

# **INTRODUCCIÓN**

## ANTECEDENTES

Los plásticos son polímeros orgánicos compuestos por unidades que se repiten (monómeros), pueden deformarse hasta conseguir una forma deseada por medio de métodos como la extrusión, moldeo, hilado, etc. Se caracterizan por su alta relación resistencia/densidad, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes. (Rodríguez, F. D. 2012).

Antes de fabricarse plásticos, la naturaleza era la única que proveía al hombre de materiales para la realización de sus herramientas y objetos de uso cotidiano. Con el pasar de años se realizaron investigaciones con las cuales se llegaron a fabricar polímeros, como la goma, etc.

Desde la fabricación de los primeros plásticos, su uso aumentó en forma gradual llegándose a convertir en un material insustituible para la sociedad, y en su mayoría son producidos a partir del procesamiento de combustibles fósiles llegando a generar contaminantes afectando directamente el medio ambiente, motivo por el cual creció la demanda y la necesidad de un producto sustituto y menos contaminante. Se realizaron distintos estudios para disminuir las consecuencias negativas del uso de plástico, desde su composición hasta la utilización de productos similares como nuevas alternativas de tratamientos y tecnología, y es de este modo que nace el bioplástico, un compuesto de alto peso molecular, obtenido a partir de recursos renovables tales como el almidón, celulosas, etc.

En 1976, la compañía británica Imperial Chemical Industries (ICI) creó el primer producto que se comercializaría como bioplástico, y en 1983 Biopol<sup>Σ</sup> fue presentado como el primer polímero totalmente biodegradable. (ZEAplast, 2012).

En la actualidad, en el ámbito internacional, en países como Ecuador, México, España y Estados Unidos la comunidad científica ha trabajado en la fabricación de biopolímeros a base de una variedad de materias primas como almidón de maíz, papa, caña de azúcar, plátano, pectina, yuca y papel. En las investigaciones realizadas se

obtuvieron biopolímeros con todas las materias primas a excepción del almidón de maíz hidrolizado, a pesar de que su contenido de amilosa es similar al del almidón nativo, el biopolímero a base de maíz nativo no cuenta con propiedades fisicoquímicas y mecánicas aptas para obtener un prototipo de alguna forma en molde. En los proyectos en los cuales se agregó glicerina como plastificante se tuvo mejores resultados, en comparación con otras muestras, ya que presentaron mejor elasticidad, resistencia y dureza aceptable.

A nivel nacional se tienen investigaciones realizadas por la Universidad Mayor de San Andrés donde se llegó a sintetizar un polímero de almidón Termoplástico (TPS) en base a almidón de papa utilizando una mezcla de glicerina, urea, ácido acético y agua destilada en diferentes proporciones como agentes plastificantes. La gelatinización se realizó a diferentes temperaturas siendo entre 62°C y 64°C con las que se obtuvieron mejores resultados presentando una elasticidad y dureza aceptable.

En Tarija, no se cuenta con industrias productoras de bioplástico, sin embargo, se tienen investigaciones realizadas en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho como ser Plástico Biodegradable a partir de la cáscara de plátano de la variedad Cavendish, elaborado por Miguel Ángel Alfaro el año 2020, plástico biodegradable a partir de almidón de cáscara de papa elaborado por Mariela Ocampo el año 2022 y Bioplástico a partir de cáscara de naranja elaborado por Roberto Matías Torrez el año 2023, en la primera investigación, primero se trató la cáscara con ácido cítrico, luego se usaron plastificantes, agua destilada, ácido acético y glicerina a una temperatura de 70°C obteniendo un rendimiento de 2,126%, tensión 0,17 Mpa y un módulo tensil de 2,97 Mpa y presenta cualidades similares a una goma. En el segundo trabajo se obtuvo mediante el método tradicional, usando plastificantes como Ácido acético, agua destilada, glicerina y pectina logrando obtener 67% de degradación en tierra y un 93% en agua y dándole un uso como fundas para hojas y, por último, en el tercer trabajo se obtuvo un bioplástico con una tensión de 4,20 Mpa con características similares a los de una bolsa de goma.

Otra alternativa de obtener bioplástico es haciendo uso del almidón de Ajipa perteneciente a la familia de leguminosas, nativa de las laderas orientales de los Andes; antiguamente era cultivada por los incas desde la época precolombina particularmente en valles Interandinos de Bolivia, Sur de Perú y Noroeste de Argentina.

El proyecto AHIPA, financiado por la Unión Europea, permitió realizar estudios sobre el potencial de la ajipa para la producción de proteínas e hidratos de carbono destinados a la industria (Leidi, 2002). Las conclusiones de este trabajo apuntan que efectivamente, este cultivo resulta de interés para la producción de almidón, azúcares, proteínas y aceites de uso industrial. Existe un mercado importante para los cultivos industriales alternativos, proveedores de almidones, azúcares, aceites y proteínas, como materia en la síntesis de solventes orgánicos, plásticos, biocombustibles, lubricantes y aditivos (Bartle, 2002).

En Bolivia las plantaciones de esta especie se fueron concentrando en los departamentos de La Paz, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija, donde fue caracterizada por su consumo directo, adicionando al cuerpo fibras y vitaminas, acumulación de hidratos de carbono, principalmente azúcares y almidón. También era utilizado en remedios caseros como diurético, afecciones de la piel, curaciones, dolor de cabeza, etc.; su forraje servía de alimento para animales. (Amaya, 2006).

En Tarija, las comunidades que mantienen el cultivo del tubérculo *Pachyrhizus Ahipa* (Wedd) en mayor escala son Caraparí ubicada a orillas del Río Pilaya, seguido de Tariquia de la provincia Arce y Pampa Grande de Méndez, en donde casi todas las familias aun cultivan el tubérculo ya que es un cultivo importante para el comercio local, y así también por la tradición de Corpus Christi que perdura de generación en generación. (Terrazas F., 2000 citado en Aguilar M., 2021).

La siembra de la ajipa empieza en agosto hasta octubre con una poda productiva que abarca desde el mes de noviembre hasta fines de marzo, presentando cumbres maduras (cosecha) desde abril a junio, donde según datos del INIAF-TARIJA, 2024 los datos

de producción de raíces de ajipa varían entre 5 y 40 toneladas por hectárea en ciclos de cultivo de ajipa que es de 4 a 6 meses.

A continuación, se detallan los lugares de cultivo de ajipa por provincia.

**Tabla 1: Cultivo y Producción de la Ajipa**

| Lugar                 | Provincia | Departamento      | Producción promedio (t/ha) |
|-----------------------|-----------|-------------------|----------------------------|
| Pampa Grande          | Ménde     | Tarija            | 20                         |
| Caraparí (Río Pilaya) | Ménde     | Tarija-Chuquisaca | 40                         |
| Tariquia              | Arce      | Tarija            | 5                          |

*Fuente: INIAF-TARIJA, 2024*

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Obtener plástico biodegradable a partir de Ajipa a escala laboratorio.

### Objetivos Específicos

- Caracterizar la materia prima (Ajipa) con la finalidad de conocer sus propiedades fisicoquímicas.
- Ejecutar la fase experimental del proceso de obtención de almidón a partir de la Ajipa (*Pachyrhizus Ahipa* (Wedd)).
- Ejecutar la fase experimental del proceso de obtención de plástico biodegradable a partir del almidón de Ajipa.
- Caracterizar el plástico biodegradable determinando sus propiedades según normas y estándares de calidad vigentes.
- Determinar el rendimiento del proceso de producción de plástico biodegradable a escala laboratorio.
- Realizar el estudio de costos del producto.

## **JUSTIFICACIÓN**

### **Justificación Económica**

La Ajipa al ser un producto cultivado para consumo directo y al no darle importancia se desaprovechan las propiedades que presenta como ser su alto índice de proteínas que le permiten obtener nitrógeno, reduciendo costos en fertilizantes nitrogenados y tratamientos plaguicidas. Por otro lado, también se desaprovechan el alto contenido de almidón que posee, y es de esta manera que se pretende darle valor agregado, obteniendo primeramente almidón que no solo es de interés para la industria alimenticia sino también se usa como materia prima para la obtención de bioetanol y plástico biodegradable.

Con el presente proyecto se elabora plástico biodegradable, un producto que es de interés para disminuir el uso de plásticos fabricados a partir de hidrocarburos y de este modo se pretende ayudar a bajar el impacto de contaminación ambiental.

### **Justificación Social**

Con el proyecto se busca impulsar la cadena productiva de la Ajipa en el departamento de Tarija con el fin de generar ayuda a los agricultores para que no abandonen su cultivo y de esta manera se evite la extinción biológica o su debilitamiento genético. Por otro lado, al darle un valor agregado al tubérculo e impulsar su cultivo se colabora con el agricultor para mejorar su calidad de vida generándole mayores ingresos económicos y como consecuencia mejoras en su canasta alimenticia.

