura (°C)	Cantidad de enzima glucoamilasa (g)	Azúcares reductores (%)
1	-1	-1	-1	3,70
2	1	-1	-1	4,25
3	-1	1	-1	4,35
4	1	1	-1	4,20
5	-1	-1	1	4,53
6	1	-1	1	4,73
7	-1	1	1	4,20
8	1	1	1	4,59
9	-1	-1	-1	3,72
10	1	-1	-1	4,30
11	-1	1	-1	4,31
12	1	1	-1	4,24
13	-1	-1	1	4,56
14	1	-1	1	4,72
15	-1	1	1	4,17
16	1	1	1	4,61

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

En la Tabla III-6, se puede observar el análisis estadístico basado en los resultados de las interacciones de pH, temperatura, cantidad de enzima y sus respectivas replicas, tomando como respuesta el porcentaje de azúcares reductores obtenido para cada ensayo y replica (ver Anexo D).

**Tabla III-6: Análisis de varianza en la etapa de sacarificación del proceso de hidrólisis enzimática**

Origen	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	Sig.
<b>Modelo corregido</b>	1,184	6	0,197	8,406	0,003
<b>Intersección</b>	299,117	1	299,117	12744,955	0,000
<b>pH</b>	0,276	1	0,276	11,744	0,008
<b>Temperatura</b>	0,002	1	0,002	0,068	0,800
<b>Cantidad enzima</b>	0,578	1	0,578	24,611	0,001
<b>pH * Temperatura</b>	0,048	1	0,048	2,062	0,185
<b>pH * Cantidad enzima</b>	0,005	1	0,005	0,209	0,659
<b>Temperatura * Cantidad enzima</b>	0,276	1	0,276	11,744	0,008
<b>Error</b>	0,211	9	0,023		
<b>Total</b>	300,512	16			
<b>Total, corregida</b>	1,395	15			

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Las variables más significativas poseen una significancia menor al 5% (0,05), con una probabilidad de 95%.

La variable pH tiene un nivel de significancia igual a 0,008, mientras que la variable cantidad de enzima tiene una significancia de 0,001 y la interacción de temperatura – cantidad de enzima es de 0,008. Por tanto, estas variables y la interacción influyen directamente de manera significativa en la etapa de sacarificación porque es menor a 0,05.

Según el análisis de varianza, se puede observar que a un nivel de significancia 5 %, la interacción de pH – temperatura tiene una significancia de 0,185, la interacción pH – cantidad de enzima tiene un nivel de significancia de 0,659 quedando ambas descartadas porque no cumplen con el requisito del valor menor a 0,05.

### **3.3.2 Análisis de regresión lineal múltiple en la etapa de sacarificación del proceso de hidrólisis enzimática**

Establecido lo anterior, se procede a realizar la regresión lineal múltiple a fin de establecer el modelo matemático. En la Tabla III-7, se muestran los resultados de la regresión.

Tabla III-7: Coeficiente del modelo

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza de 95,0%	
	B	Error	Beta			Límite inferior	Límite superior
(Constante)	4,324	0,037		116,136	0,000	4,243	4,405
pH	0,131	0,037	0,445	3,525	0,004	0,050	0,212
Cantidad enzima	0,190	0,037	0,643	5,103	0,000	0,109	0,271
Temperatura-cantidad enzima	-0,131	0,037	-0,445	-3,525	0,004	-0,212	-0,050

Fuente: Elaboración propia, 2022

La ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos experimentales para la etapa de sacarificación del proceso de hidrólisis enzimática se describe a continuación.

$$\% \text{ Azúcares reductores} = 4,324 + 0,131 * \text{pH} + 0,190 * \text{CE} - 0,131 * \text{TCE}$$

Donde:

CE = Cantidad de enzima

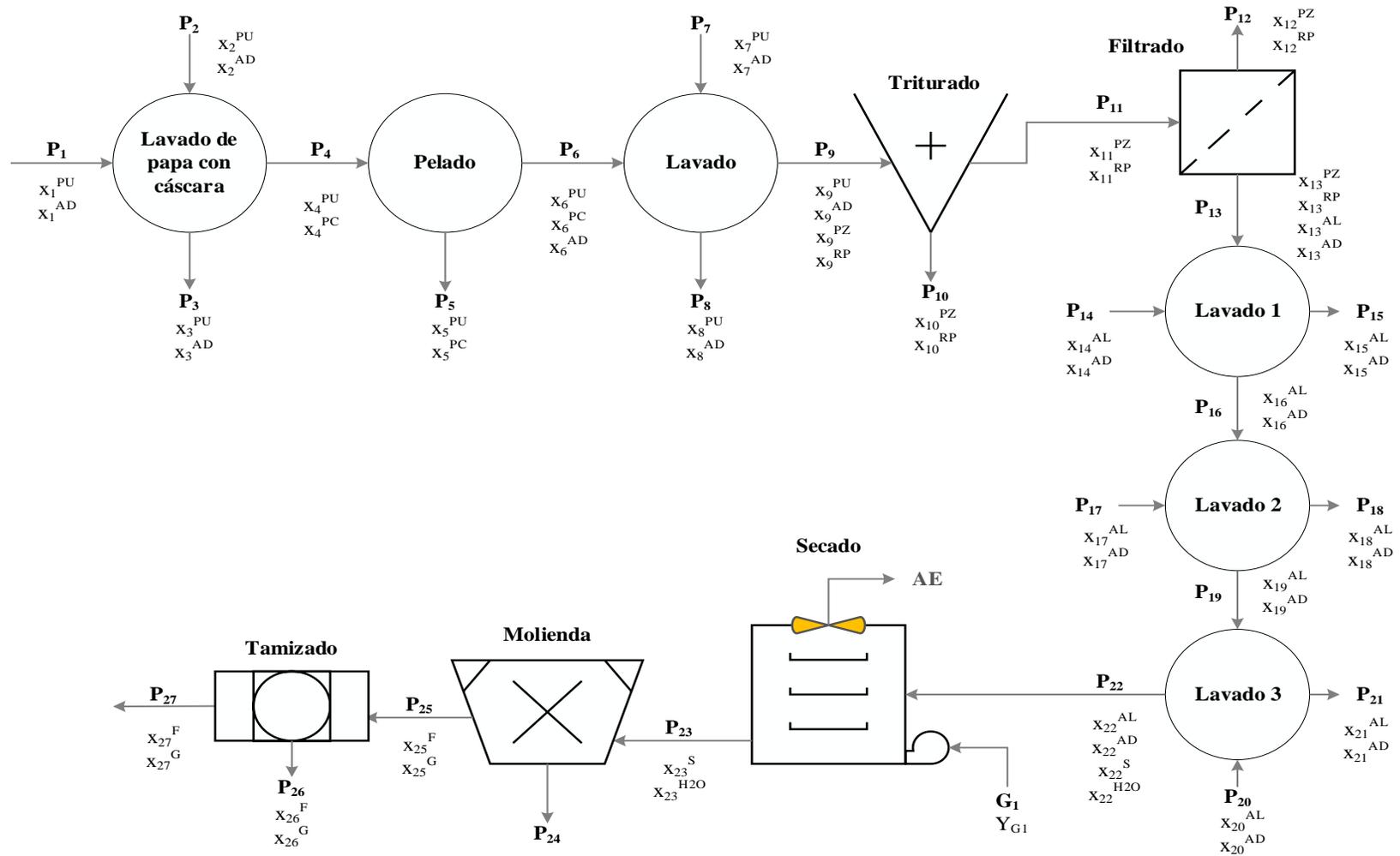
TCE = Temperatura – Cantidad de enzima

### 3.4 Balance de materia para la obtención de jarabe glucosado

Para obtener jarabe glucosado mediante hidrólisis enzimática del almidón de papa, se dividió en dos partes; acondicionamiento de la materia prima e hidrólisis enzimática.

#### 3.4.1 Balance de materia en el acondicionamiento de la materia prima

El balance de materia del proceso de acondicionamiento de la materia prima, se realizó para una base de cálculo de 1002,666 g de papa y para su resolución se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura III-2.

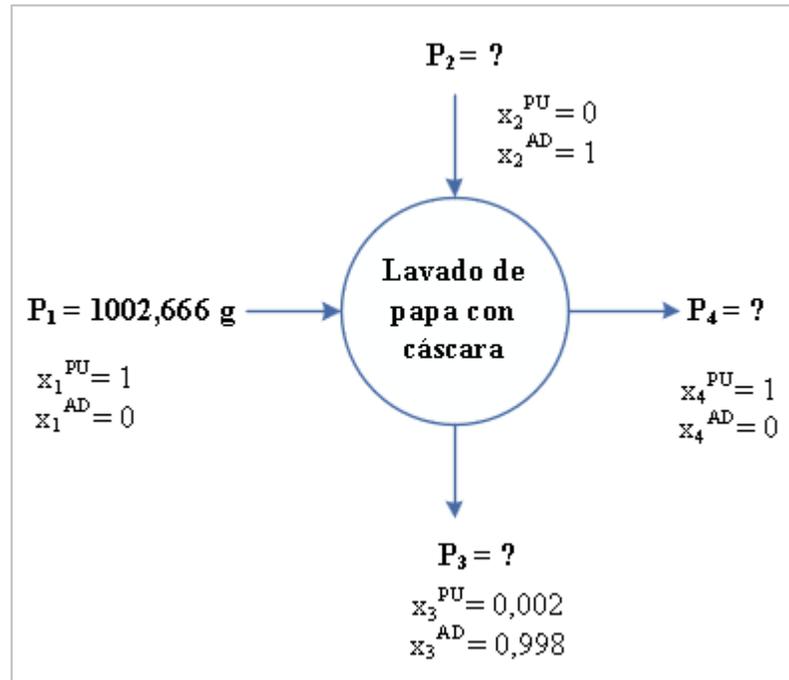


**Figura III-2** Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de obtención de almidón de papa.

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 3.4.1.1 Balance de materia en la etapa de lavado de papa con cáscara

La Figura III-3, muestra el proceso de balance de materia en la etapa de lavado de papa partiendo de  $P_1 = 1002,666$  g de papa para realizar el balance de materia.



**Figura III-3** Balance de materia en la etapa de lavado de la papa con cáscara

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_1$  = Cantidad de papa sin lavar (g)

$P_2$  = Cantidad de agua (g)

$P_3$  = Cantidad de agua residual (g)

$P_4$  = Cantidad de papa lavada (g)

$x_1^{PU}$  = Fracción de papa en la corriente  $P_1$

$x_1^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_1$

$x_2^{PU}$  = Fracción de papa en la corriente  $P_2$

$x_2^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_2$

$x_3^{PU}$  = Fracción de papa en la corriente  $P_3$

$x_3^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_3$

$x_4^{PU}$  = Fracción de papa en la corriente  $P_4$

$x_4^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_4$

Balance de materia global en la etapa de lavado de la papa con cáscara:

$$P_1 + P_2 = P_3 + P_4 \quad (\text{Ecuación III- 1})$$

Para llevar a cabo la etapa de lavado, se trabajó con una relación 1:1 de (agua/papa).

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{1g}{1g} \quad (\text{Ecuación III- 2})$$

Entonces:

$$P_1 = 1002,666 \text{ g de papa}$$

$$P_2 = 1002,666 \text{ g de agua}$$

Balance parcial para el agua residual en la etapa de lavado de la papa:

$$P_1 * x_1^{AD} + P_2 * x_2^{AD} = P_3 * x_3^{AD} + P_4 * x_4^{AD}$$

$$1002,666 * 0 + 1002,666 * 1 = P_3 * 0,998 + P_4 * 0$$

$$P_3 = 1004,675 \text{ g de agua residual}$$

Balance parcial para la cantidad de papa en la etapa de lavado:

$$P_1 * x_1^{PU} + P_2 * x_2^{PU} = P_3 * x_3^{PU} + P_4 * x_4^{PU}$$

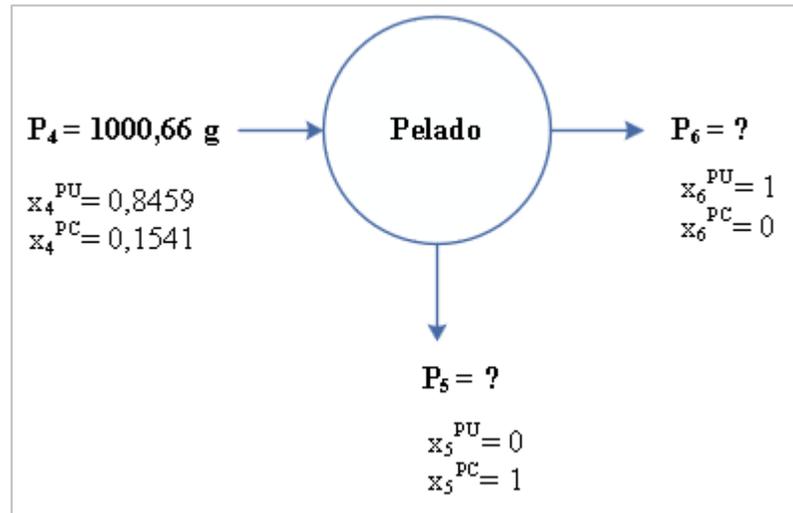
$$1002,666 * 1 + 1002,666 * 0 = 1004,675 * 0,002 + P_4 * 1$$

$$P_4 = 1000,66 \text{ g de papa lavada}$$

#### 3.4.1.2 Balance de materia en la etapa de pelado de la papa

La Figura III-4, muestra el proceso de balance de materia en la etapa de pelado partiendo de  $P_4 = 1000,66 \text{ g de papa lavada}$ . En esta etapa la fracción de papa

comestible es de 0,8459 y la fracción de cáscara de papa igual 0,1541, datos que fueron tomados de la parte experimental del trabajo.



**Figura III-4** Balance de materia en la etapa de pelado de papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_4$  = Cantidad de papa lavada (g)

$P_5$  = Cantidad de cáscara de papa (g)

$P_6$  = Cantidad de papa pelada (g)

$x_4^{PU}$  = Fracción de papa en la corriente  $P_4$

$x_4^{PC}$  = Fracción de cáscara de papa en la corriente  $P_4$

$x_5^{PU}$  = Fracción de papa pelada en la corriente  $P_5$

$x_5^{PC}$  = Fracción de cáscara de papa en la corriente  $P_5$

$x_6^{PU}$  = Fracción de papa pelada en la corriente  $P_6$

$x_6^{PC}$  = Fracción de cáscara de papa en la corriente  $P_6$

Balance de materia global en la etapa de pelado de la papa

$$P_4 = P_5 + P_6 \quad (\text{Ecuación III- 3})$$

Balance parcial para la fracción comestible en la etapa de pelado de la papa:

$$P_4 * x_4^{PU} = P_5 * x_5^{PU} + P_6 * x_6^{PU}$$

$$1000,66 * 0,8459 = P_5 * 0 + P_6 * 1$$

$$P_6 = 846,458 \text{ g de papa pelada}$$

Balance parcial para la fracción de cáscara de papa en la etapa de pelado de la papa:

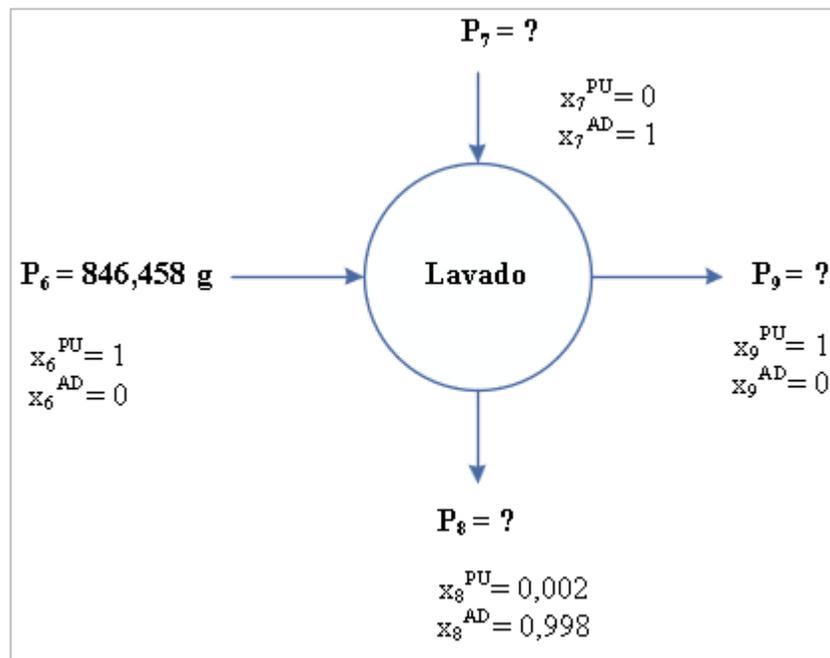
$$P_4 * x_4^{PC} = P_5 * x_5^{PC} + P_6 * x_6^{PC}$$

$$1000,66 * 0,1541 = P_5 * 1 + 846,458 * 0$$

$$P_5 = 154,201 \text{ g de cáscara de papa}$$

### 3.4.1.3 Balance de materia en la etapa de lavado de la papa comestible

En la Figura III-5, se muestra el proceso de balance de materia en la etapa del lavado de papa pelada. Se procedió a lavar la papa pelada en una relación másica de 1:1 (agua/papa).