### **Justificación Ambiental**

De acuerdo al informe “Producción, uso y disposición final de los plásticos de un solo uso en Bolivia del Fondo Mundial para la Naturaleza”, se generan alrededor de 142699 ton/año de plástico desechado lo que significa un alto índice de contaminación ambiental existente a causa del uso desmedido de este producto.

Mediante el proyecto se pretende disminuir el impacto ambiental que tienen los plásticos elaborando un plástico amigable con el medio ambiente a partir de recursos

renovables como es el almidón. Por otro lado, tomando en cuenta algunas características de la materia prima son muy favorables al medio ambiente ya que pueden obtener nitrógeno atmosférico debido a su elevado contenido de proteínas lo que la hace particularmente atractiva en cuanto al cultivo sin la necesidad de usar fertilizantes nitrogenados, esto la hace una alternativa de interés para un sistema productivo sostenible donde la inversión en fertilizantes y tratamiento de plaguicidas podrían reducirse o evitarse.

### **Justificación Tecnológica**

El desarrollo del proyecto no requiere de uso de equipos y materiales costosos y complejos, existiendo los mismos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química o mercado local.

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

## **1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1. Características de la materia prima**

#### **1.1.1. Origen**

La ajipa cuyo nombre científico es *Pachyrhizus ahipa* (Wedd) Parodi, es una planta perteneciente a la familia de leguminosas, de acuerdo a Leidi, 2002, fue cultivada por los Incas en el periodo precolombino junto a las especies conocidas como la papa, maíz y pimienta.

La ajipa aparentemente es nativa de las tierras altas de Bolivia y noroeste de Argentina, aunque no ha sido observada en estado silvestre. De acuerdo con National Research Council 1989 citado por W. Phillips, J. Morera y M. Sorensen, 1993, su cultivo se encuentra en valles andinos de Perú y Bolivia entre los 0 y 3000 m.s.n.m.

#### **1.1.2. Descripción de la Ajipa**

La raíz tuberosa en la actualidad es cultivada y usada por pequeñas ciudades en América del Sur, se lo consume como fruta, también fritos.

La corteza de la raíz tiende a desprenderse con facilidad de la porción interna, carnosa y blanca. Una de las principales características del tubérculo es su alto contenido de almidón, azúcar y proteínas, aunque por otro lado también muestra resistencia a una variedad de plagas asociadas a los compuestos de la planta como la rotenona, la cual está presente en sus hojas y tallos funcionando como un insecticida natural.

El nombre científico de la ajipa es *Pachyrhizus Ahipa* (Wedd) Parodi.

**Tabla I-1: Taxonomía de la planta de Ajipa**

|                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| <b>Reino</b>      | Plantae                    |
| <b>División</b>   | Magnoliophyta              |
| <b>Orden</b>      | Fabales                    |
| <b>Familia</b>    | Leguminaceae<br>(Fabaceae) |
| <b>Subfamilia</b> | Fabpodaee                  |
| <b>Tribu</b>      | Phaseoleae                 |
| <b>Género</b>     | Pachyrhizus                |
| <b>Especie</b>    | Pachyrhizus<br>ahipa       |

*Fuente: Bartle, 2002*

### 1.1.3. Descripción Botánica

Entre las características que más sobresalen de esta especie son sus hábitos de crecimiento erecto bajo tierra en donde acumulan gran cantidad de sustancias de reserva, sus fiolos son enteros sub acorazonados o truncados y son más anchos que largos, las inflorescencias axilares cortas y las semillas negras, reniformes y con punta roma, presenta una envoltura característica que los protege en gran medida de las contaminaciones microbianas. (Segovia, M., 2004)

Distintos autores presentan descripciones botánicas de la especie, las mismas se resumen a continuación:

**Planta:** es una planta erecta o semierecta que mide entre 30 a 60 cm de altura, adecuada para el manejo agronómico tecnificado.

Por otro lado, aunque se adapta a condiciones subtropicales puede sembrarse en rotación con caña de azúcar, es tolerante a las bajas temperaturas, lo que permite un rango de cultivo mucho más amplio que sus parientes tropicales y, además, hace posible su expansión hacia latitudes más elevadas en ambos hemisferios. (Amaya, J., & Julca, J. 2006)

**Figura 1-1: Pachyrhizus ahipa (Wedd)**



*Fuente: Cultivariable, 2016 extraído de Almazán J., 2017*

**Inflorescencia:** las inflorescencias axilares son cortas y poseen de 2 a 6 flores por cada eje lateral. La flor presenta un cáliz con 5 pétalos de color blanco o morado pálido, la corola llega a medir desde 1,5 a 2 cm de largo. (Almazan, J. 2017)

**Figura 1-2: Flor de Ajipa**



*Fuente: Ministerio de agricultura y Riego, 2014*

**Fruto:** De acuerdo con Almazán, J. 2017, es denominado legumbre o vaina, es fácil de cosechar ya que no se abre de manera espontánea para dispersar su semilla, es de aproximadamente 8 a 17 cm de largo y de 11 a 16 mm de ancho. Las vainas inmaduras en un corte transversal son casi circulares y solo ligeramente comprimidas

dorsoventralmente, presenta septos internos entre semillas y externamente está comprimida entre semillas.

**Figura 1-3: Vainas de *Pachyrhizus ahipa* (Wedd)**



*Fuente: Ríos W., 2019 extraído de Aguilar M., 2021*

**Raíz tuberosa:** las raíces son tubérculos y presentan disminuciones graduales a ambos lados, pueden ser de 8 a 15 cm o más de longitud y usualmente pesan de 0,2 a 8 kg, normalmente son elongadas o irregulares en forma, pero también pueden ser casi esféricas; la cáscara varía del color canela a amarillo pálido y la pulpa es de tono blancuzco y entretejida con una fibra suave de color purpura. (Almazan, J. 2017)

Entre las materias primas obtenidas de la ajipa deben destacarse el almidón y los azúcares de las raíces tuberosas. El almidón producido por las raíces tiene una alta proporción de amilopectina en relación a amilosa lo que la hace atractiva a industrias. (FORSYTH L., 2002)

**Figura 1-4: Raíz de Pachyrhizus Ahipa**



*Fuente: Varieties and Landraces extraído de Almazán, J. 2017*

**Hojas:** compuesta trifolioladas, con foliolos asimétricos y enteros con pilosidades, siendo más anchos que largos. (Almazán, J., 2017).

#### **1.1.4. Cultivo o producción de ajipa**

**Siembra:** Según Almazán J., 2017, en Bolivia usualmente la siembra se realiza desde el mes de agosto a octubre con una poda reproductiva (remoción manual de flores) desde el mes de noviembre a marzo llegando a obtener legumbres maduras desde abril a agosto.

Los datos de producción de raíces de ajipa varían entre 5 y 40 toneladas por hectárea en ciclos de cultivo de la ajipa que es de 4 a 6 meses.

**Cosecha:** la cosecha de la raíz tuberosa en Bolivia se realiza después de aproximadamente 4 a 6 meses de realizada la siembra, esta es realizada manualmente, no precisa gran exigencia en cuanto a su conservación debido a que es comercializada rápidamente por los productores. (Almazan, J. 2017)

#### **1.1.5. Requerimientos para su cultivo**

**Clima:** no existen estudios específicos sobre las necesidades climáticas de la ajipa y/o sobre su rango de adaptación. Sin embargo, la procedencia de las líneas disponibles

(zonas elevadas en la zona Andina de Bolivia y Norte de Argentina) hacía suponer una cierta tolerancia al frío. La germinación requiere de temperaturas relativamente elevadas, a temperaturas de 0 a -1°C ya producen daños por helada. No se tienen datos de temperaturas óptimas para los periodos de crecimiento vegetativo y reproductivo. (Leidi, 2002)

#### 1.1.6. Composición química y contenido nutricional

Entre las propiedades de la ajipa debe destacarse el almidón que es fácil de digerir y el contenido de azúcares que contiene bastante glucosa y es bajo en sacarosa. Es baja en sodio, además contienen potasio y vitamina C. (Segovia, M., 2004)

A continuación, en la tabla I-2 se muestra la composición de las raíces de ajipa fresca en donde indica que el contenido de humedad corresponde al 80,03%, de tal modo que la porción comestible sería de 19,97%.

**Tabla I-2: Composición principal de Ajipa (P. Ahipa (Wedd))**

| Nº | Descripción      | Cantidad | Unidad     |
|----|------------------|----------|------------|
| 1  | Humedad          | 80,03    | %          |
| 2  | Azúcares         | 18,61    | %          |
| 3  | Proteínas        | 0,63     | %          |
| 4  | Carbohidratos    | 17,89    | %          |
| 5  | Valor energético | 74,75    | Kcal/100g. |
| 6  | Almidón          | 16,75    | %          |

*Fuente: Segovia M., 2004*

#### 1.1.7. Usos de la Ajipa

La raíz tuberosa de esta leguminosa es empleada en la actualidad por pequeñas comunidades de Sudamérica, donde se consume como fruta, por su sabor dulce y

refrescante, y constituye una fuente de energía, fibra y vitaminas adicional en la dieta de estas poblaciones. (Grau, A., 1997). También puede cocinarse o fritarse manteniendo su textura crocante, es muy consumida por sus propiedades medicinales las cuales ayuda a combatir enfermedades estomacales.

En el mercado industrial la ajipa tiene múltiples utilidades como la extracción de almidones, azúcares y aceites, aplicados como materia prima en la síntesis de solventes orgánicos, plásticos, biocompuesto, lubricantes y aditivos. También es posible extraer los rotenoides que presentan en sus hojas y semillas, los cuales son compuestos de baja toxicidad y actúan como plaguicidas naturales.

En Tarija, se le da un uso particular a la ajipa en la celebración de Corpus Cristi en donde es utilizada como vaso para la tradicional chica de uva, se perfora el interior de la ajipa dándole una forma de cáliz en donde se introduce la chicha para luego ser ingerida por el consumidor. En Cochabamba también se lo consume preparando raspadillo en una ralladora para extraer el jugo y de esta manera ofrecer de desayuno para los niños.

## **1.2. Almidón**

### **1.2.1. Aspectos generales**

El almidón es un polímero que está constituido de cadenas de glucosa, es un tipo de hidrato de carbono que se representa por la fórmula química  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , se encuentra principalmente como reserva energética en la mayoría de los productos agrícolas como los cereales (maíz, trigo, arroz), leguminosas (frijol, chícharo, haba) y tubérculos (papa, yuca, camote, ajipa, oca). Su forma depende principalmente de la fuente botánica, presentando diversas partículas en formas redondas, ovales, lenticulares y angulares. (Raigond et al. 2015).

Sirve como almacén de nutrientes en las plantas, pero no solo es una importante reserva para las plantas sino también en los seres humanos, con una alta importancia energética, proporcionando gran parte de la energía diaria necesaria a través del consumo de los alimentos. (Almazan, J. 2017)

**Figura 1-2: Almidón**



*Fuente: Flexicom, 2022*

El almidón se caracteriza por ser un polvo fino blanquecino de extraordinaria textura, sin sabor y sin olor, el cual brinda una mayor viscosidad en comparación con los almidones de maíz y trigo, además de posibilitar y facilitar la elaboración de productos más apetecibles (FAO, 2008)

Está constituido principalmente por unidades de D-glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ), las cuales forman dos polímeros que son la amilosa de estructura lineal y la amilopectina de estructura ramificada, ambas partes están conectadas por uniones glucosídicas. (Amaya F., 2004), encontrándose también en menor cantidad contaminantes como proteínas, lípidos y minerales.

### **1.2.2. Almidón de Ajipa (*Pachyrhizus ahipa* (Wedd))**

El almidón producido en la raíz equivale a más del 15%, es por lo mismo que varios autores afirman que debido a su contenido es capaz de brindar beneficios según el uso que se le dé, además que presenta en su estructura celular una importante relación de sus polímeros amilosa y amilopectina, lo que otorga a sus geles características reológicas superiores a los geles formados con otro tipo de almidón de otros cultivos tradicionales. (FORSYTH, L. 2002)

A continuación, se describen características sensoriales del almidón de ajipa:

**Tabla I-3: Propiedades organolépticas del Almidón de Ajipa**

| Nº | Parámetros | Descripción                                                                                          |
|----|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Aspecto    | Por lo general se presenta en polvo fino, granos de tamaño reducido, es insoluble en agua y alcohol. |
| 2  | Color      | Presenta un color blanco claro.                                                                      |
| 3  | Olor       | El olor es neutro y libre de malos olores.                                                           |
| 4  | Sabor      | Tiene un sabor neutro.                                                                               |

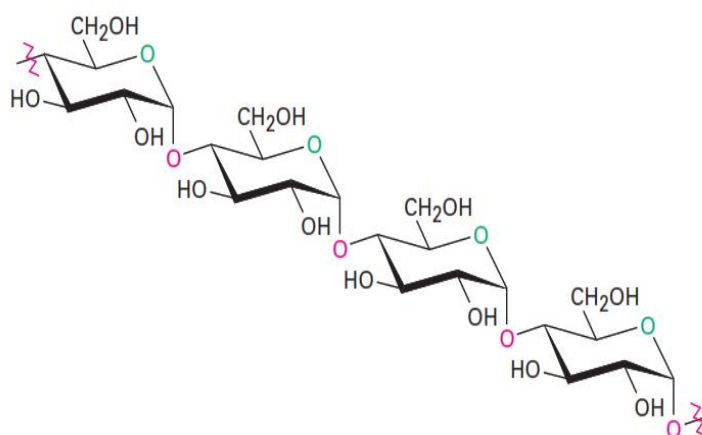
*Fuente: Mariana Aguilar, 2021*

### **1.2.3. Estructura del almidón**

#### **1.2.3.1. Amilosa**

Es un polímero lineal que consta de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos, generalmente se encuentra entre 1000 unidades de glucosa por molécula de amilosa y tiene forma de espiral, los polímeros de la amilosa tienden a agruparse muy estrechamente en forma paralela mediante la formación de puentes de hidrógeno entre los hidroxilos de los polímeros adyacentes reduciendo así su afinidad por el agua. (Aristizabal & Sánchez, 2007)

En la figura 1-3, se observa la estructura de una molécula de amilosa de tipo lineal de glucosas con uniones alfa tipo 1→4.

**Figura 1-3: Estructura de una molécula de amilosa****Amilosa, un polímero de 1→4-O-( $\alpha$ -D-glucopiranosido)**

*Fuente: Química Orgánica, McMurry*

Las moléculas de amilosa, situadas en las capas interiores, consiste de varios cientos de moléculas de glucosa unidas entre sí por enlaces  $\alpha$ -1,4 en cadenas no ramificadas o enrolladas en forma de hélice.

Los almidones ricos en amilosa (sustancia insoluble en agua fría) preservan su estructura en el momento que se moldean y gelifican, entretanto los almidones carentes de amilosa se espesan, pero no gelifican. Las partículas de amilosa son alrededor de la cuarta parte del almidón.

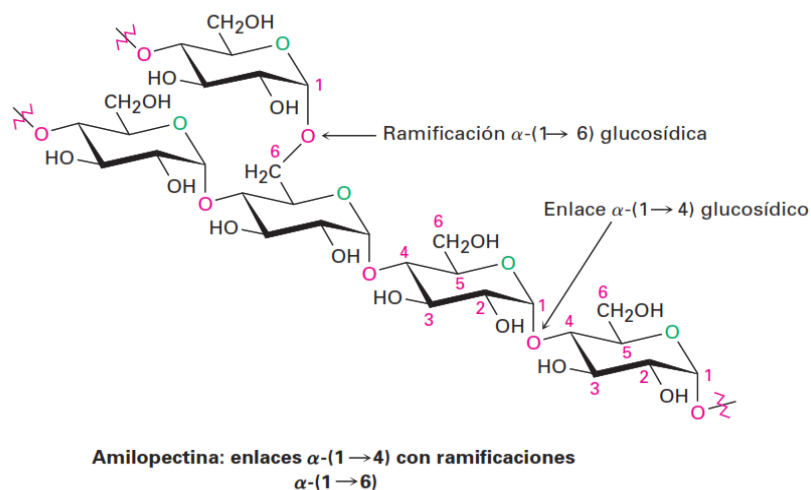
### 1.2.3.2. Amilopectina

La estructura de la amilopectina ubicada en la capa exterior, es distinta a la de la amilosa, está constituida por cadenas de glucosa anexadas por enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4. A diferencia de la amilosa, en la amilopectina a cada 15 a 30 unidades hay una ramificación las cuales se deben a los enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,6 con otras moléculas de glucosa. (Ruiz Avilés, 2006).

La amilopectina se encuentra en una proporción de 70-80% del total del gránulo de almidón dependiendo de la fuente botánica del mismo.