**Figura III-5** Balance de materia en la etapa de lavado de la papa

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_6$  = Cantidad de papa pelada (g)

$P_7$  = Cantidad de agua (g)

$P_8$  = Cantidad de agua residual (g)

$P_9$  = Cantidad de papa lavada (g)

$x_6^{PU}$  = Fracción de papa pelada en la corriente  $P_6$

$x_6^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_6$

$x_7^{PU}$  = Fracción de papa pelada en la corriente  $P_7$

$x_7^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_7$

$x_8^{PU}$  = Fracción de papa pelada en la corriente  $P_8$

$x_8^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_8$

$x_9^{PU}$  = Fracción de papa pelada lavada en la corriente  $P_9$

$x_9^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_9$

Balance de materia global en la etapa de lavado de la papa pelada:

$$P_6 + P_7 = P_8 + P_9 \quad (\text{Ecuación III- 4})$$

Para llevar a cabo la etapa de lavado, se trabajó con una relación 1:1 de (agua/papa pelada):

$$\frac{P_6}{P_7} = \frac{1g}{1g} \quad (\text{Ecuación III- 5})$$

Entonces:

$P_6 = 846,458$  g de papa pelada

$P_7 = 846,458$  g de agua

Se agrega 0,01 g de ácido cítrico al agua, por lo tanto:

$$P_7 = 846,458 \text{ g} + 0,01 \text{ g}$$

$$P_7 = 846,468 \text{ g de solución}$$

Balance parcial para el agua residual en la etapa de lavado de la papa:

$$P_6 * x_6^{AD} + P_7 * x_7^{AD} = P_8 * x_8^{AD} + P_9 * x_9^{AD}$$

$$846,458 * 0 + 846,468 * 1 = P_8 * 0,998 + P_9 * 0$$

$$P_8 = 848,164 \text{ g de agua residual}$$

Balance parcial para la cantidad de papa en la etapa de lavado:

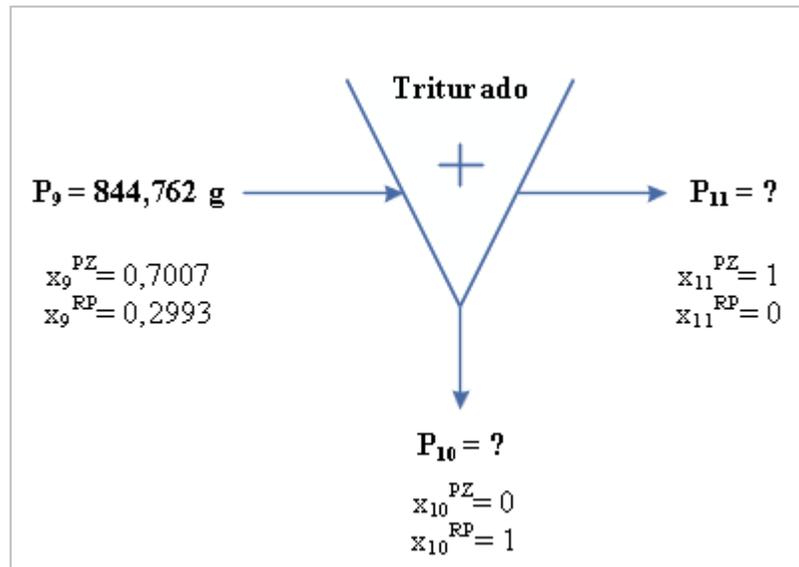
$$P_6 * x_6^{PU} + P_7 * x_7^{PU} = P_8 * x_8^{PU} + P_9 * x_9^{PU}$$

$$846,458 * 1 + 846,468 * 0 = 848,164 * 0,002 + P_9 * 1$$

$$P_9 = 844,762 \text{ g de papa pelada lavada}$$

#### 3.4.1.4 Balance de materia en la etapa de triturado de la papa comestible

La Figura III-6, muestra el proceso de balance de materia en la etapa de triturado partiendo de  $P_9 = 844,762 \text{ g}$  de papa comestible. En esta etapa la fracción de zumo de papa es de  $x_9^{PZ} = 0,7007$  y la fracción de residuos de papa igual  $x_9^{RP} = 0,2993$ , datos que fueron tomados de la parte experimental del trabajo.



**Figura III-6** Balance de materia en la etapa de triturado de la papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_9$  = Cantidad de papa comestible(g)

$P_{10}$  = Cantidad de residuo de papa (g)

$P_{11}$  = Cantidad de zumo de papa (g)

$x_9^{PZ}$  = Fracción de zumo de papa en la corriente  $P_9$

$x_9^{RP}$  = Fracción de residuos de papa en la corriente  $P_9$

$x_{10}^{PZ}$  = Fracción de zumo de papa en la corriente  $P_{10}$

$x_{10}^{RP}$  = Fracción de residuos de papa en la corriente  $P_{10}$

$x_{11}^{PZ}$  = Fracción de zumo de papa en la corriente  $P_{11}$

$x_{11}^{RP}$  = Fracción de residuos de papa en la corriente  $P_{11}$

Balance de materia global en la etapa de triturado de la papa:

$$P_9 = P_{10} + P_{11} \quad (\text{Ecuación III- 6})$$

Balance parcial para la cantidad de zumo en la etapa de triturado de la papa:

$$P_9 * x_9^{PZ} = P_{10} * x_{10}^{PZ} + P_{11} * x_{11}^{PZ}$$

$$844,762 * 0,7007 = P_{10} * 0 + P_{11} * 1$$

$$P_{11} = 591,924 \text{ g de zumo de papa}$$

Balance parcial para la cantidad de residuos de papa en la etapa de triturado:

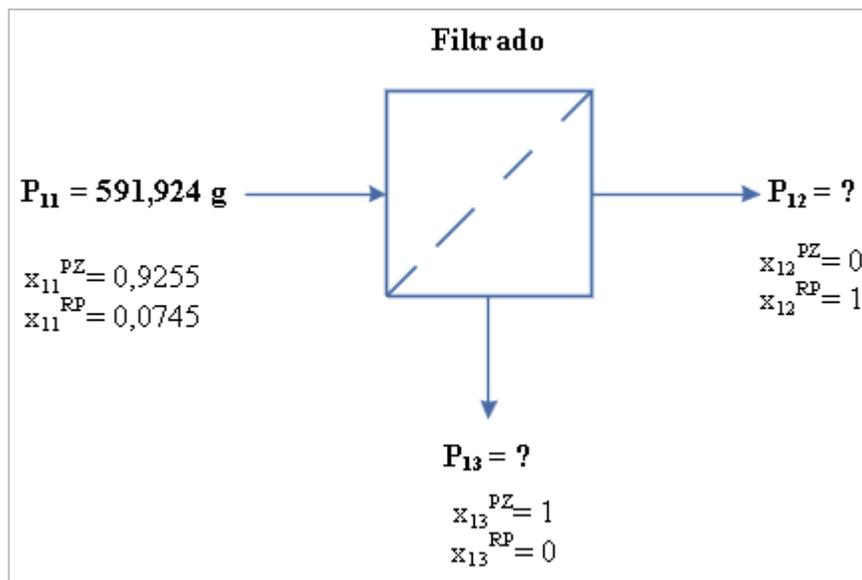
$$P_9 * x_9^{RP} = P_{10} * x_{10}^{RP} + P_{11} * x_{11}^{RP}$$

$$844,762 * 0,2993 = P_{10} * 1 + 591,924 * 0$$

$$P_{10} = 252,837 \text{ g de residuos de papa}$$

### 3.4.1.5 Balance de materia en la etapa de filtrado del zumo de papa

La Figura III-7, muestra el proceso de balance de materia en la etapa de filtrado partiendo de  $P_{11} = 591,924$  g de papa. En esta etapa la fracción de filtrado del zumo de papa es de  $x_{11}^{PZ} = 0,9255$  y la fracción de residuos de papa igual  $x_{11}^{RP} = 0,0745$ , datos que fueron tomados de la parte experimental del trabajo.



**Figura III-7** Balance de materia en la etapa de filtrado del zumo de la papa

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_{11}$  = Cantidad de zumo de papa (g)

$P_{12}$  = Cantidad retenida de residuos de papa (g)

$P_{13}$  = Cantidad de almidón a lavar (g)

$x_{11}^{PZ}$  = Fracción de zumo de papa en la corriente  $P_{11}$

$x_{11}^{RP}$  = Fracción de residuos de papa en la corriente  $P_{11}$

$x_{12}^{PZ}$  = Fracción de zumo de papa en la corriente  $P_{12}$

$x_{12}^{RP}$  = Fracción de residuos de papa en la corriente  $P_{12}$

$x_{13}^{PZ}$  = Fracción de zumo de papa en la corriente  $P_{13}$

$x_{13}^{RP}$  = Fracción de residuos de papa en la corriente  $P_{13}$

Balance de materia global en la etapa de filtrado de la papa

$$P_{11} = P_{12} + P_{13} \quad (\text{Ecuación III- 7})$$

Balance parcial para la cantidad de almidón húmedo en la etapa de filtración del zumo de la papa:

$$P_{11} * x_{11}^{PZ} = P_{12} * x_{12}^{PZ} + P_{13} * x_{13}^{PZ}$$

$$591,924 * 0,9255 = P_{12} * 0 + P_{13} * 1$$

$$P_{13} = 547,825 \text{ g de almidón húmedo}$$

Balance parcial para la cantidad de residuos de papa en la etapa de filtrado del zumo de papa:

$$P_{11} * x_{11}^{RP} = P_{12} * x_{12}^{RP} + P_{13} * x_{13}^{RP}$$

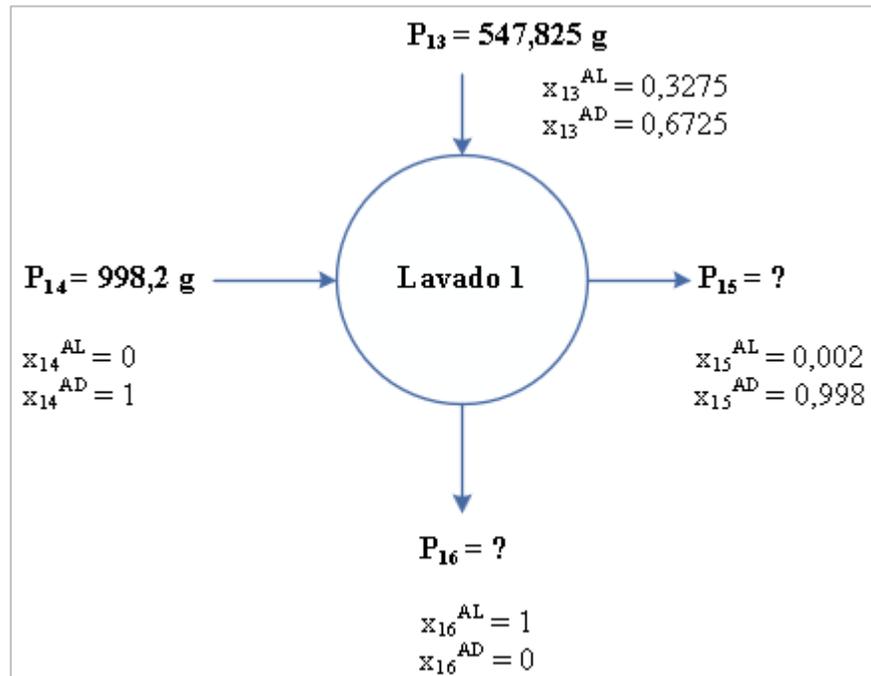
$$591,924 * 0,0745 = P_{12} * 1 + 547,825 * 0$$

$$P_{12} = 44,098 \text{ g de residuos de papa}$$

#### 3.4.1.6 Balance de materia en la etapa de lavado 1 del almidón

En la Figura III-8, se muestra el proceso de balance de materia en la etapa del lavado 1 del almidón de papa, partiendo de  $P_{13} = 547,825$  g del filtrado del zumo de papa. En esta etapa la fracción de almidón filtrado es de  $x_{13}^{AL} = 0,3275$  y la fracción de agua

residual igual  $x_{13}^{AD} = 0,6725$ , datos que fueron tomados de la parte experimental del trabajo.



**Figura III-8** Balance de materia en la etapa de lavado 1 del almidón de papa

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_{13}$  = Cantidad de almidón a lavar (g)

$P_{14}$  = Cantidad de agua (g)

$P_{15}$  = Cantidad de agua residual (g)

$P_{16}$  = Cantidad de almidón sedimentado en el lavado 1(g)

$x_{13}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{13}$

$x_{13}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{13}$

$x_{14}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{14}$

$x_{14}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{14}$

$x_{15}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{15}$

$x_{15}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{15}$

$x_{16}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{16}$

$x_{16}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{16}$

Balance de materia global en la etapa de lavado 1 del almidón de la papa:

$$P_{13} + P_{14} = P_{15} + P_{16} \quad (\text{Ecuación III- 8})$$

Para llevar a cabo la etapa de lavado, se trabajó con 1000 ml de agua.

Por lo tanto, se hace una conversión:

$$P_{14} = 1000 \text{ ml} * 0,9982 \text{ g/ml}$$

$$P_{14} = 998,2 \text{ g de agua}$$

Balance parcial para el agua residual en la etapa de lavado 1 del almidón:

$$P_{13} * x_{13}^{AD} + P_{14} * x_{14}^{AD} = P_{15} * x_{15}^{AD} + P_{16} * x_{16}^{AD}$$

$$547,826 * 0,6725 + 998,2 * 1 = P_{15} * 0,998 + P_{16} * 0$$

$$P_{15} = 1369,352 \text{ g de agua residual}$$

Balance parcial para la cantidad de almidón de papa en la etapa de lavado 1:

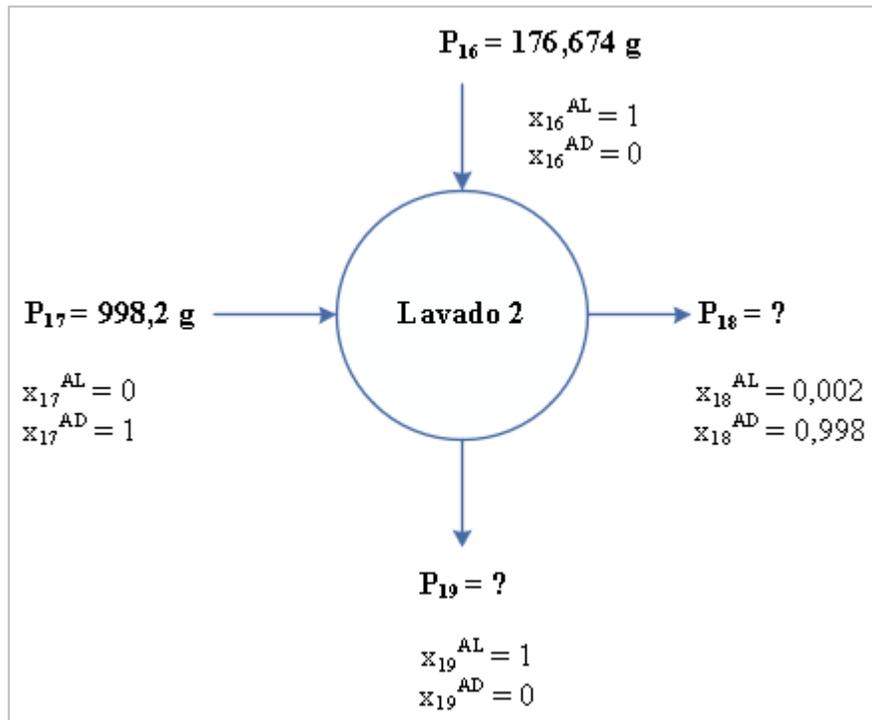
$$P_{13} * x_{13}^{AL} + P_{14} * x_{14}^{AL} = P_{15} * x_{15}^{AL} + P_{16} * x_{16}^{AL}$$

$$547,826 * 0,3275 + 998,2 * 0 = 1369,352 * 0,002 + P_{16} * 1$$

$$P_{16} = 176,674 \text{ g de almidón sedimentado en el lavado 1}$$

#### 3.4.1.7 Balance de materia en la etapa de lavado 2 del almidón

En la Figura III-9, se muestra el proceso de balance de materia en la etapa del lavado 2 del almidón de papa, partiendo de  $P_{16} = 176,674 \text{ g}$  de almidón de papa para realizar el balance de materia.