Es la responsable de la estructura cristalina que en su conjunto presenta el almidón, debido a que en ella se forman puentes de hidrógeno entre las ramificaciones dando lugar a una estructura que se puede considerar como cristalina que se rompe con facilidad. (Fernandez, 2005)

**Figura 1-4: Estructura de una molécula de amilopectina**



*Fuente: Química Orgánica, McMurry*

#### 1.2.4. Gelatinización del almidón

Se conoce como gelatinización al proceso donde los gránulos de almidón que son insolubles en agua fría debido a que su estructura es altamente organizada, se calientan a temperaturas entre 60-80°C y empieza un proceso lento de absorción de agua en las zonas inter micelares amorfas que son menos organizadas y las más accesibles (Almazan, J., 2017). Se calienta de tal modo que se retiene más agua y los gránulos alcanzan un volumen máximo llegando a perder las propiedades que le confiere su estructura semi cristalina y a una temperatura crítica formando un gel. (Batuani, 2015)

De acuerdo con Vaclacik; Christian, 2002 citado en Ocampo Yuca, 2022, La temperatura a la que diversos almidones gelatinizan es realmente un intervalo específico para cada almidón, los gránulos dentro de un almidón se hincharán y espesarán mezclas a temperaturas ligeramente diferentes, hinchándose primero los

gránulos más grandes que los pequeños. Las etapas de proceso de gelatinización son los siguientes:

- La temperatura de gelatinización se alcanza dependiendo del tipo de almidón, normalmente un aproximado varía entre 60 a 71°C para su inicio.
- La energía cinética de las moléculas de agua caliente rompe los puentes de hidrógeno entre las moléculas de almidón. A medida que se forman puentes de hidrogeno, el agua es capaz de penetrar más profundamente en el gránulo del almidón dando lugar al hinchamiento. Por lo que debe estar presente suficiente agua para entrar y agrandar el gránulo de almidón.
- Se produce la difusión de algunas cadenas de amilosa a medida que salen de gránulos de almidón.
- Se pierde la birrefringencia y la estructura cristalina ordenada del gránulo de almidón nativo. Es claramente más traslucido porque el índice de refracción del granulo expandido esta próximo al del agua.
- El hinchamiento del granulo aumenta a medida que aumenta la temperatura. Los gránulos más grandes son los primeros en hincharse.
- Los gránulos de almidón hinchados ocupan más espacio y la mezcla espesa a medida que los gránulos se agrandan liberando amilosa y posiblemente amilopectina.
- La pasta de almidón continúa volviéndose más espesa, más viscosa y resistente al flujo a medida que gelatiniza.
- Un exceso de agitación hace menos espesa la mezcla de almidón calentado a medida que los gránulos de almidón hinchados se rompen y pierden algo del líquido que retienen en el interior los gránulos agrandados.

#### **1.2.5. Aplicaciones industriales del almidón**

Como principales usos se tiene:

- **Farmacéutico**, empleado como excipiente para la formación de tabletas, espesante de jarabes.

- **Pegamento**, es usado como base para la fabricación de pegamentos vegetales de alta adhesividad.
- **Cosmético**, usado para la producción de talcos, polvos de rostro y maquillaje.
- **Minero**, sirve como estabilizante floculante de la bauxita hierro, aglomerante en ladrillos refractarios.
- **Textil**, usado como encolante de los hilos de urdimbre para proporcionar resistencia a los hilos en el telar.
- **Cartón**, usado como adhesivo en el proceso de manufactura del cartón corrugado.
- **Papel**, mejora la resistencia superficial e interna, la retención de finos y cargas minerales, la formación de la hoja y apariencia superficial.
- **Alimento**, es usado para la fabricación de edulcorantes, en pastelería y repostería como suplente de la harina de trigo, estabilizante o espesante de helados, sopas, salsas y gelatinas, en panadería el almidón incrementa la esponjosidad y fragilidad, en bebidas alcohólicas el almidón se fermenta y se destila para producir vodka y el aguardiente.
- **Plásticos**, es usada para la fabricación de productos desechables como platos, cuchillos, y vajillas. Actúa como sustituto cien por ciento biodegradable del poliestireno y otros plásticos.

### 1.3. Bioplástico

El bioplástico es un plástico de origen natural producido por un organismo vivo y con carácter biodegradable, sintetizado a partir de fuentes de energía renovables, por lo que apenas produce contaminación. (López, 2009 citado por Ocampo Yuca, 2022).

Este producto se caracteriza por su facilidad en descomponerse y transformarse en materia orgánica luego de haber finalizado su vida útil, con lo cual se no se genera residuos contaminantes en el medio ambiente.

Otra característica del bioplástico es que se degradan en un periodo menor a un año, en donde el residuo final del proceso es la generación del CO<sub>2</sub>, agua y biomasa. Al contrario de los productos desechables plásticos (polietileno, polipropileno) y de

poliestireno expandido que tardan hasta 1200 años en degradarse, generando una contaminación acumulativa al ecosistema. (García, 2015b. p.20, citado por Ocampo Yuca, 2022).

**Figura 1-5: Proceso de biodegradación de una botella y un tenedor**



*Fuente: Duarte, 2012 citado en Alfaro M., 2020*

Otro proceso de producción de plástico biodegradable utiliza microorganismos como el proceso de fermentación, por ejemplo, en la obtención del ácido láctico para obtener ácido poliláctico que es un plástico biodegradable de mucha aplicación. El proceso empieza con el almidón que se extrae del maíz, luego los microorganismos lo transforman en una molécula más pequeña de ácido láctico que sirve para la elaboración de cadenas poliméricas de ácido poliláctico. (Leon&Leskek, 2009 citado por Alfaro, 2020).

### 1.3.1. Aplicaciones del plástico biodegradable

**Tabla I-4: Aplicaciones de los plásticos biodegradables**

| <b>Industria</b>   | <b>Aplicaciones</b>                                                                                                                                                 |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Alimentaria</b> | Para la producción de empaques biodegradables, envolturas comestibles para la preservación de las frutas, pescados, carnes, entre otros.                            |
| <b>Envases</b>     | Para la producción de envases que se derivan en mercados de envases flexibles como son las bolsas y los films, envases rígidos como las bandejas, vasos y botellas. |
| <b>Química</b>     | Para la producción de artículos de higiene, en espumas, para juguetes amigables con el medio ambiente y para llantas de vehículos.                                  |
| <b>Electrónica</b> | Carcasa para walkman y cubiertas para teléfonos móviles que tienen la característica de ser reutilizadas a través del compostaje.                                   |

*Fuente: Mariela Ocampo, 2021*

### 1.3.2. Componentes para la elaboración del bioplástico

Para la obtención del bioplástico se requiere la adición de ciertos reactivos en la mezcla que aseguren las condiciones necesarias para su obtención. Por esta razón los bioplásticos precisan de componentes que proporcionen características de plasticidad,

humectación, espesantes, resistencia, lubricación y desmoldantes. (Meneses et al., 2007).

### **1.3.2.1. Plastificantes**

Los plastificantes son materiales de baja volatilidad que se agregan a un polímero para aumentar su flexibilidad, elasticidad y fluidez en estado fundido. La adición de un plastificante puede hacer que disminuya la viscosidad en estado fundido y la temperatura de transición vítrea de un plástico (Charro, M., 2015)

#### **- Agua destilada**

Es el agua resultante de un proceso minucioso de destilación de la cual fue sujeto con la finalidad de suprimir las impurezas logrando obtener un agua libre de cloruros, calcio, fluoruros y magnesio. Su fórmula química es  $H_2O$ .

En las investigaciones de Charro, M. (2015), el agua es utilizada comúnmente como un plastificante para lograr la desestructuración del almidón en las mezclas para obtener almidones termoplásticos. Se utiliza con el objetivo de lograr mejores propiedades mecánicas y de barrera, el agua es el plastificante más abundante y más económico.

#### **- Glicerina**

Es una sustancia viscosa, incolora, de sabor dulce y de olor característico, compuesta principalmente por el alcohol el cual dispone de tres grupos hidroxilos (OH) y cuya fórmula molecular es  $C_3H_8O_3$ . Esta sustancia no es tóxica, presenta solubilidad en agua y además se deshace en hervor. De igual manera que el agua destilada el glicerol también es considerado como un plastificante, el cual proporciona suavidad y humectación al almidón. Este compuesto es de gran importancia para la retrogradación de artículos termo plastificados, asimismo su comportamiento como lubricante suministra la movilidad necesaria para las cadenas poliméricas correspondientes al almidón. (Méndez, A., 2010)

En teoría las mezclas que contienen glicerol deben tener un aspecto homogéneo final, esta característica es un claro indicador de que el almidón ha plastificado.

### - **Ácido acético**

Se trata de un líquido incoloro que presenta solubilidad en agua, alcohol, éter, glicerina acetona, benceno y tetracloruro de carbono. Se denomina también como ácido etanoico, su fórmula molecular es  $C_2H_4O_2$ , y se caracteriza por ser un ácido orgánico presente principalmente en el vinagre brindándole el sabor avinagrado. El ácido acético realiza un papel muy importante como modificador químico, debido a que reduce la naturaleza hidrofílica del almidón, otorgándole particularidades hidrofóbicas a dicho material con cual se trabaje. (de los Ángeles Rosales, 2016)

### - **Pectina**

Es un complejo aniónico polisacárido usado en industrias de alimentos como aditivo natural, funciona como gelificante, espesante, emulsificante y estabilizante. Se puede tratar de pectina de alto metoxilo (HMP) o pectina de bajo metoxilo (LMP); la HMP forma excelentes películas. La mezcla de plastificante de pectina cítrica y almidón de alta amilosa dan estabilidad y flexibilidad a la película, la cual es térmicamente estable sobre 180°C. (Charro, M., 2015).