**Figura III-9** Balance de materia en la etapa de lavado 2 del almidón de papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_{16}$  = Cantidad de almidón sedimentado en el lavado 1(g)

$P_{17}$  = Cantidad de agua (g)

$P_{18}$  = Cantidad de agua residual (g)

$P_{19}$  = Cantidad de almidón sedimentado en el lavado 2 (g)

$x_{16}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{16}$

$x_{16}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{16}$

$x_{17}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{17}$

$x_{17}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{17}$

$x_{18}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{18}$

$x_{18}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{18}$

$x_{19}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{19}$

$x_{19}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{19}$

Balance de materia global en la etapa de lavado 2 del almidón de la papa:

$$P_{16} + P_{17} = P_{18} + P_{19} \quad (\text{Ecuación III- 9})$$

Para llevar a cabo la etapa de lavado, se trabajó con 1000 ml de agua.

Por lo tanto, se hace una conversión:

$$P_{17} = 1000 \text{ ml} * 0,9982 \text{ g/ml}$$

$$P_{17} = 998,2 \text{ g de agua}$$

Balance parcial para el agua residual en la etapa de lavado 2 del almidón:

$$P_{16} * x_{16}^{AD} + P_{17} * x_{17}^{AD} = P_{18} * x_{18}^{AD} + P_{19} * x_{19}^{AD}$$

$$176,674 * 0 + 998,2 * 1 = P_{18} * 0,998 + P_{19} * 0$$

$$P_{18} = 1000,200 \text{ g de agua residual}$$

Balance parcial para la cantidad de almidón de papa en la etapa de lavado 2:

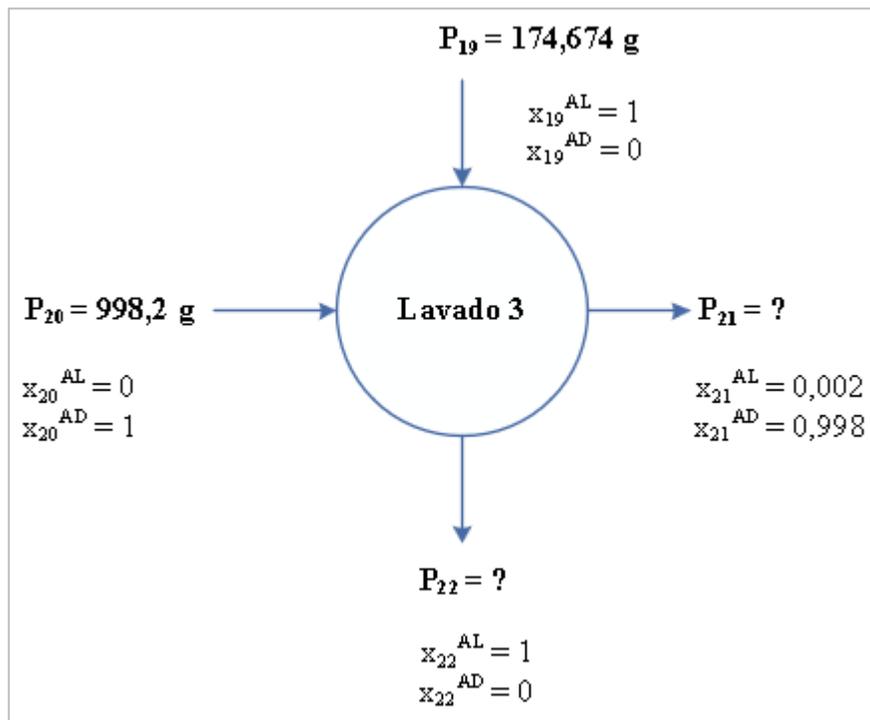
$$P_{16} * x_{16}^{AL} + P_{17} * x_{17}^{AL} = P_{18} * x_{18}^{AL} + P_{19} * x_{19}^{AL}$$

$$176,674 * 1 + 998,2 * 0 = 1000,200 * 0,002 + P_{19} * 1$$

$$P_{19} = 174,674 \text{ g de almidón sedimentado en el lavado 2}$$

### 3.4.1.8 Balance de materia en la etapa de lavado 3 del almidón

En la Figura III-10, se muestra el proceso de balance de materia en la etapa del lavado 3 del almidón de papa, partiendo de  $P_{19} = 174,674 \text{ g}$  de almidón de papa proveniente del segundo lavado.



**Figura III-10** Balance de materia en la etapa de lavado 3 del almidón de papa

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_{19}$  = Cantidad de almidón sedimentado en el lavado 2 (g)

$P_{20}$  = Cantidad de agua (g)

$P_{21}$  = Cantidad de agua residual (g)

$P_{22}$  = Cantidad de almidón sedimentado en el lavado 3 (g)

$x_{19}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{19}$

$x_{19}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{19}$

$x_{20}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{20}$

$x_{20}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{20}$

$x_{21}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{21}$

$x_{21}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{21}$

$x_{22}^{AL}$  = Fracción de almidón de papa en la corriente  $P_{22}$

$x_{22}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $P_{22}$

Balance de materia global en la etapa de lavado 3 del almidón de la papa:

$$P_{19} + P_{20} = P_{21} + P_{22} \quad (\text{Ecuación III- 10})$$

Para llevar a cabo la etapa de lavado, se trabajó con 1000 ml de agua.

Por lo tanto, se hace una conversión:

$$P_{20} = 1000 \text{ ml} * 0,9982 \text{ g/ml}$$

$$P_{20} = 998,2 \text{ g de agua}$$

Balance parcial para el agua residual en la etapa de lavado 3 del almidón:

$$P_{19} * x_{19}^{AD} + P_{20} * x_{20}^{AD} = P_{21} * x_{21}^{AD} + P_{22} * x_{22}^{AD}$$

$$174,674 * 0 + 998,2 * 1 = P_{21} * 0,998 + P_{22} * 0$$

$$P_{21} = 1000,200 \text{ g de agua residual}$$

Balance parcial para la cantidad de almidón de papa en la etapa de lavado 3:

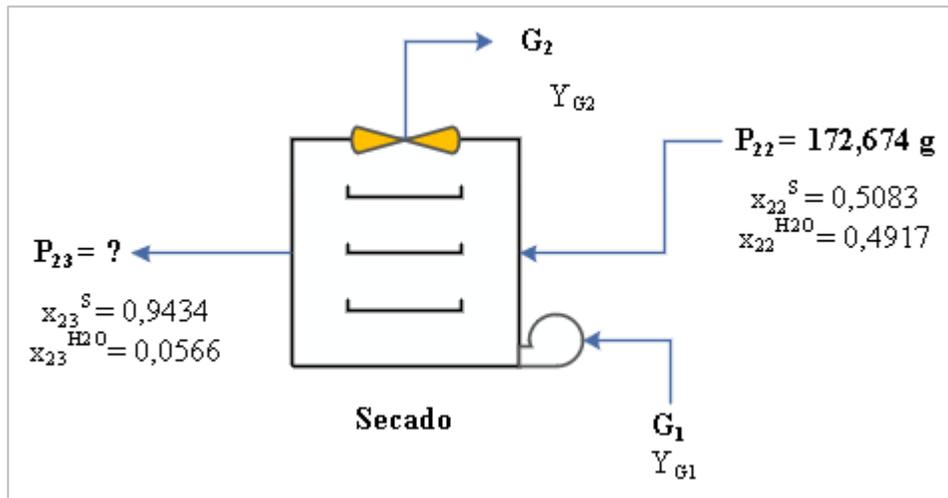
$$P_{19} * x_{19}^{AL} + P_{20} * x_{20}^{AL} = P_{21} * x_{21}^{AL} + P_{22} * x_{22}^{AL}$$

$$174,674 * 1 + 998,2 * 0 = 1000,200 * 0,002 + P_{22} * 1$$

$$P_{22} = 172,674 \text{ g de almidón sedimentado en el lavado 3}$$

#### 3.4.1.9 Balance de materia en la etapa de secado del almidón de papa

En la Figura III-11, se muestra la etapa de secado del almidón de papa con un peso de  $P_{22} = 172,674 \text{ g}$  con un porcentaje de humedad de 49,17 % ((humedad determinada por un determinador de humedad infrarrojo) y al finalizar la etapa de secado del almidón de papa el porcentaje de humedad es de 5,66 % (humedad determinada por un determinador de humedad infrarrojo).



**Figura III-11** Balance de materia en la etapa de secado del almidón de papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_{22}$  = Cantidad de almidón sedimentado en el lavado 3 (g)

$P_{23}$  = Cantidad de almidón seco (g)

$x_{22}^S$  = Fracción sólida de almidón de papa en la corriente  $P_{22}$

$x_{22}^{H_2O}$  = Fracción de agua en el almidón de papa en la corriente  $P_{22}$

$x_{23}^S$  = Fracción sólida de almidón de papa en la corriente  $P_{23}$

$x_{23}^{H_2O}$  = Fracción de agua en el almidón de papa en la corriente  $P_{23}$

El balance de materia global en la etapa de secado del almidón de papa, se tomó en cuenta la ecuación (III-11):

$$P_{22} + G_1 = P_{23} + G_2 \quad (\text{Ecuación III- 11})$$

Balance de parcial por componentes sólidos en la etapa de secado del almidón de papa:

$$P_{22} * X_{22}^S = P_{23} * X_{23}^S$$

$$172,674 * 0,5083 = P_{23} * 0,9434$$

$$P_{23} = 93,036 \text{ g de almidón seco}$$

Balance parcial en la etapa de secado para ello se tomó en cuenta la ecuación (III-12):

$$P_{22} * X_{22} + G_1 * Y_{G1} = P_{23} * X_{23} + G_2 * Y_{G2} \quad (\text{Ecuación III- 12})$$

Donde:

$G_1$  = Caudal másico de aire seco a la entrada del deshidratador (kg aire seco/h)

$G_2$  = Caudal másico de aire seco a la salida del deshidratador (kg aire seco/h)

$P_{22}$  = Caudal másico de sólido seco (kg sólido seco/h)

$P_{23}$  = Caudal másico de sólido seco (kg sólido seco/h)

$X$  = Humedad del producto (kg agua/kg sólido seco)

$Y$  = Humedad del aire (kg agua/kg aire seco)

Para determinar la cantidad de aire seco que circula en el deshidratador, se considerando un sistema abierto:

$$G_1 = G_2 = G$$

$$P_{22} = P_{23} = P$$

Reemplazando variables en la ecuación (III-12) se tiene:

$$P * X_{22} + G * Y_{G1} = P * X_{23} + G * Y_{G2} \quad (\text{Ecuación III- 13})$$

Dividiendo la ecuación (III-13) entre P, se tiene:

$$X_{22} + G * Y_{G1} / P = X_{23} + G * Y_{G2} / P \quad (\text{Ecuación III- 14})$$

Ordenando la ecuación (III-14), se tiene:

$$\frac{G * Y_{G2}}{P} - \frac{G * Y_{G1}}{P} = X_{22} - X_{23} \quad (\text{Ecuación III- 15})$$

Factorizando G/P de la ecuación (III-15), se tiene:

$$G = \frac{(X_{22} - X_{23}) * P}{Y_{G2} - Y_{G1}} \quad (\text{Ecuación III- 16})$$

A partir de la ecuación (III-16), se puede determinar la cantidad de aire seco en la etapa de secado del almidón de papa.

El contenido de humedad del almidón de papa en la etapa del secado, se determinó mediante la ecuación (III-17) (Singh & Heldman, 2009).

$$X = \frac{X_{\text{agua}}}{X_{\text{sólido seco}}} \quad (\text{Ecuación III- 17})$$

Entonces la humedad inicial en etapa de secado es:

$$X_{22} = \frac{0,4917}{0,5083}$$

$$X_{22} = 0,9673 \text{ kg agua/kg sólido seco}$$

Para calcular el contenido de humedad final de la etapa de secado se obtiene de la ecuación (III-17):

$$X_{23} = \frac{0,0566}{0,9434}$$

$$X_{23} = 0,0599 \text{ kg agua/kg sólido seco}$$

Según (Gutierrez, 1875), la altura de la ciudad de Tarija es 1866 msnm; por tanto, los datos fueron introducidos en el software Psicrom 1,0 de psicrometría y los resultados se muestran en la tabla III-8, en base a temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo que fueron medidos a la entrada y salida del deshidratador de tiro forzado (ver Anexo F).

**Tabla III-8: Propiedades psicométricas del aire**

Propiedades	Aire frío	Aire saturado
Tbs (°C)	20	40
Tbh (°C)	15	26
HR%	61,83	35,81
Y (g/agua/kg aire seco)	11,37	21,09
PVP (kpa)	1,446	2,644

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

HR = Humedad relativa

PVP = Presión parcial de vapor de agua

Y = Humedad absoluta (g de agua/kg aire seco)

Tbs = Temperatura del bulbo seco

Tbh = Temperatura del bulbo húmedo

Para una cantidad de almidón de papa de 172,674 g la relación de cantidad de materia seca (P) es de 93,036 g.

Por lo tanto, para calcular la cantidad de masa de aire seco se utiliza la ecuación (III-16), citada por (Singh & Heldman, 2009).

$$G = \frac{(0,9673-0,0599)*93,036}{21,09-11,37}$$

$$G = 8,685 \text{ kg de aire seco}$$

Para calcular de masa de agua evaporada se tomó en cuenta la siguiente ecuación:

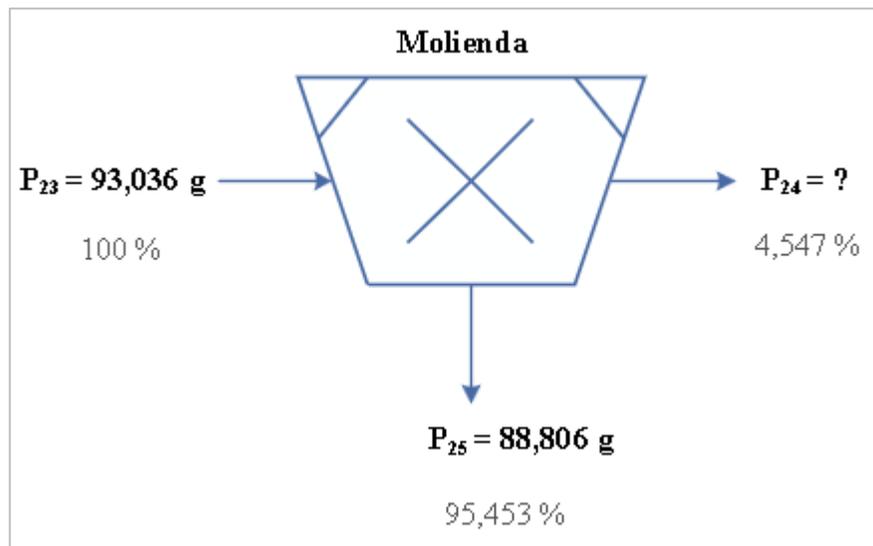
$$AE = (X_{22} - X_{23}) * P \quad (\text{Ecuación III- 18})$$

$$AE = (0,9673 - 0,0599) * 93,036$$

$$AE = 84,42 \text{ g de agua evaporada}$$

#### **3.4.1.10 Balance de materia en la etapa de molienda del almidón de papa**

En la Figura III-12, se muestra el balance de materia en la etapa de molienda del almidón seco. En la etapa ingresa  $P_{23} = 93,036$  g y se obtiene  $P_{25} = 88,806$  g de almidón molido (masa determinada en una balanza analítica).