### **1.3.3. Fundamentos para la caracterización del bioplástico**

#### • **Determinación del espesor**

El espesor es el grosor de un elemento, es decir, define que tan grueso o ancho es. Conocer el grosor de un objeto es importante para definir ciertas propiedades y su calidad. En ingeniería también define la resistencia o elasticidad de un material y este puede ser determinado por medición directa con micrómetro. (Sánchez, D., 2017)

#### • **Determinación de resistencia a la tracción**

De acuerdo a la norma INEN 2637, el ensayo de tracción permite la determinación de un punto final de la degradación, es decir el punto frágil para películas y láminas de polietileno/polipropileno degradable.

La propiedad de alargamiento por tracción puede variar con el espesor de la probeta, el método de preparación, la velocidad de ensayo, el tipo de mordazas empleadas y la

forma de medir la extensión de ensayo. Por lo tanto, esto muestra la resistencia a la tracción y la deformación a la rotura que el material tiene la capacidad de soportar.

- **Determinación de la biodegradación**

Para que un plástico sea considerado biodegradable debe tenerse en cuenta las propiedades mecánicas y el tiempo de degradación necesario para determinada aplicación. Así, se encuentran plásticos que degradan por acción de microorganismos en agua, suelo y condiciones de un sitio de disposición de residuos.

Los nuevos materiales bioplásticos que son desarrollados por industrias como las fundas a base de almidón se pueden considerar biodegradables, ya que se logran desintegrar y carecen por completo de ecotoxicidad, debido a que pueden ser incineradas considerando que el  $CO_2$  producido por la incineración es equivalente al que anteriormente fue absorbido por las plantas que fueron utilizadas durante su crecimiento.

Los organismos internacionales de estandarización, como ASTM e ISO, desarrollaron metodologías para evaluar la biodegradabilidad para diferentes condiciones. Cada prueba se refiere a un ambiente específico, que puede ser el composteo, el suelo, el agua marina, el agua residual o un relleno sanitario. (CIPRES, 2018). También cumplen con la norma europea EN 13432, cuyo umbral de biodegradabilidad exigido es del 90% y un tiempo de desintegración en un máximo de seis meses, el material debe quedar fragmentado en segmentos pequeños menores a un tamaño específico (usualmente 2x2 mm) transcurridos las 12 semanas. (Ambienta, 2007 citado por Ocampo Yuca, 2022).

#### **1.4. Descripción de las alternativas de procesamiento**

Para la obtención del bioplástico se tienen las siguientes formas de procesos:

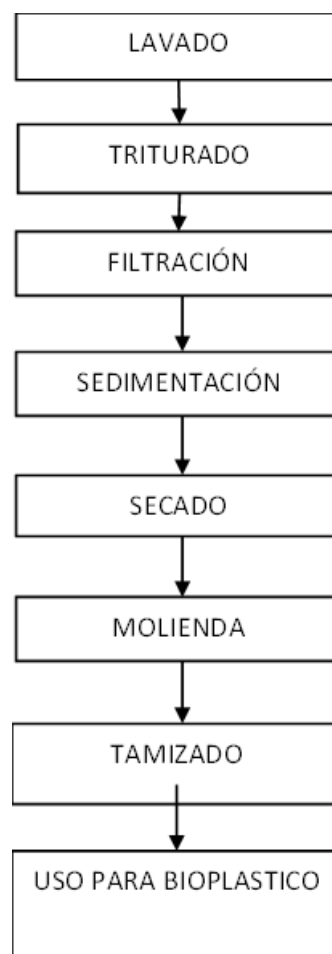
- Proceso tradicional
- Proceso por almidón modificado
- Proceso por matriz reforzada

Para cualquiera de las tres formas de procesamiento, previo es importante contar con el almidón, al no encontrar almidón de ajipa en tiendas de mercado se hace necesario la obtención, por lo cual procedemos previamente a desarrollar el método de obtención del almidón.

#### 1.4.1. Extracción de almidón

La extracción de almidón consiste de las siguientes etapas:

**Figura 1-6: Etapa de extracción del almidón**



*Fuente: Alarcon y Dufour, 1998*

**Lavado:** una vez seleccionada la materia prima se procede al lavado de la misma para eliminar impurezas adheridas a la ajipa también se elimina parte de la cascarilla.

**Triturado:** esta operación se realiza para la liberación del almidón que se encuentran contenidas en las células de la materia prima. El triturado se realiza con la ayuda de una extractora de zumos, que ayuda a separar la fibra del resto. Es importante realizar un buen triturado ya que esto determina en gran parte el rendimiento total del almidón en el proceso de extracción.

**Filtración:** se realiza la separación de la fibra de la lechada de almidón, es importante evitar que partículas pequeñas de fibra pasen a la lechada del almidón, por lo que se hace necesario filtrar con un tamiz para retener dichas partículas.

**Sedimentación:** la lechada del almidón es conducida a tanques o canales, en donde se debe esperar entre 6 a 8 horas para que el almidón quede sedimentado. Una vez finalizada la etapa se obtienen 3 capas, la capa superior es el agua sobrenadante, la segunda capa se le denomina mancha y es la mezcla de almidón con material proteico, y finalmente la capa inferior es el almidón.

**Secado:** una vez separada la capa inferior en el sedimentado, este es transportado al secador donde se deshidrata hasta un nivel de humedad aproximado del 12%.

**Molienda y tamizado:** el almidón seco, en forma de terrones, es molido y posteriormente es tamizado en mallas, cuya finura o granulometría depende de las características del almidón que se desea obtener. (Almazan, J. 2017)

A continuación, se detallan los procesos de obtención de bioplástico.

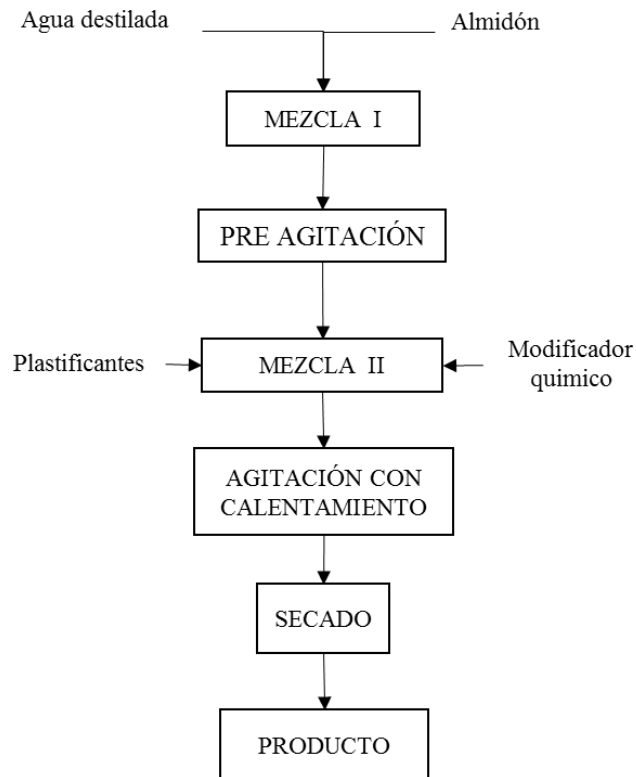
#### **1.4.2. Proceso Tradicional**

El proceso tradicional hace referencia a la obtención de un bioplástico de manera simple, es decir el almidón no sufre ninguna alteración y el proceso de obtención del producto final no requiere de equipos con controles de velocidad, temperatura, presión entre otros.

Es un método en el cual varían las diferentes concentraciones de almidón, agua, glicerol y ácido acético para obtener una formulación con una buena relación de sus materias

primas, originando un producto final con propiedades físicas y mecánicas similares a los plásticos provenientes del petróleo. (Ocampo Yuca, 2022)

**Figura 1-7: Diagrama del Proceso Tradicional**



*Fuente: Elaboración Propia, 2023, extraído de Cardona, J. 2019*

**Mezcla I:** primeramente, se agrega el almidón con agua destilada con el fin de hidratarlo.

**Pre agitación:** luego de tener la mezcla I se lo somete a una pre agitación hasta lograr una mezcla homogénea.

**Mezcla II:** una vez hidratado el almidón se procede a agregar el plastificante y el modificador químico que es el encargado de otorgar un grado de acidez al producto final cambiando sus propiedades mecánicas y físicas, se mezcla hasta lograr la homogeneidad.

Es necesario aclarar que los modificadores químicos no alteran la estructura del almidón, sino que estos facilitan la interacción molecular con los plastificantes.

**Agitación con calentamiento:** una vez obtenida la mezcla homogénea, se lo lleva al calentador hasta una temperatura máxima de 65°C, para que se proceda a la gelatinización del almidón, por un tiempo entre 20 y 30 minutos, es importante que durante este proceso se agite la solución hasta lograr que se homogenice totalmente.