**Figura III-12** Balance de materia en la etapa de molienda del almidón seco

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_{23}$  = Cantidad de almidón seco (g)

$P_{24}$  = Cantidad de pérdida de almidón seco (g)

$P_{25}$  = Cantidad de almidón seco molido (g)

Balance de materia global en la etapa de molienda del almidón de papa seco:

$$P_{23} = P_{24} + P_{25} \quad (\text{Ecuación III- 19})$$

Balance parcial de la cantidad de pérdida de almidón seco:

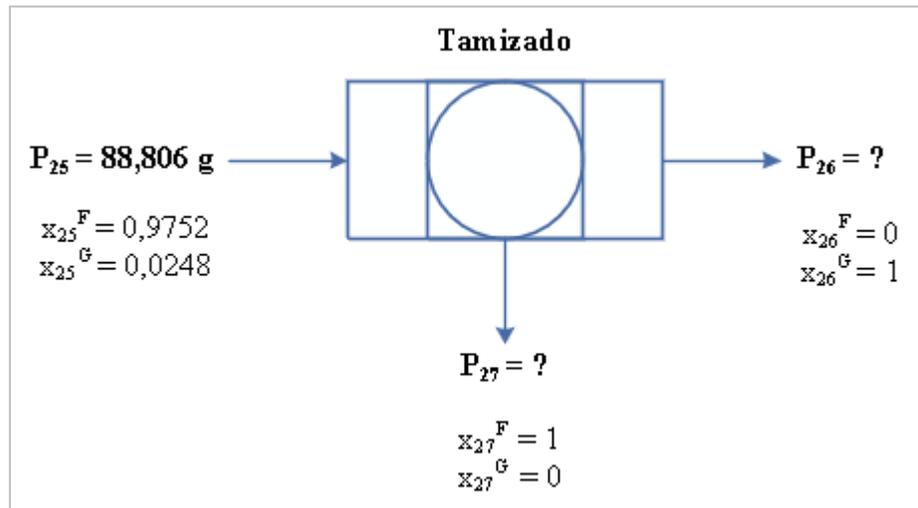
$$P_{24} = P_{23} - P_{25}$$

$$P_{24} = 93,036 - 88,806$$

$$P_{24} = 4,23 \text{ g de pérdida de almidón seco}$$

#### **3.4.1.11 Balance de materia en la etapa de tamizado del almidón de papa**

En la Figura III-13, se muestra el balance de materia en la etapa de tamizado, para tal efecto se realizó con  $P_{25} = 88,806 \text{ g}$  de almidón proveniente de la etapa de molienda.



**Figura III-13** Balance de materia en la etapa de tamizado del almidón seco molido

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$P_{25}$  = Cantidad de almidón seco molido (g)

$P_{26}$  = Cantidad retenida de almidón seco molido(g)

$P_{27}$  = Cantidad de almidón seco molido en el tamizado (g)

$x_{25}^F$  = Fracción de los componentes finos en la corriente  $P_{25}$

$x_{25}^G$  = Fracción de los componentes gruesos en la corriente  $P_{25}$

$x_{26}^F$  = Fracción de los componentes finos en la corriente  $P_{26}$

$x_{26}^G$  = Fracción de los componentes gruesos en la corriente  $P_{26}$

$x_{27}^F$  = Fracción de los componentes finos en la corriente  $P_{27}$

$x_{27}^G$  = Fracción de los componentes gruesos en la corriente  $P_{27}$

Balance de materia global en la etapa de tamizado del almidón seco molido:

$$P_{25} = P_{26} + P_{27} \quad (\text{Ecuación III- 20})$$

Balance parcial para la cantidad de componentes finos en la etapa de tamizado del almidón seco molido.

$$P_{25} * x_{25}^F = P_{26} * x_{26}^F + P_{27} * x_{27}^F$$

$$88,806 * 0,9752 = P_{26} * 0 + P_{27} * 1$$

$$P_{27} = 86,604 \text{ g de almidón fino seco tamizado}$$

Balance parcial para la cantidad de componentes gruesos en la etapa de tamizado del almidón seco molido.

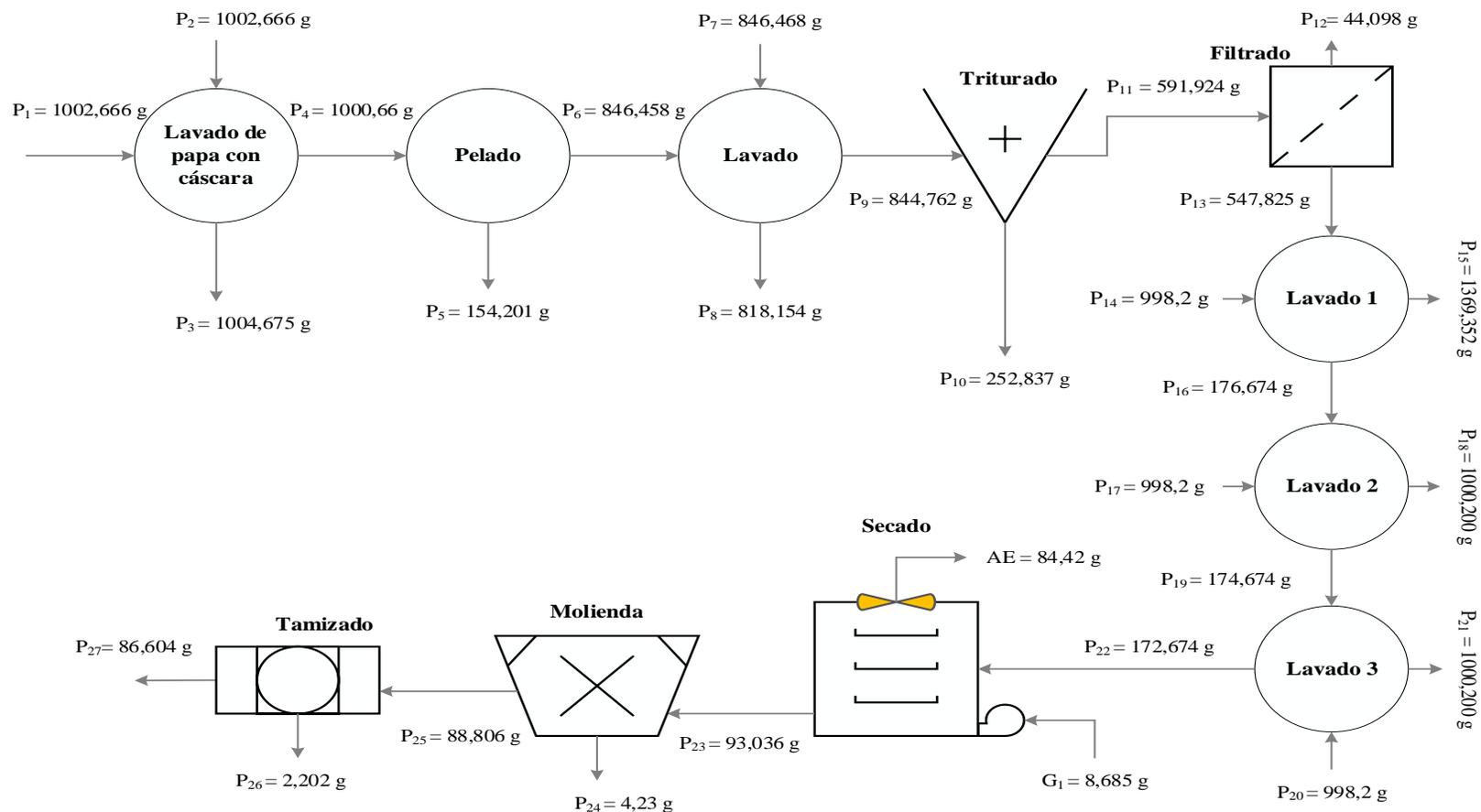
$$P_{25} * x_{25}^G = P_{26} * x_{26}^G + P_{27} * x_{27}^G$$

$$88,806 * 0,0248 = P_{26} * 1 + 85,660 * 0$$

$$P_{26} = 2,202 \text{ g de almidón grueso seco retenido en el tamizado}$$

### 3.4.2 Resumen general de balance de materia en el proceso de acondicionamiento de la materia prima

En la Figura III-14, se muestra el resumen general del balance de materia para el acondicionamiento de la materia prima.

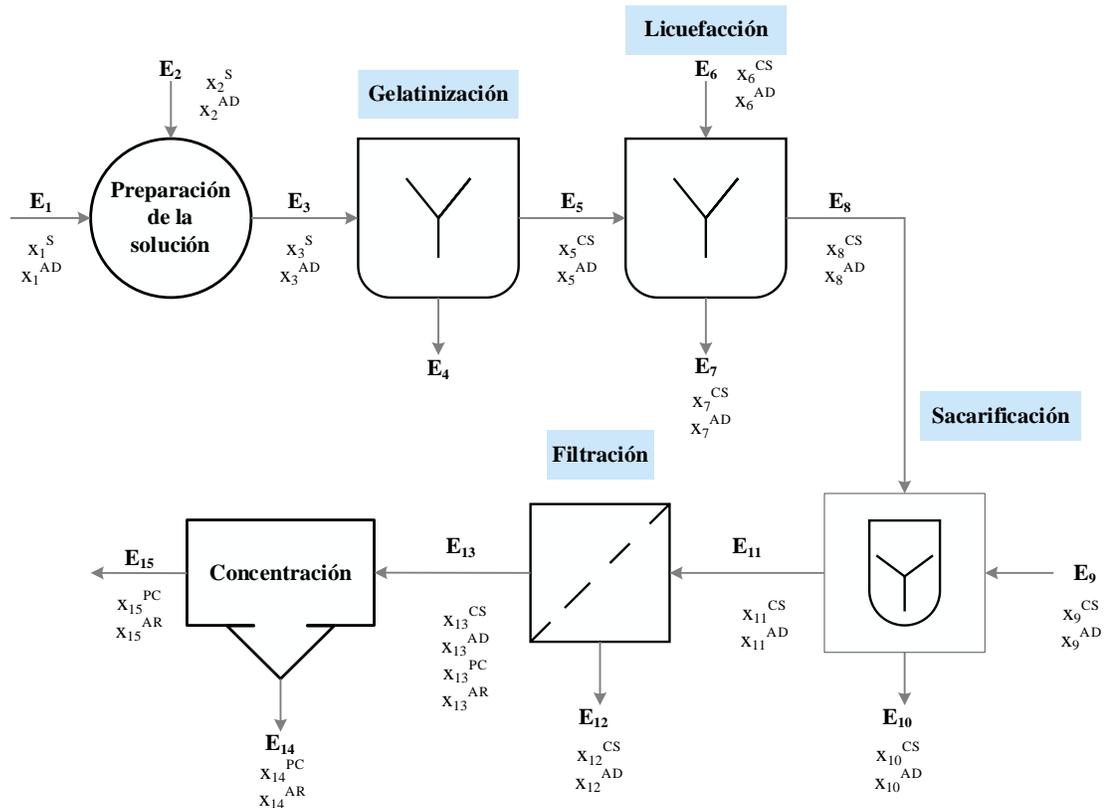


**Figura III-14** Resumen general del balance de materia para el acondicionamiento de la materia prima.

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 3.4.3 Balance de materia en la hidrólisis enzimática

El balance de materia del proceso de hidrólisis enzimática, se realizó para una base de cálculo de 25 g de almidón de papa y para su resolución se realizó de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura III-15.

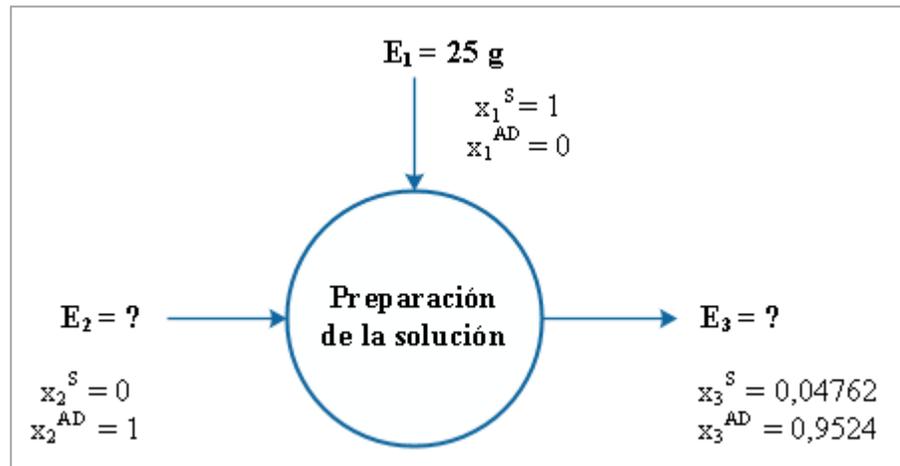


**Figura III-15** Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de hidrólisis enzimática.

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

#### 3.4.3.1 Balance de materia en la etapa de preparación de la solución de almidón

Para dar inicio al proceso de hidrólisis enzimática, se trabajó con 25 gramos de almidón de papa (sustrato) y 500 ml de agua. La Figura III-16, muestra el balance de materia en la etapa de preparación de la solución de almidón.



**Figura III-16** Balance de materia en la etapa de preparación de la solución

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$E_1$  = Cantidad de sustrato (g)

$E_2$  = Cantidad de agua (g)

$E_3$  = Cantidad de solución preparada (g)

$x_1^S$  = Fracción de sustrato en la corriente  $E_1$

$x_1^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_1$

$x_2^S$  = Fracción de sustrato en la corriente  $E_2$

$x_2^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_2$

$x_3^S$  = Fracción de sustrato en la corriente  $E_3$

$x_3^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_3$

$E_2$  = Cantidad de agua (g) = 500 ml \* 0,9982 g/ml

$E_2 = 499,1$  g de agua

Balance de materia global en la etapa de preparación de la solución de almidón:

$$E_1 + E_2 = E_3$$

(Ecuación III- 21)

Balance parcial para la cantidad de la solución de almidón:

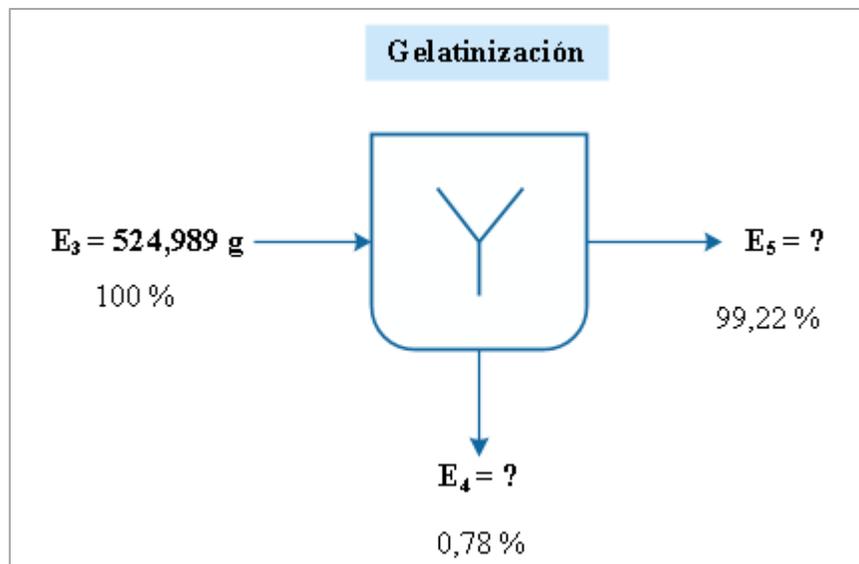
$$E_1 * x_1^S + E_2 * x_2^S = E_3 * x_3^S$$

$$25 * 1 + 499,1 * 0 = E_3 * 0,04762$$

$$E_3 = 524,989 \text{ g de la solución de almidón}$$

### 3.4.3.2 Balance de materia en la etapa de gelatinización del almidón de papa

En la Figura III-17, se muestra el balance de materia en la etapa de gelatinización partiendo de  $E_3 = 524,989 \text{ g}$  de solución.



**Figura III-17** Balance de materia en la etapa de gelatinización de la solución  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$E_3$  = Cantidad de solución preparada (g)

$E_4$  = Pérdida en el proceso de gelatinización (g)

$E_5$  = Cantidad de solución gelatinizada (g)

Balance de materia global en la etapa de gelatinización de la solución:

$$E_3 = E_4 + E_5 \quad (\text{Ecuación III- 22})$$

Para el cálculo de  $E_5$ , se tomó en cuenta el porcentaje de almidón gelatinizado:

$$E_5 = E_3 * (0,9922)$$

$$E_5 = 524,989 * 0,9922$$

$$E_5 = 520,894 \text{ g de solución gelatinizada}$$

Para el cálculo de  $E_4$ , se tomó en cuenta el porcentaje de pérdida:

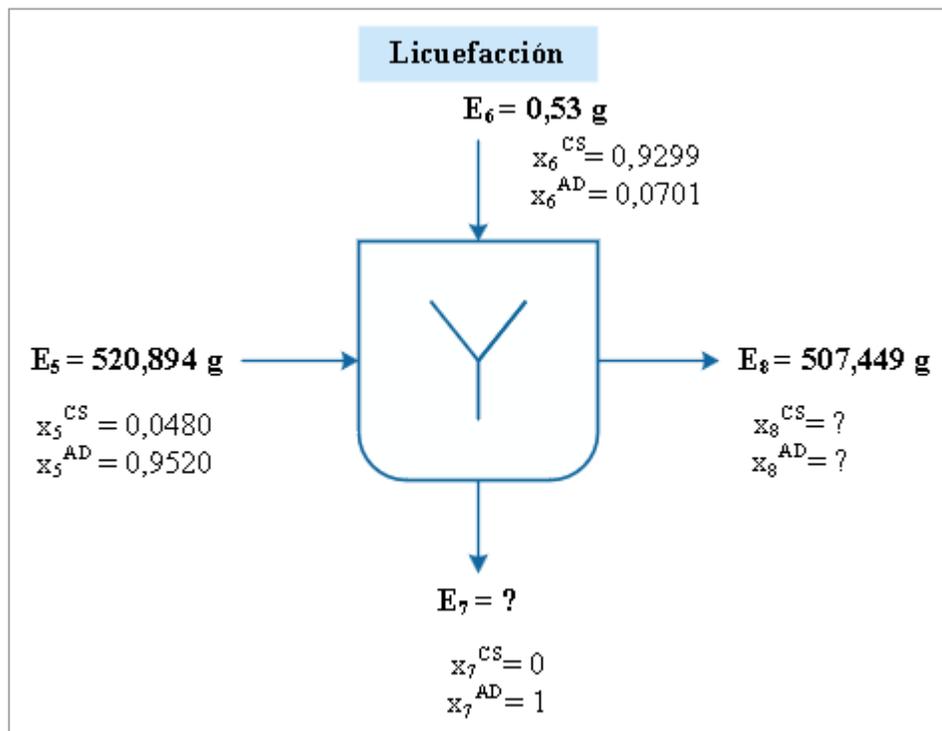
$$E_4 = E_3 * (0,0078)$$

$$E_4 = 524,989 * 0,0078$$

$$E_4 = 4,095 \text{ g de pérdida en la etapa de gelatinizada}$$

### 3.4.3.3 Balance de materia en la etapa de licuefacción del almidón de papa

En la Figura III-18, se muestra el balance de materia en la etapa de licuefacción. El producto obtenido en esta etapa es  $E_8 = 507,449 \text{ g}$  (masa determinada en balanza analítica).



**Figura III-18** Balance de materia en la etapa de licuefacción

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$E_5$  = Cantidad de solución gelatinizada (g)

$E_6$  = Corriente de dosificación en la etapa de licuefacción (g)

$E_7$  = Cantidad de pérdida en la etapa de licuefacción (g)

$E_8$  = Cantidad de producto de licuefacción (g)

$x_5^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_5$

$x_5^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_5$

$x_6^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_6$

$x_6^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_6$

$x_7^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_7$

$x_7^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_7$

$x_8^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_8$

$x_8^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_8$

En la corriente  $E_6$ , ingresa 0,03 g de  $\text{CaCl}_2$  y 0,5 g de enzima  $\alpha$ -amilasa, dando un total de 0,53 g.

Balance de materia global en la etapa de licuefacción:

$$E_5 + E_6 = E_7 + E_8 \quad (\text{Ecuación III- 23})$$

Balance parcial para los componentes sólidos en la etapa de licuefacción:

$$E_5 * x_5^{CS} + E_6 * x_6^{CS} = E_7 * x_7^{CS} + E_8 * x_8^{CS}$$

$$520,894 * 0,0480 + 0,53 * 0,9299 = E_7 * 0 + 507,449 * x_8^{CS}$$

$$x_8^{CS} = 0,0502 \text{ fracción sólida en la corriente } E_8$$

Entonces, la fracción de agua en la corriente  $E_8$ :

$$x_8^{AD} = 1 - x_8^{CS} = 1 - 0,0502 = 0,9498$$

Balance parcial para la pérdida en la etapa de licuefacción:

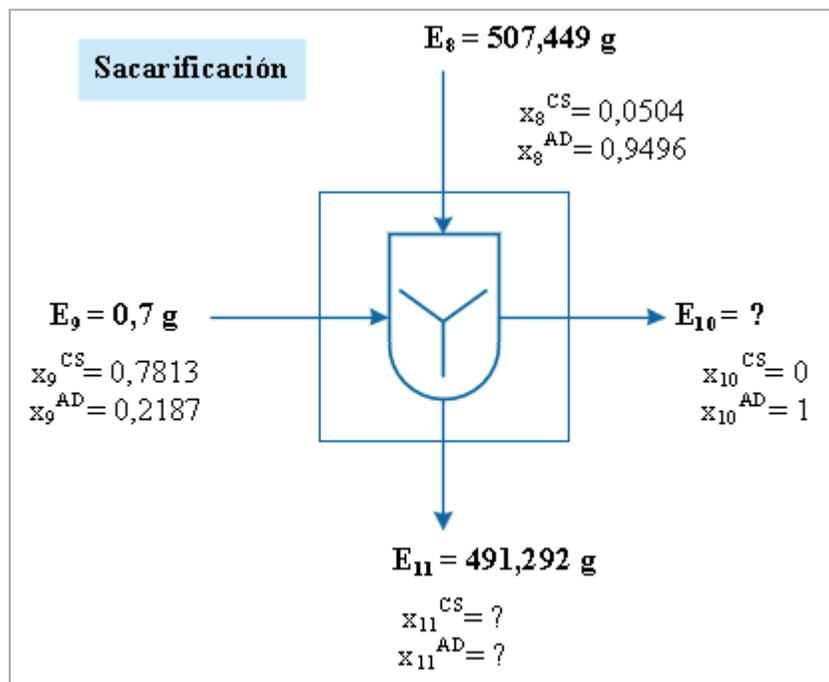
$$E_5 * x_5^{AD} + E_6 * x_6^{AD} = E_7 * x_7^{AD} + E_8 * x_8^{AD}$$

$$520,894 * 0,9520 + 0,53 * 0,0701 = E_7 * 1 + 507,449 * 0,9498$$

$$E_7 = 13,953 \text{ g de pérdida en la etapa de licuefacción}$$

#### 3.4.3.4 Balance de materia en la etapa de sacarificación del almidón de papa

En la Figura III-19, se muestra el balance de materia en la etapa de sacarificación. Obteniendo como  $E_{11} = 491,292 \text{ g}$  de producto sacarificado (masa determinada en balanza analítica).



**Figura III-19** Balance de materia en la etapa de sacarificación

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$E_8$  = Cantidad de producto de licuefacción (g)

$E_9$  = Corriente de dosificación en la etapa de sacarificación (g)

$E_{10}$  = Cantidad de pérdida en la etapa de sacarificación (g)

$E_{11}$  = Cantidad de producto de sacarificación (g)

$x_8^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_8$

$x_8^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_8$

$x_9^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_9$

$x_9^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_9$

$x_{10}^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_{10}$

$x_{10}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_{10}$

$x_{11}^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_{11}$

$x_{11}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_{11}$

En la corriente  $E_9$ , ingresa 0,7 g de enzima glucoamilasa.

Balance de materia global en la etapa de sacarificación:

$$E_8 + E_9 = E_{10} + E_{11} \quad (\text{Ecuación III- 24})$$

Balance parcial para los componentes sólidos en la etapa de sacarificación:

$$E_8 * x_8^{CS} + E_9 * x_9^{CS} = E_{10} * x_{10}^{CS} + E_{11} * x_{11}^{CS}$$

$$507,449 * 0,0502 + 0,7 * 0,7813 = E_{10} * 0 + 491,292 * x_{11}^{CS}$$

$$x_{11}^{CS} = 0,053 \text{ fracción sólida en la corriente } E_{11}$$

Entonces, la fracción de agua en la corriente  $E_{11}$ :

$$x_{11}^{AD} = 1 - x_{11}^{CS} = 1 - 0,053 = 0,947$$

Balance parcial en pérdidas en la etapa de sacarificación:

$$E_8 * x_8^{AD} + E_9 * x_9^{AD} = E_{10} * x_{10}^{AD} + E_{11} * x_{11}^{AD}$$

$$507,449 * 0,9498 + 0,7 * 0,2187 = E_{10} * 1 + 491,293 * 0,947$$

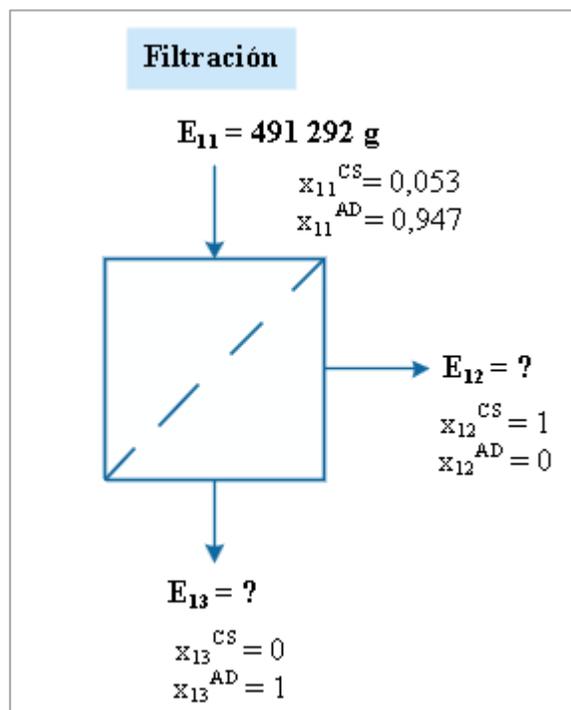
$E_{10} = 16,87$  g de pérdidas en la etapa de sacarificación

En esta etapa de sacarificación, es necesario determinar la cantidad de azúcares reductores presentes en los 491,292 g corriente de salida  $E_{11}$ .

De la Tabla III-2, se sabe que la cantidad de azúcares reductor promedio es de 4,73 g presentes en 100 g de producto de sacarificación, esto quiere decir que la cantidad de azúcares reductores presente en la corriente  $E_{11}$  es igual a 23,238 g.

### 3.4.3.5 Balance de materia en la etapa de filtración

En la Figura III-20, se muestra el balance de materia en la etapa de filtración partiendo de  $E_{11} = 491,292$  g el producto de sacarificación.



**Figura III-20** Balance de materia en la etapa de filtración

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$E_{11}$  = Cantidad de producto de sacarificación (g)

$E_{12}$  = Cantidad de sedimento en la etapa de filtración (g)

$E_{13}$  = Cantidad de producto filtrado en la etapa de filtración (g)

$x_{11}^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_{11}$

$x_{11}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_{11}$

$x_{12}^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_{12}$

$x_{12}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_{12}$

$x_{13}^{CS}$  = Fracción de componentes sólidos en la corriente  $E_{13}$

$x_{13}^{AD}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_{13}$

Balance de materia general en la etapa de filtración del producto de sacarificación:

$$E_{11} = E_{12} + E_{13} \quad (\text{Ecuación III- 25})$$

Balance parcial para el sedimento en la etapa de filtración del producto de sacarificación:

$$E_{11} * x_{11}^{CS} = E_{12} * x_{12}^{CS} + E_{13} * x_{13}^{CS}$$

$$491,292 * 0,053 = E_{12} * 1 + E_{13} * 0$$

$$E_{12} = 26,038 \text{ g de sedimento proveniente de la filtración}$$

Balance parcial para el producto filtrado:

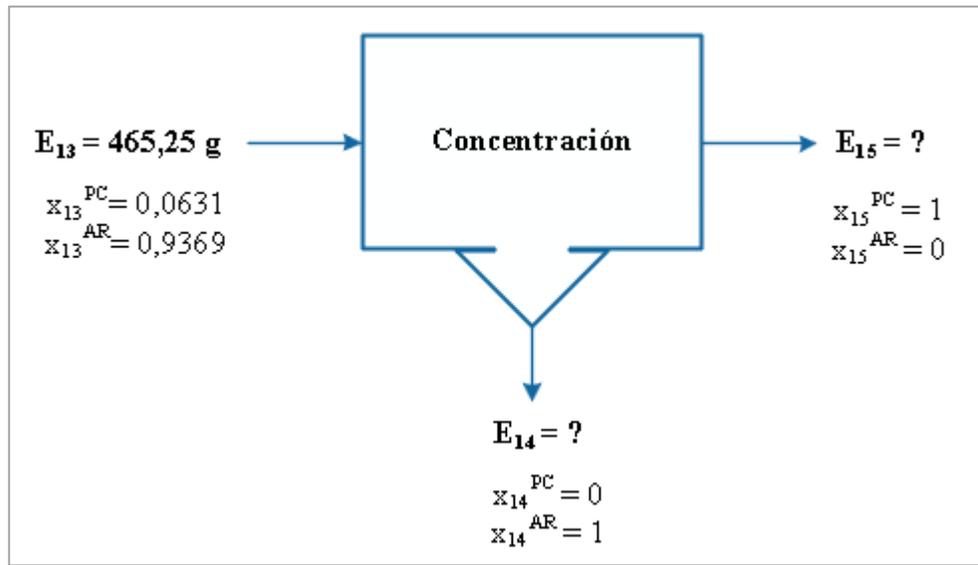
$$E_{11} * x_{11}^{AD} = E_{12} * x_{12}^{AD} + E_{13} * x_{13}^{AD}$$

$$491,292 * 0,947 = 26,530 * 0 + E_{13} * 1$$

$$E_{13} = 465,25 \text{ g de producto filtrado}$$

#### 3.4.3.6 Balance de materia en la etapa de concentración

En la Figura III-21, se muestra el balance de materia en la etapa de concentración partiendo de  $E_{13} = 465,25$  g del producto de filtrado.



**Figura III-21** Balance de materia en la etapa de concentración

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$E_{13}$  = Cantidad de producto filtrado (g)

$E_{14}$  = Cantidad de vapor de agua desprendida en la etapa de concentración (g)

$E_{15}$  = Cantidad de producto concentrado (jarabe glucosado) (g)

$x_{13}^{PC}$  = Fracción de producto concentrado en la corriente  $E_{13}$

$x_{13}^{AR}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_{13}$

$x_{14}^{PC}$  = Fracción de producto concentrado en la corriente  $E_{14}$

$x_{14}^{AR}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_{14}$

$x_{15}^{PC}$  = Fracción de producto concentrado en la corriente  $E_{15}$

$x_{15}^{AR}$  = Fracción de agua en la corriente  $E_{15}$

Balance de materia general en la etapa de concentración:

$$E_{13} = E_{14} + E_{15} \quad (\text{Ecuación III- 26})$$

Balance parcial para el producto concentrado:

$$E_{13} * x_{13}^{PC} = E_{14} * x_{14}^{PC} + E_{15} * x_{15}^{PC}$$

$$465,25 * 0,0631 = E_{14} * 0 + E_{15} * 1$$

$$E_{15} = 29,357 \text{ g de producto concentrado}$$

Balance parcial para el vapor de agua:

$$E_{13} * x_{13}^{AR} = E_{14} * x_{14}^{AR} + E_{15} * x_{15}^{AR}$$

$$465,25 * 0,9369 = E_{14} * 1 + 29,357 * 0$$

$$E_{14} = 435,893 \text{ g de vapor de agua}$$

#### 3.4.4 Determinación del rendimiento

Tomando en cuenta que la masa de almidón es de:

$$E_1 = 25 \text{ g (masa de almidón)}$$

Almidón + 0,0566 agua → 1,0566 glucosa

$$m_{\text{glucosa teórica}} = 25 * 1,0566 = 26,415 \text{ g}$$

Rendimiento: g de glucosa por g de almidón

Sabiendo que el porcentaje de azúcares reductores es del 4,73 % expresados en glucosa, se determina la cantidad de glucosa presente en el producto hidrolizado:

$$m_{\text{glucosa}} = \% \text{ Azucares reductores} * 500$$

$$m_{\text{glucosa}} = 0,0473 * 500$$

$$m_{\text{glucosa}} = 23,650 \text{ g}$$

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{m_{\text{glucosa}}}{m_{\text{almidón}}} = \frac{23,650 \text{ g}}{25 \text{ g}} = 0,946$$

Finalmente encontramos la cantidad de jarabe glucosado:

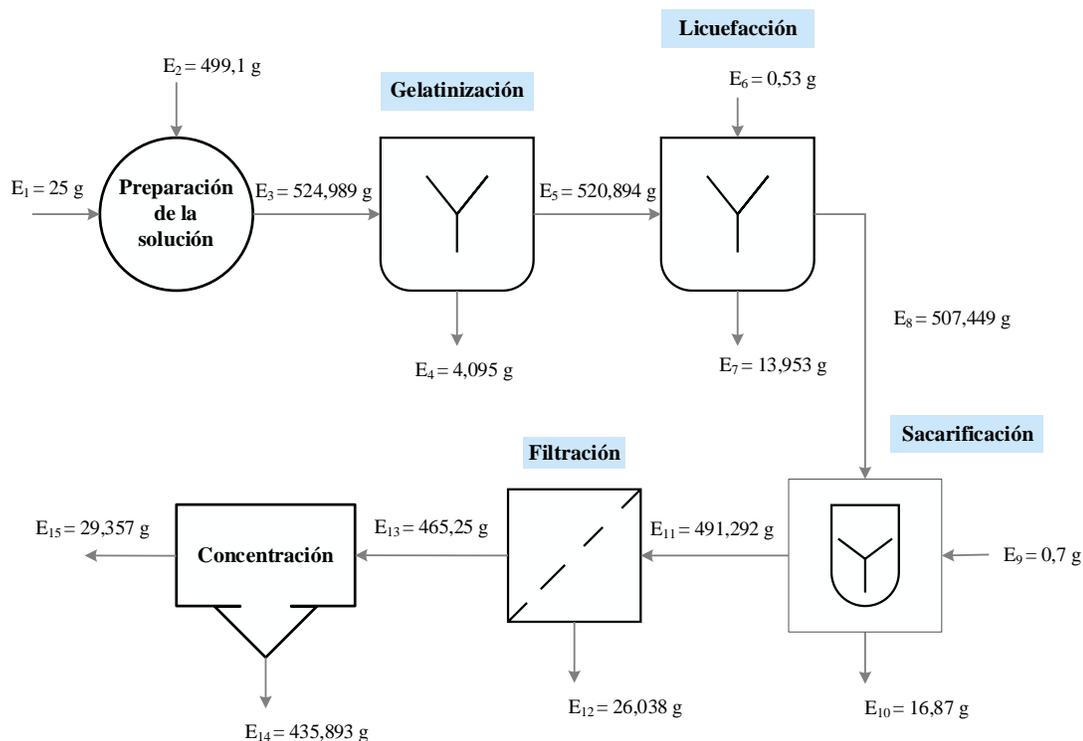
$$\% \text{Rendimiento} = \frac{m_{\text{glucosa real}}}{m_{\text{glucosa teórica}}} * 100$$

$$\% \text{Rendimiento} = \frac{23,650}{26,415} * 100$$

$$\% \text{Rendimiento} = 89,53 \%$$

### 3.4.5 Resumen general del balance de materia en el proceso de hidrólisis enzimática para la obtención de jarabe glucosado

En la Figura III-22, se muestra el resumen general del balance de materia en la etapa de la hidrólisis enzimática



**Figura III-22** Resumen general del balance de materia para el proceso de hidrólisis enzimática.

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### 3.5 Balance de energía para la obtención de jarabe glucosado

Para realizar el balance de energía se deben considerar los procesos que impliquen un intercambio de energía dentro del sistema.