**Secado:** transcurrido el tiempo se observa que la solución está gelatinizada, se lo pasa a un molde y se lo lleva a un secador, para finalmente obtener el producto final que es el bioplástico.

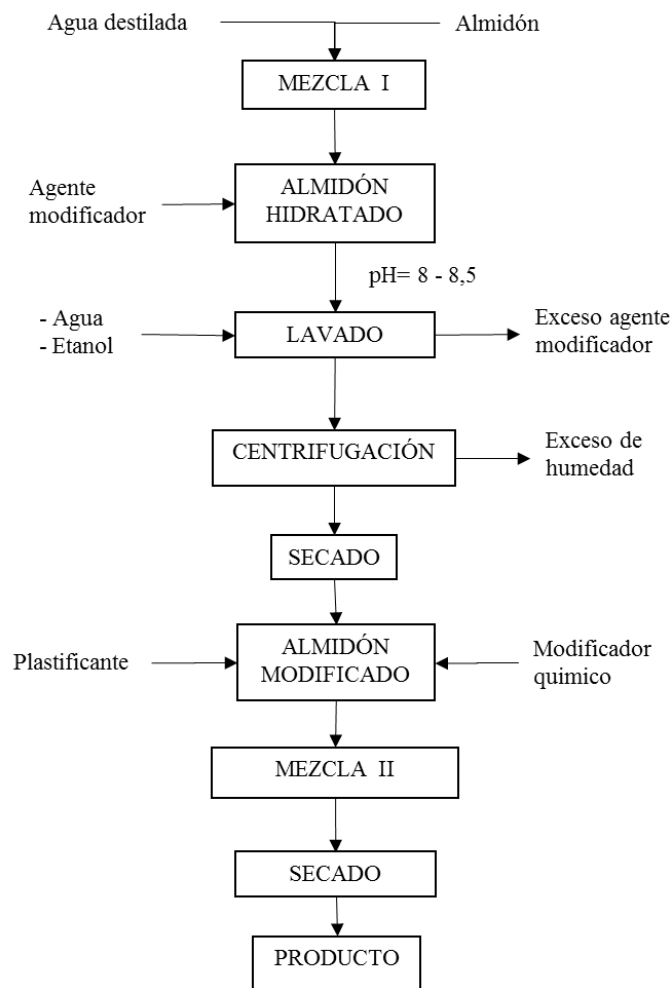
Los equipos para el desarrollo de este proceso son de fácil acceso en un laboratorio sin tomar en cuenta las pruebas mecánicas y fisicoquímicas del producto. Por otro lado, el tiempo total de producción del bioplástico está en un rango de 15 a 25 minutos, sin embargo, el proceso de secado está entre 36 a 48 horas a temperatura ambiente y el acceso a materia prima almidón, la glicerina, el modificador químico y el agua destilada es sencillo. (Ortiz Alfaro, 2010)

#### **1.4.3. Proceso con almidón modificado**

Su objetivo es modificar el almidón de forma química, este método constituye en la sustitución de los hidrógenos presentes en los grupos hidroxilos de la molécula de amilosa. Se realizaron diversos estudios para lograr un producto con mejores características de resistencia, permeabilidad, procesabilidad y compatibilidad con algunos productos hidrofóbicos y en comparación con el proceso tradicional, éste tiene una etapa de modificación del almidón antes de obtener la película plástica.

La acilación del almidón ha sido desarrollada a partir de la esterificación del almidón con anhídrido acético, vinil acetato o ácido acético, dividiéndose de acuerdo al tipo de acetilación formado o requerido, la acetilación baja es usada en industria alimentaria ya que brinda consistencia, textura y durabilidad, mientras que la acetilación alta se usa como sustitutos termoplásticos.

**Figura 1-8: Diagrama del Proceso con almidón modificado**



*Fuente: Elaboración Propia, 2023 extraído de Cardona, J., 2019*

El proceso descrito a continuación, fue desarrollado por Carrascal.

**Mezcla I:** en esta etapa se hidrata el almidón con agua destilada por 30 minutos con el objetivo de asegurar la homogeneidad de la mezcla.

**Almidón hidratado:** luego de tener el almidón hidratado, se agrega gota a gota el agente modificador que puede ser ácido acético, anhídrido acético o vinil acetato, para que reaccione con el almidón y así obtener el cambio químico. De acuerdo al grado de sustitución que se desee obtener el pH debe mantenerse entre 8 y 8,5.

**Lavado:** posteriormente, se lava el almidón tres veces con agua y una con etanol para eliminar el exceso del agente modificador.

**Centrifugación:** luego de lavar la mezcla, se lleva a una centrifugadora por 10 minutos para eliminar el exceso de humedad.

**Secado:** una vez eliminado el exceso de humedad, se lleva a un horno a una temperatura de 40°C por un tiempo de 8 horas para finalmente obtener el almidón modificado.

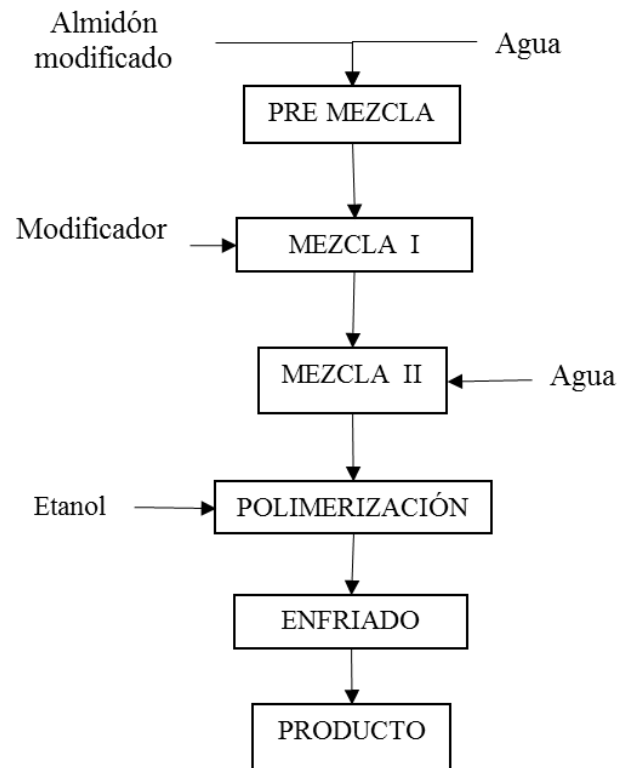
**Mezcla II:** en esta etapa inicia el proceso de obtención de bioplástico, agregando el modificador químico y el plastificante y se inicia la mezcla con agitación mecánica durante el proceso entre 150 y 300 rpm, entre una temperatura de 50°C a 80°C.

**Secado:** posteriormente se deja secar la película de bioplástico obtenido ya sea a temperatura ambiente o en horno por un tiempo de 12 horas a 4 días y a una temperatura entre 20°C y 40°C y finalmente se obtiene el producto.

El acceso a la materia prima es complejo debido a que el anhídrido acético y el ácido acético glacial, son productos controlados, además, el ácido clorhídrico es un insumo con restricción de venta institucional, esto quiere decir que solo empresas constituidas pueden adquirir este componente. Los equipos para este proceso son más especializados con respecto al proceso anterior, los cuales se encuentran en laboratorios analíticos y de calidad que no son de fácil acceso. (Cardona, J., 2019)

#### **1.4.4. Proceso con matriz reforzada**

En este proceso se agrega cualquier material orgánico (fibras, polisacáridos) o químico (acetato de polivinilo, alcohol polivinílico, poliestireno, polipropileno, entre otros.) al almidón, los cuales podrían suplir falencias como las deficiencias estructurales, grado de deformación, espesor, resistencia y permeabilidad. (Cardona, J., 2019)

**Figura 1-9: Diagrama del Proceso con matriz reforzada**

*Fuente: Elaboración propia, 2023 extraído de Cardona J., 2019*

**Pre mezcla:** inicialmente se agrega agua al almidón modificado para que éste se hidrate por un tiempo de 30 min.

**Mezcla I:** una vez obtenida la pre mezcla, se le agrega modificadores químicos, que en este método puede ser cualquier material orgánico como fibras, polisacáridos o materiales químicos como acetato de polivinilo, alcohol polivinílico, poliestireno, polipropileno entre otros, estos son agregados para suplir falencias como deficiencias estructurales como ser su resistencia, espesor, etc. Esto se lo realiza en temperatura ambiente hasta un máximo de 40°C.

De esta manera, la adición de estos materiales mejora sustancialmente la matriz polimérica, gracias a este estudio se realizan nuevos prototipos en donde se incorporan materias primas orgánicas como la Celocell (hidroxi-etil-celulosa), chitosan, xantan entre otras, todo con el propósito de favorecer la calidad del producto final.