Aplicando la primera ley de la termodinámica “Ley de la conservación de la energía”. Si la frontera de un sistema no permite el transporte de materia entre el sistema y sus

alrededores, entonces se dice que el sistema es cerrado, descrita mediante la siguiente ecuación. (Smith & Abbott, 1996)

$$\Delta E_{\text{cinética}} + \Delta E_{\text{potencial}} + \Delta U = Q + W \quad (\text{Ecuación III- 27})$$

Los sistemas cerrados a menudo experimentan procesos donde la de energía cinética y potencial son tan pequeños que pueden considerarse a estos como despreciables, sino solamente en su energía interna. (Smith & Abbott, 1996)

$$\Delta E_{\text{cinética}} + \Delta E_{\text{potencial}} = 0$$

Como el sistema se encuentra en un estado estacionario el volumen se mantiene constante por lo cual no se efectúa el trabajo en el sistema. (Smith & Abbott, 1996)

$$W = 0$$

Entonces la ecuación es:

$$\Delta U = Q \quad (\text{Ecuación III- 28})$$

$$Q_{\text{cedido}} = Q_{\text{ganado}}$$

Según (Smith & Abbott, 1996), para un sistema estacionario a volumen constante el calor sensible y latente es igual a:

$$Q_{\text{Sensible}} = m C_p \Delta T \quad (\text{Ecuación III- 29})$$

$$Q_{\text{latente}} = m * \lambda \quad (\text{Ecuación III- 30})$$

Donde:

$m$  = Masa del componente (kg)

$C_p$  = Capacidad calorífica (kcal/ kg °C)

$\Delta T$  = Diferencial de temperatura (°C)

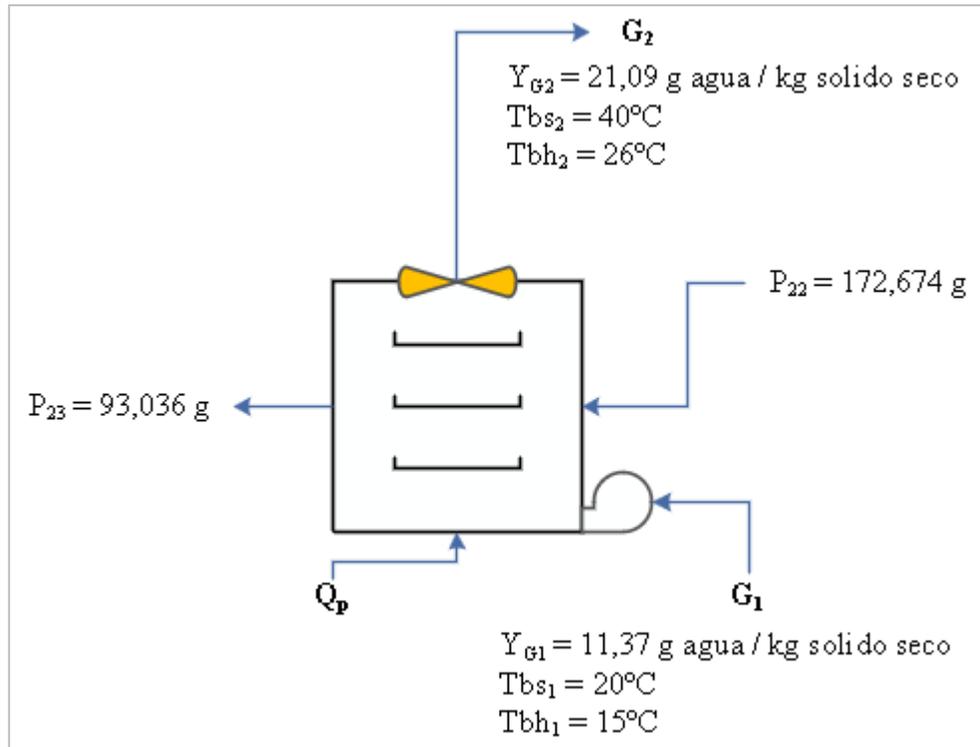
$T_f$  = Temperatura final (°C)

$T_i$  = Temperatura inicial (°C)

$\lambda$  = Calor latente de vaporización (kcal/kg)

### 3.5.1 Balance de energía en la etapa de secado del almidón de papa

En la Figura III-23, se muestra el balance de energía para el almidón de papa. Así mismo, se obtuvieron valores de humedad relativa, temperatura del bulbo seco y temperatura del bulbo húmedo de la Tabla III-7.



**Figura III-23** Balance de energía en la etapa del secado de almidón de papa  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde los datos son:

$P_{22}$  = Cantidad de almidón de papa (g)

$P_{23}$  = Cantidad de almidón de papa seco (g)

$G_1$  = Cantidad de aire caliente a la entrada del secador (g)

$Y_{G_1}$  = Humedad absoluta (kg de agua/ kg aire seco)

$T_{bs_1}$  = Temperatura de bulbo seco a la entrada del secador ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{bh_1}$  = Temperatura de bulbo húmedo a la entrada del secador ( $^\circ\text{C}$ )

$G_2$  = Cantidad de aire húmedo a la salida del secador (g)

$Y_{G2}$  = Humedad absoluta (kg de agua/ kg aire seco)

$T_{bs2}$  = Temperatura de bulbo seco a la salida del secador (°C)

$T_{bh2}$  = Temperatura de bulbo húmedo a la salida del secador (°C)

Balance combinado de materia y energía en el proceso de secado, a continuación, se detalla la ecuación (III-31) según (Valiente, 1994).

$$P_{22} H_{22} + G_1 H_{G1} + Q_P = P_{23} H_{23} + G_2 H_{G2} \quad (\text{Ecuación III- 31})$$

Considerando un sistema abierto tenemos:

$$G_1 = G_2 = G$$

$$P_{22} = P_{23} = P$$

Reemplazando P y G en la ecuación (III-31), se obtiene:

$$P H_{22} + G H_{G1} + Q_P = P H_{23} + G H_{G2} \quad (\text{Ecuación III- 32})$$

Donde:

G = Cantidad de aire (kg aire seco)

P = Cantidad de producto (kg)

$H_{22}$  = Entalpía del producto al ingreso del secadero (kJ/kg sólido seco)

$H_{23}$  = Entalpía del producto a la salida del secadero (kJ/kg sólido seco)

$H_{G1}$  = Entalpía del aire al ingreso del secadero (kJ/kg sólido seco)

$H_{G2}$  = Entalpía del aire a la salida del secadero (kJ/kg sólido seco)

$Q_P$  = Calor aportado al sistema (kJ)

Despejando  $Q_P$  y ordenando las variables de la ecuación (III-32), se tiene:

$$Q_P = G (H_{G2} - H_{G1}) + P (H_{23} - P_{22}) \quad (\text{Ecuación III- 33})$$

Para calcular la entalpía del aire, se tomó en cuenta la ecuación (III-34), mencionada por (Singh & Heldman, 2009).

$$H_a = C_S (T_a - T_0) + YH_L \quad (\text{Ecuación III- 34})$$

Donde:

$C_S$  = Calor húmedo (kJ/kg de aire seco °C)

$T_a$  = Temperatura del aire °C

$T_0$  = Temperatura de referencia, igual a 0°C

$Y$  = Humedad absoluta (kg agua/kg de aire seco)

$H_L$  = Calor latente de vaporización del agua (kJ/kg de agua)

Para calcular el calor húmedo del aire, se tomó en cuenta la ecuación (III-35) mencionada por (Singh & Heldman, 2009), donde: el calor específico del aire seco es de 1,005 (kJ/kg aire seco °C) y el calor específico para el agua 1,88 (kJ/kg agua °C).

$$C_S = 1,005 + 1,88 Y \quad (\text{Ecuación III- 35})$$

Reemplazando la ecuación (III-34) en (III-35), se tiene:

$$H_a = (1,005 + 1,88 Y) (T_a - T_0) + YH_L \quad (\text{Ecuación III- 36})$$

Ajustando los datos de la ecuación (III-36) a presión de la ciudad de Tarija está dada (610 mmHg), se obtiene el calor específico del aire seco 0,81 (kJ/kg aire seco °C) y el calor específico del agua es 1,51 (kJ/kg agua °C), mencionado por (López, 2021).

Entonces la ecuación queda de la siguiente manera:

$$H_a = (0,81 + 1,51 Y) (T_a - T_0) + YH_L \quad (\text{Ecuación III- 37})$$

Reemplazando datos en la ecuación (III-37), para determinar la entalpía del aire a la entrada del secador.

Donde:

$H_L$  = 2454,1 kJ/kg entalpía del agua a 20 °C (ver Anexo F)

$$Y_{G1} = 0,0113 \text{ kg de agua/ kg aire seco}$$

$$T_{G1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_{G1} = \left[ 0,81 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] + \left[ 1,51 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * 0,0113 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] \right] (20-0) \text{ }^\circ\text{C} + 0,0113 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] * 2454,1 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$H_{G1} = 44,271 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Reemplazando datos en la ecuación (III-37), para determinar la entalpía del aire a la salida del secador.

Donde:

$$H_L = 2406,7 \text{ kJ/kg entalpía del agua a } 40 \text{ }^\circ\text{C (ver Anexo F)}$$

$$Y_{G2} = 0,0211 \text{ kg de agua/ kg aire seco}$$

$$T_{G2} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_{G2} = \left[ 0,81 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] + 1,51 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * 0,0211 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] \right] (40-0) \text{ }^\circ\text{C} + 0,0211 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] * 2406,7 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$H_{G2} = 84,455 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Para calcular la entalpía del producto, se tiene la ecuación (III-38):

$$H_P = C_{Pp} (T_P - T_0) + X_P C_{PX} (T_P - T_0) \quad (\text{Ecuación III- 38})$$

Donde:

$$C_{Pp} = \text{Calor específico del producto (kJ/kg } ^\circ\text{K)}$$

$$T_P = \text{Temperatura del producto (} ^\circ\text{K)}$$

$$X_P = \text{Humedad del producto (kg agua/kg sólido seco)}$$

$$C_{PX} = \text{Calor específico del agua (kJ/kg agua } ^\circ\text{K)}$$

Para calcular el calor específico de cualquier tipo de alimento, se procede a partir de la ecuación (III-39) citada por (Singh & Heldman, 2009)

$$C_{pp} = x_c * C_{pc} + x_r * C_{pr} + x_g * C_{pg} + x_m * C_{pm} + x_w * C_{pw} \quad (\text{Ecuación III- 39})$$

Donde:

$C_{pc} = 1,4$  (kJ/kg °K) = Calor específico de los carbohidratos (Lewis, 1993)

$C_{pm} = 0,8$  (kJ/kg °K) = Calor específico de las cenizas (Lewis, 1993)

$C_{pg} = 1,7$  (kJ/kg °K) = Calor específico de las grasas (Lewis, 1993)

$C_{pp} = 1,6$  (kJ/kg °K) = Calor específico de las proteínas (Lewis, 1993)

$C_{pw} = 4,18$  (kJ/kg °K) = Calor específico del agua (Lewis, 1993)

$x_c$  = Fracción másica de los carbohidratos

$x_m$  = Fracción másica de las cenizas

$x_g$  = Fracción másica de la grasa

$x_p$  = Fracción másica de la proteína

$x_w$  = Fracción másica del agua

Reemplazando los valores en la ecuación (III-39), se obtiene:

$$C_{pp} = x_c * 1,4 + x_p * 1,6 + x_g * 1,7 + x_m * 0,8 + x_w * 4,18 \quad (\text{Ecuación III- 40})$$

En la Tabla III-9, muestra los datos de la composición fisicoquímica del almidón de papa, estos valores son utilizados para calcular el calor específico del almidón se tomó en cuenta de los datos de la Tabla II-1.

**Tabla III-9: Datos de la composición fisicoquímica del almidón de papa**

Componentes	Símbolo	Fracción másica
Cenizas	$x_m$	0,0032
Grasa	$x_g$	0,0013
Hidratos de carbono	$x_c$	0,9345
Humedad	$x_w$	0,0566
Proteína	$x_p$	0,0044

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Reemplazando valores de la Tabla III-8, en la ecuación (III-40), se tiene:

$$C_p = 0,9345 * 1,4 + 0,0044 * 1,6 + 0,0013 * 1,7 + 0,0032 * 0,8 + 0,0566 * 4,18$$

$$C_p = 1,557 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right] \text{ del almidón}$$

A partir de la ecuación (III-38), se obtiene la entalpía de la muestra de almidón de papa en la entrada del secador:

$$H_{22} = 1,557 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right] (293,15 - 0) ^\circ\text{K} + 0,9673 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] * 4,18 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right] * (293,15 - 0) ^\circ\text{K}$$

$$H_{22} = 1641,732 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Para calcular el calor específico del almidón seco, reemplazando datos en la ecuación (III-31).

$$T_p = 313,15 ^\circ\text{K}$$

$$H_{23} = 1,557 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right] (313,15 - 0) ^\circ\text{K} + 0,0495 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] * 4,18 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \right] * (313,15 - 0) ^\circ\text{K}$$

$$H_{23} = 552,368 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Reemplazando datos en la ecuación (III-33), se tiene:

$$Q_p = 8,635 \text{ kg} * (84,455 - 44,271) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] + 0,092 \text{ kg} * (552,368 - 1641,732) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

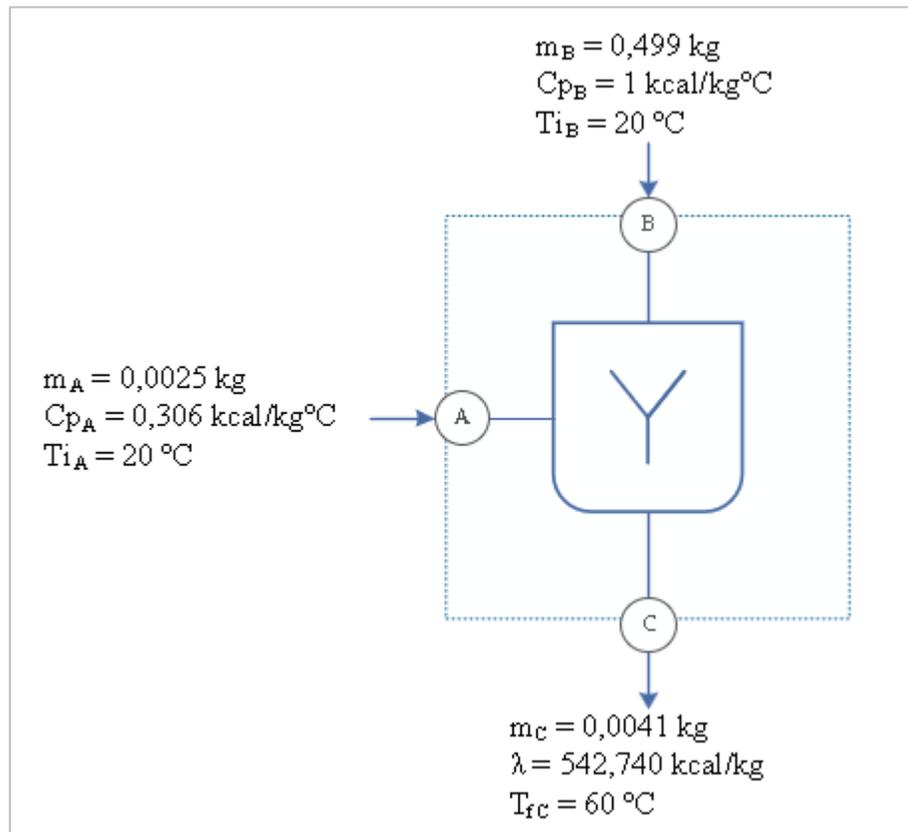
$$Q_p = 246,767 \text{ kJ}$$

$$Q_P = 58,93 \text{ kcal}$$

El calor necesario para el proceso de secado del almidón de papa es de 58,93 kcal.