**Mezcla II:** en esta etapa se le agrega el plastificante (glicerol) y agua a la mezcla I, se lo agita hasta obtener una solución homogénea.

**Polimerización:** una vez obtenida la mezcla II se lo somete a calentamiento hasta una temperatura máxima de 70°C agregándole etanol, sin dejar de agitar.

**Enfriado:** una vez terminado el proceso de polimerización, se lleva la mezcla a un molde y se procede a enfriarlo, para posteriormente obtener el bioplástico.

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

## 2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

### 2.1. Caracterización de la materia prima Ajipa

Las raíces de Ajipa con las que se desarrolló el proceso fueron cultivadas en la comunidad de Caraparí, perteneciente al Río Pilaya ubicado en la zona fronteriza entre los departamentos de Tarija-Chuquisaca, debido a que la cantidad de producción es mayor en comparación a los otros lugares de cultivo dentro del departamento de Tarija, dichas raíces fueron adquiridas en época de cosecha (de abril a agosto) en el mercado Campesino de la ciudad de Tarija. Para la caracterización de la Ajipa, se tomaron en cuenta sus propiedades físicas y fisicoquímicas.

#### 2.1.1. Propiedades fisicoquímicas

La determinación de las propiedades fisicoquímicas de la Ajipa se realizó en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), ubicado en la ciudad de Tarija.

Los análisis realizados, métodos de ensayo y unidades se detallan en la tabla II-1.

**Tabla II-1: Propiedades fisicoquímicas de la raíz de Ajipa**

| Nº | Parámetros          | Técnicas y/o Método de ensayo | Unidad    |
|----|---------------------|-------------------------------|-----------|
| 1  | Ceniza              | NB 39034:10                   | %         |
| 2  | Fibra               | Gravimétrico                  | %         |
| 3  | Grasa               | NB 313019:06                  | %         |
| 4  | Humedad             | Calculo                       | %         |
| 5  | Hidratos de Carbono | NB 313010:05                  | %         |
| 6  | Proteína Total      | NB/ISO 8968-1:08              | %         |
| 7  | Valor Energético    | Calculo                       | Kcal/100g |

*Fuente: CEANID, 2024*

## 2.2. Selección del proceso experimental

El proceso de elaboración de plástico biodegradable a partir de Ajipa se encuentra conformado por dos procesos, el primero consiste en la extracción de almidón de la Ajipa por vía húmeda y el segundo en la elaboración de plástico biodegradable a partir del almidón obtenido de la Ajipa, para el cual se tienen tres alternativas.

Con el objetivo de definir el método más apropiado para la obtención del bioplástico, se recurre al método cualitativo por puntos, para ello se tomarán en cuenta características similares o diferentes que poseen cada uno de los tres procesos anteriormente descritos:

- Proceso tradicional
- Proceso con almidón modificado
- Proceso con matriz reforzada

Las características que se toman en cuenta son la calidad del producto, disponibilidad de equipos, tiempo de obtención del producto, acceso a la materia prima e impacto al medio ambiente. La escala de puntuación será de acuerdo a la tabla II-2.

**Tabla II-2: Escala de puntuación**

| Escala de puntuación | Puntuación |
|----------------------|------------|
| Malo                 | 0-2        |
| Regular              | 3-4        |
| Bueno                | 5-6        |
| Muy bueno            | 7-8        |
| Excelente            | 9-10       |

*Fuente: Elaboración propia, 2023*

Tabla II-3: Selección del proceso para la obtención de plástico biodegradable

| Factores a ser evaluados         | Peso relativo | Alternativas        |             |                            |             |                          |             |
|----------------------------------|---------------|---------------------|-------------|----------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
|                                  |               | Proceso Tradicional |             | Proceso Almidón modificado |             | Proceso matriz reforzada |             |
|                                  |               | Calificación        | Ponderación | Calificación               | Ponderación | Calificación             | Ponderación |
| Calidad del producto             | 0.3           | 6                   | 1.8         | 6                          | 1.8         | 8                        | 2.4         |
| Tiempo de obtención del producto | 0.2           | 8                   | 1.6         | 7                          | 1.4         | 6                        | 1.2         |
| Disponibilidad de quipos         | 0.2           | 10                  | 2           | 5                          | 1           | 3                        | 0.6         |
| Acceso a la materia prima        | 0.2           | 9                   | 1.8         | 7                          | 1.4         | 5                        | 1           |
| Impacto ambiental                | 0.1           | 4                   | 0.4         | 3                          | 0.3         | 4                        | 0.4         |
| <b>Total</b>                     | <b>1</b>      |                     | <b>7.6</b>  |                            | <b>5.9</b>  |                          | <b>5.6</b>  |

Elaboración propia, 2023

La tabla II-3, de selección del proceso de obtención de bioplástico arrojó una puntuación para cada proceso, es de este modo que el proceso con mejor puntuación es el proceso tradicional, debido a que no requiere de equipos sofisticados, los cuales pueden ser encontrados en laboratorio lo que conlleva un costo menor, también tiene un fácil acceso a la materia prima, el ácido acético es una sustancia controlada, sin embargo, se lo puede obtener a través de empresas constituidas para adquirir el reactivo. La obtención del producto es en un tiempo no muy largo, lo que indica una productividad alta.

El impacto ambiental en los tres procesos no es muy alto, esto debido a que principalmente se consideran una alternativa para disminuir el uso de plásticos convencionales, además que al degradarse el bioplástico desprende  $\text{CO}_2$ , pero se trata del dióxido que fue absorbido por la planta, por lo que no significaría un riesgo de contaminación. Sin embargo, la contaminación viene por el uso del suelo para el cultivo de la ajipa y el uso de los distintos químicos que son los que podrían llegar a generar algún tipo de contaminación en su proceso de obtención.

### **2.3. Diseño Factorial**

Los diseños experimentales son un conjunto de métodos y procedimientos utilizados para analizar medidas de variables específicas en una investigación.

Tienen como objetivo obtener información de calidad que permite desarrollar nuevos productos y procesos, ayuda a la comprensión de un mejor sistema y a tomar decisiones para optimizar y mejorar la calidad del producto o proceso a desarrollar.

El más importante de los casos especiales de los diseños factoriales es el que tiene  $k$  factores cada uno a dos niveles, los cuales pueden ser cuantitativos o cualitativos.

Debido a que cada factor en el experimento tiene dos niveles, se les denomina nivel bajo (-) y nivel alto (+), el diseño más pequeño en este tipo de experimentos es el que tiene  $k = 2$  factores. Es muy importante realizar réplicas de cada uno de los tratamientos ya que esto permite comparar entre valores obtenidos y dentro de valores de una misma combinación.

El número de tratamientos o corridas a realizarse en el experimento es  $2^k$  por número de replicas. Cuando el factor está en su nivel bajo su exponente es 0 y cuando está en el nivel alto su exponente es 1.

En un diseño factorial  $2^k$  resulta sencillo expresar los resultados del experimento en términos de un modelo de regresión, aunque se pueden utilizar modelos de efectos como de promedios, el modelo de regresión es mucho más natural e intuitivo. La ecuación del modelo de regresión sería:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$$

Donde  $x_1$  y  $x_2$  representan a los niveles codificados de los factores (-1 y +1), y la variable respuesta y  $\varepsilon$  el error aleatorio.

Para el desarrollo de la presente investigación se plantean dos diseños factoriales, uno para el proceso de extracción del almidón y otro para el proceso de obtención de plástico biodegradable. Para ambos procesos se definieron variables de control.

### **2.3.1. Selección de variables del proceso experimental de extracción de almidón**

Las variables definidas para la extracción de almidón se realizaron en base a referencias bibliográficas ya que son las que más influyen para obtener un buen rendimiento en la extracción del almidón.

#### **- Velocidad de centrifugación**

La velocidad de centrifugación es una técnica de separación utilizada para aislar o concentrar partículas suspendidas en un líquido según su forma o peso al ser sometidas a una fuerza centrífuga.

Según las pruebas preliminares realizadas la velocidad de centrifugación influye en la separación del almidón de la lechada llegando así a influir directamente en el rendimiento del mismo, es por ello que se tomó como variable independiente con velocidades de 2500 r.p.m. a 3500 r.p.m.

### - Tiempo de centrifugación

Para el tiempo de centrifugación se tomó dos tiempos diferentes los cuales son 10 y 15 minutos, esto debido a que en las pruebas preliminares se observó que con un tiempo menor a 10 minutos no se logra una buena separación del almidón y con un tiempo mayor a 15 minutos se genera mayor mancha.

#### 2.3.1.1. Diseño experimental para la extracción de almidón a partir de Ajipa

El diseño factorial para la obtención del almidón se aplicó en la etapa de centrifugado, debido a que es en esta etapa donde se define su rendimiento. Para determinar las variables significativas se plantea un diseño factorial  $2^2$  lo que indica que se tiene dos niveles y dos variables, además se hicieron dos réplicas para cada experimento, haciendo un total de 12 experimentos.