### 3.5.2 Balance de energía en la etapa de gelatinización

Para calcular el balance de energía requerida en la etapa de gelatinización, se debe determinar el calor sensible debido al calentamiento del agua desde 20 °C hasta 60°C con la presencia de almidón seco, este proceso se realizó en un calentador con agitación magnética. En la Figura III-24, representa el sistema utilizado para el proceso de gelatinización.



**Figura III-24** Balance de energía en la etapa de gelatinización

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

La energía total que requiere el sistema para llevar a cabo el proceso de gelatinización es:

$$Q_G = Q_{SG} + Q_{LG} + E_{CMG} \quad (\text{Ecuación III- 41})$$

Donde:

$Q_G$  = Calor total que se requiere en el proceso de gelatinización (kcal)

$Q_{SG}$  = Calor sensible de gelatinización (kcal)

$Q_{LG}$  = Calor latente para evaporar el agua en la etapa de gelatinización (kcal)

Partiendo de la ecuación (III-29), el calor sensible requerido para la etapa de gelatinización es:

$$Q_{SG} = m_A * C_{pA} * (T_f - T_i) + m_B * C_{pB} * (T_f - T_i) \quad (\text{Ecuación III- 42})$$

Donde:

$m_A$  = Masa de almidón seco molido = 0,025 kg

$C_{pA}$  = Capacidad calorífica del almidón = 0,372 kcal/kg °C

$m_B$  = masa de agua presente en la gelatinización = 0,499 kg

$C_{pB}$  = Capacidad calorífica del agua, 1,0 kcal/kg °C (Chang, 1999)

$m_C$  = masa de vapor de agua = 0,0041 kg

$E_{CMG}$  = Energía requerida por el calentador magnético en la etapa de gelatinización (kcal)

$\lambda$  = Calor latente de vaporización del agua = 542,740 kcal/kg, a la presión de la ciudad de Tarija. (Smith & Abbott, 1996)

Reemplazando valores en la ecuación (III-42):

$$Q_{SG} = 0,025 \text{ kg} * 0,372 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * (60 - 20) ^\circ\text{C} + 0,499 \text{ kg} * 1 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * (60 - 20) ^\circ\text{C}$$

$$Q_{SG} = 20,332 \text{ kcal}$$

Partiendo de la ecuación (III-30), el calor latente para evaporar el agua en la etapa de gelatinización es:

$$Q_{LG} = m_C * \lambda \quad (\text{Ecuación III- 43})$$

Reemplazando valores en la ecuación (III-43):

$$Q_{IG} = 0,0041 \text{ kg} * 542,740 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]$$

$$Q_{IG} = 2,225 \text{ kcal}$$

Es necesario determinar la energía requerida para la calefacción del sistema del calentador. Por tanto, se utilizó la siguiente ecuación citada por (Valiente, 1994).

$$P = \frac{E}{t} \quad (\text{Ecuación III- 44})$$

Donde:

P = Potencia eléctrica (kW)

E = Energía consumida en una unidad de tiempo (kWh)

t = Tiempo (h)

Partiendo de la ecuación (III-44), la energía requerida para el sistema de calefacción del calentador es:

$$E_{CMG} = P * t$$

$$E_{CMG} = 0,08 \text{ kW} * 0,25 \text{ h}$$

$$E_{CMG} = 0,020 \text{ kWh} = 17,208 \text{ kcal}$$

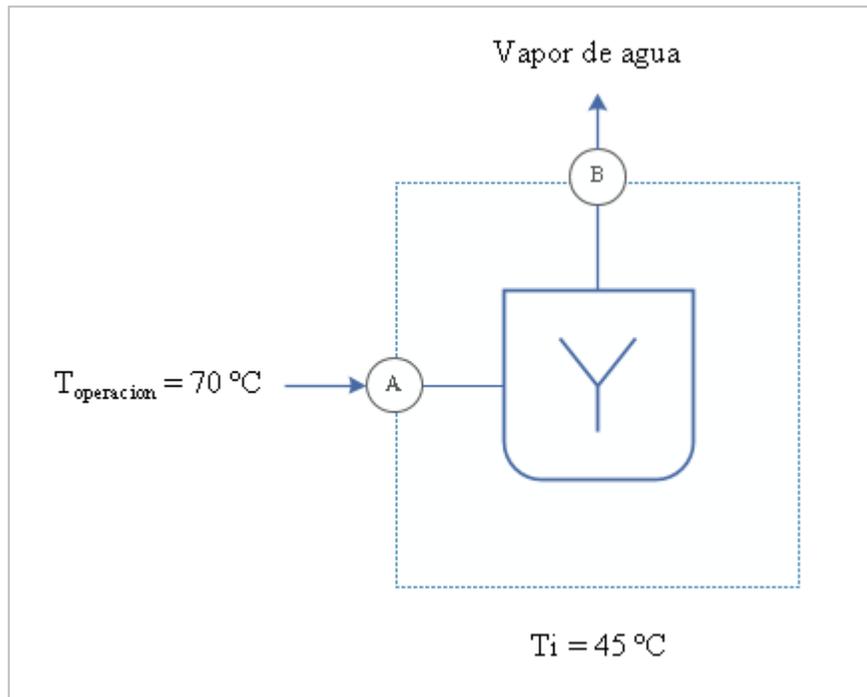
Reemplazando valores en la ecuación (III-42), la energía total que requiere el sistema para llevar a cabo el proceso de gelatinización es:

$$Q_G = 20,332 \text{ kcal} + 2,225 \text{ kcal} + 17,208 \text{ kcal}$$

$$Q_G = 39,765 \text{ kcal}$$

### 3.5.3 Balance de energía en el proceso de licuefacción

En esta etapa de licuefacción existe una transferencia de energía simultánea en forma de calor hacia el sistema, a través de una resistencia eléctrica por baño maría. El sistema utilizado para la etapa de licuefacción está dado por la Figura III-25.



**Figura III-25** Balance de energía en la etapa de licuefacción

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

La energía total requerida para llevar a cabo el proceso de licuefacción es:

$$Q_L = Q_{SL} + Q_{LL} + E_{BML} + E_{A1} \quad (\text{Ecuación III- 45})$$

Donde:

$Q_L$  = Calor requerido para llevar a cabo la de licuefacción (kcal)

$Q_{SL}$  = Calor sensible en la etapa de licuefacción (kcal)

$Q_{LL}$  = Calor latente en la etapa de licuefacción (kcal)

$E_{BML}$  = Energía requerida por el baño maría en la etapa de licuefacción (kcal)

$E_{A1}$  = Energía requerida para la agitación mecánica en la etapa de licuefacción (kcal)

Partiendo de la ecuación (III-29), el calor sensible requerido en la etapa de licuefacción es:

$$Q_{SL} = m_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * (T_f - T_i) + m_{HA} * C_{p_{HA}} * (T_f - T_i) \quad (\text{Ecuación III- 46})$$

Donde los datos son:

$$m_{HA} = \text{masa de almidón seco molido} = 0,025 \text{ kg}$$

$$C_{pHA} = \text{capacidad calorífica del almidón seco} = 0,372 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$m_{H_2O} = \text{masa de agua presente en la licuefacción} = 0,496 \text{ kg}$$

$$C_{pH_2O} = \text{capacidad calorífica del agua, } 1,0 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} \text{ (Chang, 1999).}$$

$$m_{VA} = \text{masa de vapor de agua} = 0,014 \text{ kg}$$

$$\lambda_{H_2O} = \text{Calor latente de vaporización del agua} = 542,740 \text{ kcal/kg, a la presión de la ciudad de Tarija. (Smith \& Abbott, 1996)}$$

Reemplazando valores en la ecuación (III-53):

$$Q_{SL} = 0,496 \text{ kg} * 1 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * (70 - 45) ^\circ\text{C} + 0,025 \text{ kg} * 0,372 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * (70 - 45) ^\circ\text{C}$$

$$Q_{SL} = 12,633 \text{ kcal}$$

Partiendo de la ecuación (III-31), el calor latente para evaporar el agua en la etapa de licuefacción es:

$$Q_{LL} = m_{VA} * \lambda_{H_2O} \quad (\text{Ecuación III- 47})$$

Reemplazando valores en la ecuación (III-47):

$$Q_{LL} = 0,014 \text{ kg} * 542,740 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]$$

$$Q_{LL} = 7,598 \text{ kcal}$$

La energía requerida para el baño maría en la etapa de licuefacción, se determina mediante la ecuación (III-44), reemplazando valores:

$$E_{BML} = P * t$$

$$E_{BML} = 0,105 \text{ kW} * 1 \text{ h}$$

$$E_{BML} = 0,105 \text{ kWh} = 90,344 \text{ kcal}$$

Es necesario determinar la energía requerida para la agitación mecánica en la etapa de licuefacción mediante la ecuación (III-44), reemplazando valores:

Donde:

$P$  = Potencia eléctrica (kW)

$E$  = Energía consumida en una unidad de tiempo (kWh)

$t$  = Tiempo (h)

Partiendo de la ecuación (III-44), la energía requerida para el sistema de calefacción del baño maría es:

$$E_{A1} = P * t$$

$$E_{A1} = 0,105 \text{ kW} * 1 \text{ h}$$

$$E_{A1} = 0,105 \text{ kWh} = 90,388 \text{ kcal}$$

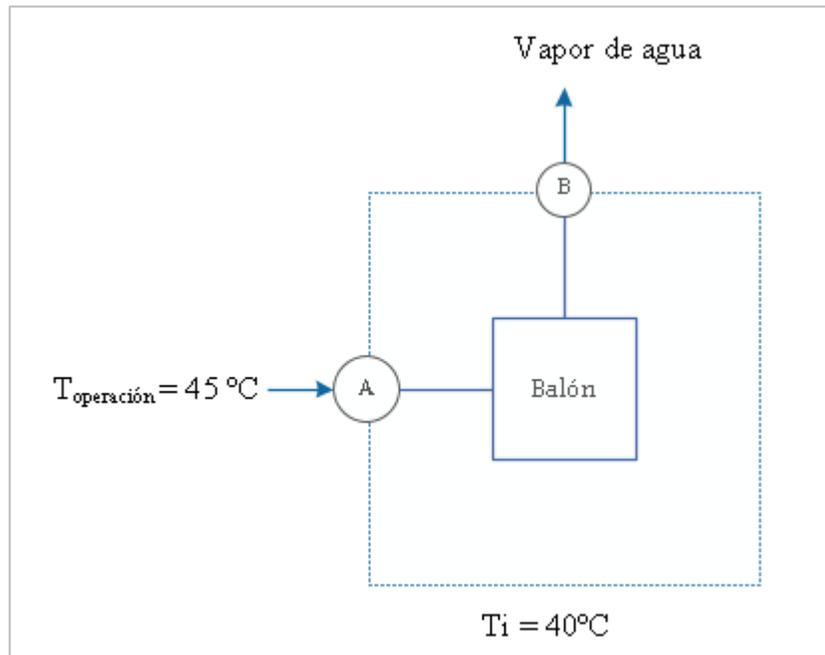
Partiendo de la ecuación (III-45), la energía requerida en el proceso de licuefacción es:

$$Q_L = 12,633 \text{ kcal} + 7,598 \text{ kcal} + 90,344 \text{ kcal} + 90,344 \text{ kcal}$$

$$Q_L = 200,919 \text{ kcal}$$

#### **3.5.4 Balance de energía en el proceso de sacarificación del almidón**

En esta etapa de sacarificación existe una transferencia de energía simultánea en forma de calor hacia el sistema, a través de una resistencia eléctrica por baño maría. El sistema utilizado para la etapa de sacarificación está dado por la Figura III-26.



**Figura III-26** Balance de energía en la etapa de sacarificación  
**Fuente:** Elaboración propia, 2022

La energía total requerida para llevar a cabo el proceso de sacarificación está dada por:

$$Q_S = Q_{SS} + Q_{LS} + E_{BMS} + E_{AB} \quad (\text{Ecuación III- 48})$$

Donde:

$Q_S$  = Calor total que requiere la etapa de sacarificación (kcal)

$Q_{SS}$  = Calor sensible en la etapa de sacarificación (kcal)

$Q_{LS}$  = Calor latente en la etapa de sacarificación (kcal)

$E_{RS}$  = Energía requerida por el baño maría en la etapa de sacarificación (kcal)

$E_{AB}$  = Energía requerida para la agitación mecánica en la etapa de sacarificación (kcal)

Partiendo de la ecuación (III-29), el calor sensible requerido en la etapa de sacarificación es:

$$Q_{SS} = m_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * (T_f - T_i) + m_{HA} * C_{p_{HA}} * (T_f - T_i) \quad (\text{Ecuación III- 49})$$

Donde:

$m_{HA}$  = masa de almidón seco molido = 0,015 kg

$C_{p_{HA}}$  = Capacidad calorífica del almidón seco molido = 0,372 kcal/kg °C,

$m_{H_2O}$  = masa de agua presente en la sacarificación = 0,473 kg

$C_{p_{H_2O}}$  = Capacidad calorífica del agua, 1,0 kcal/kg °C (Chang, 1999).

$m_v$  = masa de vapor de agua = 0,017 kg

$\lambda$  = Calor latente de vaporización del agua = 542,740 kcal/kg, a la presión atmosférica de la Ciudad de Tarija. (Smith & Abbott, 1996)

Partiendo de la ecuación (III-49), el calor sensible en la etapa de sacarificación:

$$Q_{SS} = 0,473 \text{ kg} * 1 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * (45-40)^\circ\text{C} + 0,015 \text{ kg} * 0,372 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * (45-40)^\circ\text{C}$$

$$Q_{SS} = 2,393 \text{ kcal}$$

Partiendo de la ecuación (III-29), el calor latente para evaporar el agua en la etapa de sacarificación es:

$$Q_{LS} = m_{VA} * \lambda_{H_2O} \quad (\text{Ecuación III- 50})$$

Reemplazando valores en la ecuación (III-50):

$$Q_{LS} = 0,017 \text{ kg} * 542,740 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]$$

$$Q_{LS} = 9,226 \text{ kcal}$$

La energía requerida para el evaporador rotativo en la etapa de sacarificación, se determina mediante la ecuación (III-44), reemplazando valores:

$$E_{RS} = P * t$$

$$E_{RS} = 0,92 \text{ kW} * 2 \text{ h}$$

$$E_{RS} = 1,84 \text{ kWh} = 1583,175 \text{ kcal}$$

Por tanto, reemplazando valores en la ecuación (III-48) la energía requerida en el proceso de sacarificación es:

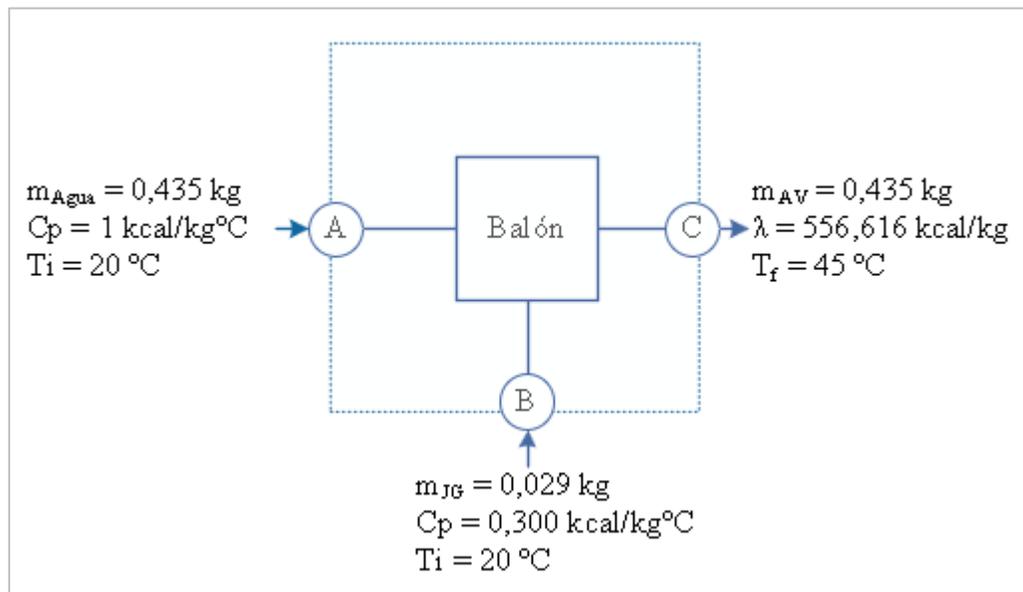
$$Q_S = 2,393 \text{ kcal} + 9,226 \text{ kcal} + 1583,175 \text{ kcal}$$

$$Q_S = 1594,794 \text{ kcal}$$

### 3.5.5 Balance de energía en el proceso de concentración del jarabe

La energía utilizada en el rotavapor es igual a la suma de la energía necesaria para generar el vapor dentro del balón de evaporación, más el calor retirado por el agua de enfriamiento del condensador. Esta parte del proceso se dividió en dos sistemas para una mayor comprensión.

En la Figura III-27, se representa el balón en cual se llevará a cabo la separación de los componentes presentes en la muestra.



**Figura III-27** Balance de energía en la etapa de concentración

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Donde:

$m_{\text{Agua}}$  = masa del agua presente en el balón

$C_{p\text{Agua}}$  = Capacidad calorífica del agua, (Chang, 1999)

$m_{JG}$  = masa de glucosa presente en el balón 0,0294 kg

$C_{pJG}$  = Capacidad calorífica de jarabe glucosado, 0,3003 kcal / kg °C,

$m_{AV}$  = masa del agua evaporada 0,435 kg

$\lambda$  = Calor latente de vaporización del agua = 556,616 kcal/kg, valor mencionado por (Smith & Abbott, 1996).

El calor total que se requiere en el balón es:

$$Q_B = Q_{SB} + Q_{LB} \quad (\text{Ecuación III- 51})$$

Donde:

$Q_B$  = Calor total en el balón del sistema (kcal)

$Q_{SB}$  = Calor sensible de la mezcla en el balón (kcal)

$Q_{LB}$  = Calor latente de la mezcla en el balón (kcal)

Partiendo de la ecuación (III-29), el calor sensible para subir la temperatura de la mezcla a ebullición:

$$Q_{SB} = m_{\text{Agua}} * C_{p_{\text{Agua}}} * (T_f - T_i) + m_{JG} * C_{p_{JG}} * (T_f - T_i) \quad (\text{Ecuación III- 52})$$

Reemplazando valores en la ecuación (III-52):

$$Q_{SB} = 0,435 \text{ kg} * 1 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * (45-20)^\circ\text{C} + 0,0294 \text{ kg} * 0,300 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * (45-20)^\circ\text{C}$$

$$Q_{SB} = 11,096 \text{ kcal}$$

Partiendo de la ecuación (III-30), el calor latente para evaporar el agua:

$$Q_{LB} = m_{VA} + \lambda_{H_2O} \quad (\text{Ecuación III- 53})$$

$$Q_{LB} = 0,435 \text{ kg} * 556,616 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right]$$

$$Q_{LB} = 242,128 \text{ kcal}$$

La energía requerida para el evaporador rotativo en la etapa de concentración, se determina mediante la ecuación (III-44), reemplazando valores.

$$E_{RS} = P * t$$

$$E_{RS} = 0,92 \text{ kW} * 1,5 \text{ h}$$

$$E_{RS} = 1,38 \text{ kWh} = 1187,381 \text{ kcal}$$

Reemplazando valores en la ecuación (III-51), el calor total que se requiere en el balón:

$$Q_B = 11,096 \text{ kcal} + 242,128 \text{ kcal} + 1187,381 \text{ kcal}$$

$$Q_B = 1440,605 \text{ kcal}$$

### 3.6 Energía empleada para cada equipo utilizado en el proceso para la obtención de jarabe glucosado

Es importante determinar el cálculo de energía consumida en función de la potencia de cada equipo empleado durante el desarrollo de la fase experimental.

En la Tabla III-10, se presentan las condiciones de operación en las que se hace uso de cada equipo. Las características de cada equipo son adquiridas de las placas de información de cada uno (ver Tabla II-11).

**Tabla III-10: Potencia y tiempo de operación para cada equipo empleado**

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo de operación (h)
Secadero de tiro forzado	1,1	8
Molino de martillos	1,0	0,167
Calentador con agitación magnética	0,08	0,25
Tamiz vibratorio	0,92	0,333
Agitador mecánico	0,105	1
Evaporador rotativo	0,92	3,5

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

En la Tabla III-11, se aprecia el valor de la energía empleada por cada equipo utilizado.

**Tabla III-11: Energía consumida para cada equipo utilizado.**

<b>Equipo</b>	<b>Energía empleada (kWh)</b>
Secadero de tiro forzado	8,8
Molino de martillos	0,167
Calentador con agitación magnética	0,020
Tamiz vibratorio	0,306
Agitador mecánico	0,105
Evaporador rotativo	3,22

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

### **3.7 Caracterización del producto obtenido**

En la Tabla III-12, se muestra los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico realizado, en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID); pertenecientes a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (Anexo E).

La muestra seleccionada para análisis es la “muestra 6” por presentar un mayor valor en azúcares reductores como variable respuesta. Las características fisicoquímicas del jarabe glucosado obtenido en la parte experimental del presente proyecto de investigación y algunos parámetros que se encuentran como referencia bibliográfica se comparan a continuación.

**Tabla III-12: Resultado de la composición fisicoquímica del jarabe glucosado**

N°	Parámetros	Unidad	Resultado obtenido	Límites permisibles	
				NB 38023	Norma Mexicana
1	Cenizas	%	0,25	-	Máx.: 3
2	Densidad relativa	g/ml	1,4559	Min.: 1,37 g/ml	-
3	Fibra	%	n.d	-	-
4	Grasa	%	n.d	-	-
5	Hidratos de carbono	%	74,77	-	-
6	Humedad	%	24,73	-	-
7	Proteína total (N <sub>x6,25</sub> )	%	0,25	-	-
8	Sólidos solubles	°Brix	62,90	-	Min.: 59,1
9	Valor energético	kcal/100 g	232,51	-	-

*n.d: No detectado*

**Fuente:** CEANID, 2022; IBNORCA, 2017; Normas Mexicanas, Dirección General de Normas, 2016

En la Tabla III-13, se muestra los resultados obtenidos del análisis microbiológico realizado, en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID); pertenecientes a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (Anexo E). Al mismo tiempo se verifica los resultados de los parámetros analizados de acuerdo a la Norma Boliviana y Norma Mexicana.

**Tabla III-13: Resultado del análisis microbiológico del jarabe glucosado**

N°	Parámetros	Unidad	Resultado	Límite permisible	
				IBNORCA NB 38023	Norma Mexicana
1	Coliformes totales	UFC/g	<1,0 x 10 <sup>1</sup> (*)	Max.: 1,0 x 10 <sup>2</sup>	Max.: 1,0 x 10 <sup>2</sup>
2	Mohos y levaduras	UFC/g	<1,0 x 10 <sup>1</sup> (*)	Max.: 1,0 x 10 <sup>2</sup>	Max.: 1,0 x 10 <sup>2</sup>

*(\*) No se observa desarrollo de colonias*

**Fuente:** CEANID, 2022; IBNORCA, 2017; Normas Mexicanas, Dirección General de Normas, 2016

Según la Tabla III-13 se puede observar que el producto obtenido (jarabe glucosado) está dentro de los límites permisibles de acuerdo a la Norma Boliviana y Norma Mexicana.

### 3.8 Evaluación sensorial del producto obtenido

Para la evaluación sensorial del jarabe glucosado, se realizó a la muestra ganadora siendo la “muestra 6”, en la evaluación sensorial participaron diferentes jueces que evaluaron cuatro parámetros principales como ser: olor, color, apariencia y sabor, dicha evaluación se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Carrera de Ingeniería Química (ver Anexo G).

Cabe resaltar que el producto obtenido fue sometido a análisis sensorial, con una escala hedónica de 5 puntos de valorización la misma que se presenta en la Tabla III-14.

**Tabla III-14: Escala hedónica**

Nº	Escala	Puntuación
1	Excelente	5
2	Muy bueno	4
3	Bueno	3
4	Aceptable	2
5	Desagradable	1

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

Una vez que está definida la escala hedónica se da una puntuación de 0 a 100 a los atributos que los 10 jueces van a calificar a cada muestra, para realizar una mejor interpretación estadística.

**Tabla III-15: Valor porcentual de los atributos evaluados.**

Nº	Atributo	Valoración porcentual %
1	Olor	20
2	Color	20
3	Apariencia	20
4	Sabor	40
<b>Total</b>		<b>100</b>

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

En la Tabla III-15 se presentan a los atributos con su respectiva valoración porcentual dando un total de 100 %, para obtener una gráfica representativa.

### 3.8.1 Resultado de la prueba organoléptica

La Tabla III-16 muestra el puntaje que los jueces atribuyeron a cada atributo organoléptico evaluado.

**Tabla III-16: Resultados de la evaluación organoléptica**

N° de juez	Olor	Color	Apariencia	Sabor
1	3	3	4	3
2	4	3	4	4
3	3	4	5	5
4	2	3	3	4
5	4	3	3	4
6	4	5	3	5
7	3	3	2	4
8	4	4	5	3
9	3	4	3	4
10	4	3	5	3
<b>Σ Xi</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>37</b>	<b>39</b>
<b>Promedio Xi</b>	<b>3,4</b>	<b>3,5</b>	<b>3,7</b>	<b>3,9</b>

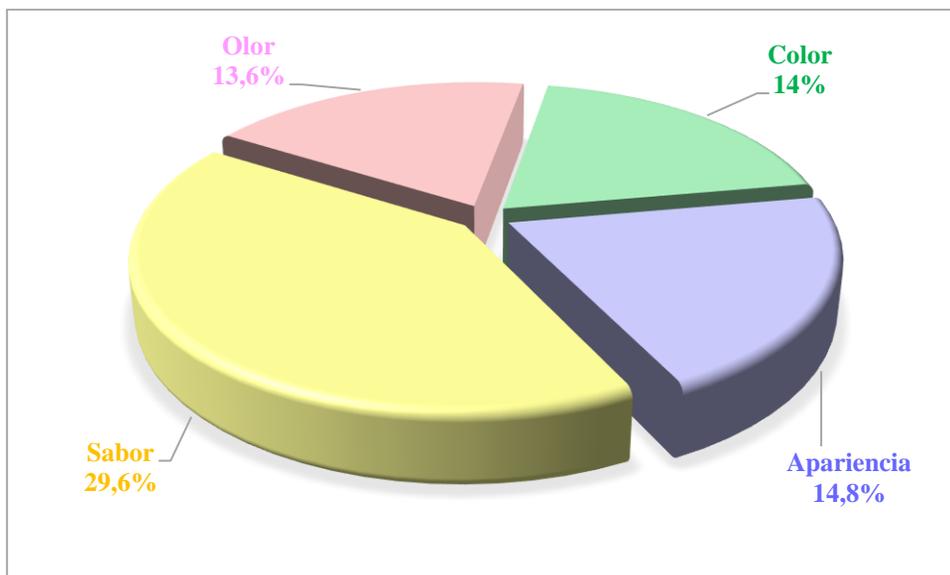
Fuente: Elaboración propia, 2022

La Tabla III-17 muestra el total de los resultados porcentuales que los jueces atribuyeron a cada atributo organoléptico.

**Tabla III-17: Resultado de la prueba organoléptica para cada atributo**

N°	Atributo	Valor Porcentual de cada atributo	Unidad	Resultado Final
1	Olor	20	%	13,6
2	Color	20	%	14
3	Apariencia	20	%	14,8
4	Sabor	40	%	29,6
<b>Total</b>		<b>100</b>	<b>%</b>	<b>72</b>

Fuente: Elaboración propia, 2022



**Figura III-28** Resultados de la evaluación organoléptica

**Fuente:** Elaboración propia, 2022

De acuerdo a la evaluación sensorial realizada se puede ver en la Figura III-28, el atributo sabor con 29,6 % tiene mejor aceptación por los jueces, seguido del atributo apariencia con 14,8 %, mientras que el atributo color con 14 % y en menor porcentaje se tiene al atributo olor con 13,6 %.

## **CAPÍTULO IV**

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### 4.1 Conclusiones

- Se determinó los parámetros fisicoquímicos del almidón de papa presenta: azúcares totales 0,09%, cenizas 0,32%; grasa 0,13%; hidratos de carbono 93,45 %; humedad 5,66%; proteína total 0,44% y valor energético 376,73 kcal/100g. Para los parámetros microbiológicos presentaron: bacterias aerobias mesófilas  $6,8 \times 10^3$  UFC/g, coliformes totales  $<1,0 \times 10^1$  UFC/g, mohos y levaduras  $3,4 \times 10^3$  UFC/g.
- Se realizó la selección del método para el proceso de hidrólisis a través de una matriz de decisión comparando los siguientes métodos: hidrólisis acida e hidrólisis enzimática. Los evaluados fueron: aplicabilidad del proceso, generación de subproductos y residuos, costos, confiabilidad del proceso, complejidad de operación del proceso, influencia de la temperatura y facilidad de conseguir el equipo en laboratorio; obteniendo el método con mayor puntaje de 84/100 la hidrólisis enzimática.
- Se aplicó el diseño factorial  $2^3$  en la etapa de sacarificación donde, los niveles de cada factor son: pH (4,0 y 5,0), temperatura (45 y 60) °C y cantidad de enzima glucoamilasa (0,5 y 0,7) g y la variable respuesta es el porcentaje de azúcares reductores. En el análisis estadístico del diseño experimental, mediante IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) versión 21.0 para Windows, los resultados demostraron que el factor pH tiene un nivel de significancia igual a 0,008, mientras que el factor cantidad de enzima tiene una significancia de 0,001 y la interacción de temperatura – cantidad de enzima es de 0,008. Por tanto, estos factores y la interacción influyen directamente de manera significativa en la etapa de sacarificación porque es menor a 0,05.
- Se seleccionó la (muestra 6) por presentar un mayor valor en cuanto a porcentaje de azúcares reductores de 4,73 %.
- Se determinó los parámetros fisicoquímicos del producto final presentan: cenizas de 0,25%; densidad relativa de 1,4559 g/ml; hidratos de carbono de 74,77%; humedad de 24,73%; proteína total de 0,25%; sólidos solubles de 62,9 °Brix y valor

energético de 232,51 kcal/100g, resultados que se encuentran dentro de los límites permisibles de la NB 38023 y Norma Mexicana.

- Los parámetros microbiológicos del producto final presentaron: coliformes totales  $<1,0 \times 10^1$  UFC/g, mohos y levaduras  $<1,0 \times 10^1$  UFC/g, resultados que se encuentran dentro de los límites permisibles según NB 38023 y Norma Mexicana.
- Se desarrolló el balance de materia y energía para la obtención del jarabe glucosado con la finalidad de saber la cantidad de energía consumida para el presente trabajo de investigación.
- Se determinó el rendimiento a nivel experimental es del 89,53% de jarabe glucosado como resultado del balance de materia.
- Se realizó la evaluación sensorial al producto final donde el atributo sabor presenta un puntaje 29,6 % tiene mejor aceptación por los jueces, seguido del atributo apariencia con 14,8 %, mientras que el atributo color con 14 % y en menor porcentaje se tiene al atributo olor con 13,6 %.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Se recomienda realizar trabajos de investigación de la obtención de jarabe glucosado que involucre la incorporación de otras variedades de papa u otro tipo de tubérculo producido en el departamento de Tarija.
- Se recomienda la continuación de investigación sobre la obtención de jarabe glucosado para mejorar de alguna manera sus propiedades fisicoquímicas y organolépticas.
- Se recomienda implementar una planta piloto para la obtención de jarabe glucosado en la Provincia Arce, en el Municipio de Padcaya, del Departamento de Tarija, para poder ofrecer un producto innovador a la población y coadyuvar a mayor producción de la papa.