**Tabla II-4: Variables de proceso para la extracción de almidón**

| Variables independientes    | Unidad  | Variable dependiente | Unidad |
|-----------------------------|---------|----------------------|--------|
| Velocidad de centrifugación | r.p.m.  | Rendimiento          | %      |
| Tiempo de centrifugación    | minutos | -                    | -      |

*Fuente: Elaboración propia, 2024*

$$N^{\circ} \text{ variables} = 2 \qquad Niveles = 2$$

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = (2^2) \times 3 = 12$$

**Tabla II-5: Niveles de variación de factores**

| Variables                            | Niveles  |          |
|--------------------------------------|----------|----------|
|                                      | Superior | Inferior |
| Velocidad de centrifugación (r.p.m.) | 3500     | 2500     |
| Tiempo de centrifugación (min)       | 15       | 10       |

*Fuente: Elaboración propia, 2024*

Para facilitar el tratamiento de datos, se codifica las variables por (-1) y (+1), donde (-1) representa el nivel bajo y (+1) el nivel alto de cada variable como se observa en la tabla II-6.

**Tabla II-6: Matriz de experimentos**

| Prueba | Matriz de experimentos |            | Plan de experimentación              |                                |                 |
|--------|------------------------|------------|--------------------------------------|--------------------------------|-----------------|
|        | Variable 1             | Variable 2 | Velocidad de centrifugación (r.p.m.) | Tiempo de centrifugación (min) | Rendimiento %   |
| 1      | -1                     | -1         | 2500                                 | 10                             | y <sub>1</sub>  |
| 2      | 1                      | -1         | 3500                                 | 10                             | y <sub>2</sub>  |
| 3      | -1                     | 1          | 2500                                 | 15                             | y <sub>3</sub>  |
| 4      | 1                      | 1          | 3500                                 | 15                             | y <sub>4</sub>  |
| 5      | -1                     | -1         | 2500                                 | 10                             | y <sub>5</sub>  |
| 6      | 1                      | -1         | 3500                                 | 10                             | y <sub>6</sub>  |
| 7      | -1                     | 1          | 2500                                 | 15                             | y <sub>7</sub>  |
| 8      | 1                      | 1          | 3500                                 | 15                             | y <sub>8</sub>  |
| 9      | -1                     | -1         | 2500                                 | 10                             | y <sub>9</sub>  |
| 10     | 1                      | -1         | 3500                                 | 10                             | y <sub>10</sub> |
| 11     | -1                     | 1          | 2500                                 | 15                             | y <sub>11</sub> |
| 12     | 1                      | 1          | 3500                                 | 15                             | y <sub>12</sub> |

*Fuente: Elaboración propia, 2024*

### **2.3.2. Selección de variables del proceso experimental de obtención de plástico biodegradable**

Las variables definidas para la elaboración de bioplástico se realizaron en base a referencias bibliográficas y mediante pruebas preliminares se evidenció que son las que más influyen para obtener un producto con buenas características.

#### **- Volumen de glicerina**

De acuerdo a las pruebas preliminares realizadas, se evidenció la influencia de la glicerina sobre la lámina de bioplástico otorgándole flexibilidad, por lo cual se tomó como variable independiente trabajando con rangos de 2 ml y 3 ml, debido a que en un mayor volumen se obtiene un bioplástico húmedo.

#### **- Cantidad de pectina**

La cantidad de pectina se tomó como variable independiente debido a que en las pruebas preliminares se evidenció que le otorga características de resistencia a la lámina de bioplástico, por ello se trabajó con rangos de 2,5 g y 3,5 g, también se observó que la ausencia de pectina nos da como resultado láminas de bioplástico delgadas y pegajosas y en exceso nos da laminas rígidas.

#### **- Volumen de ácido acético**

Se tomó como variable independiente debido a que en pruebas preliminares se evidenció que aporta resistencia y transparencia a la lámina de bioplástico, por ello se trabajó con rangos de 2 ml y 4 ml.

#### **2.3.2.1. Diseño experimental para la obtención de plástico biodegradable**

Tomando como referencia las investigaciones de “*Obtención de plástico biodegradable a partir de cascara de papa*” por Mariela Ocampo, 2022 y “*Obtención de bioplástico a partir de cascara de naranja variedad Valencia Tardía*” por Matías Torrez, 2023, para determinar las variables significativas se plantea un diseño factorial  $2^3$  lo que indica que se tiene dos niveles y tres variables haciendo un total de 8 experimentos, además se hizo una réplica para cada experimento, por lo que se tiene

un total de 16 experimentos permitiendo así mayor número de combinación de variables.

**Tabla II-7: Variables de proceso para la obtención de plástico biodegradable**

| Variables independientes | Unidad | Variable dependiente      | Unidad            |
|--------------------------|--------|---------------------------|-------------------|
| Cantidad de pectina      | g      | Resistencia a la tracción | N/cm <sup>2</sup> |
| Volumen de glicerina     | ml     | -                         | -                 |
| Volumen de Ácido acético | ml     | -                         | -                 |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

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

$$\text{Niveles} = 2$$

$$N^{\circ} \text{ experimentos} = (2^3) \times 2 = 16$$

**Tabla II-8: Niveles de variación de factores**

| Variables                     | Niveles  |          |
|-------------------------------|----------|----------|
|                               | Inferior | Superior |
| Cantidad de pectina (g)       | 2,5      | 3.5      |
| Volumen de glicerina (ml)     | 2        | 3        |
| Volumen de ácido acético (ml) | 2        | 4        |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

Para facilitar el tratamiento de datos, se codifica las variables por (-1) y (+1), donde (-1) representa el nivel bajo y (+1) el nivel alto de cada variable como se observa en la tabla II-9.

Tabla II-9: Matriz de experimentos para bioplástico

| Prueba | Matriz de experimentos |            |            | Plan de experimentación |                           |                               |                                                |
|--------|------------------------|------------|------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|
|        | Variable 1             | Variable 2 | Variable 3 | Cantidad de pectina (g) | Volumen de glicerina (ml) | Volumen de ácido acético (ml) | Resistencia a la tracción (N/cm <sup>2</sup> ) |
| 1      | -1                     | -1         | -1         | 2,5                     | 2                         | 2                             | y <sub>1</sub>                                 |
| 2      | 1                      | -1         | -1         | 2,5                     | 2                         | 2                             | y <sub>2</sub>                                 |
| 3      | -1                     | 1          | -1         | 3.5                     | 3                         | 2                             | y <sub>3</sub>                                 |
| 4      | 1                      | 1          | -1         | 3.5                     | 3                         | 2                             | y <sub>4</sub>                                 |
| 5      | -1                     | -1         | 1          | 2,5                     | 2                         | 4                             | y <sub>5</sub>                                 |
| 6      | 1                      | -1         | 1          | 2,5                     | 2                         | 4                             | y <sub>6</sub>                                 |
| 7      | -1                     | 1          | 1          | 3.5                     | 3                         | 4                             | y <sub>7</sub>                                 |
| 8      | 1                      | 1          | 1          | 3.5                     | 3                         | 4                             | y <sub>8</sub>                                 |
| 9      | -1                     | -1         | -1         | 2,5                     | 2                         | 2                             | y <sub>9</sub>                                 |
| 10     | 1                      | -1         | -1         | 2,5                     | 2                         | 2                             | y <sub>10</sub>                                |
| 11     | -1                     | 1          | -1         | 3.5                     | 3                         | 2                             | y <sub>11</sub>                                |
| 12     | 1                      | 1          | -1         | 3.5                     | 3                         | 2                             | y <sub>12</sub>                                |
| 13     | -1                     | -1         | 1          | 2,5                     | 2                         | 4                             | y <sub>13</sub>                                |
| 14     | 1                      | -1         | 1          | 2,5                     | 2                         | 4                             | y <sub>14</sub>                                |
| 15     | -1                     | 1          | 1          | 3.5                     | 3                         | 4                             | y <sub>15</sub>                                |
| 16     | 1                      | 1          | 1          | 3.5                     | 3                         | 4                             | y <sub>16</sub>                                |

Fuente: Elaboración propia, 2025

## 2.4. Equipos, materiales, reactivos e insumos necesarios para el desarrollo del diseño experimental

### 2.4.1. Equipos

Los equipos utilizados para la elaboración de plástico biodegradable son los siguientes:

- Estufa
- Centrífuga
- Secador infrarrojo
- Licuadora
- Moledora
- Tamizador
- Equipo de baño maría
- Balanza digital

Las especificaciones de cada uno de los equipos citados se encuentran en el Anexo 1.

### 2.4.2. Materiales

**Tabla II-10: Materiales utilizados para la obtención de plástico biodegradable a partir de ajipa**

| Material            | Descripción                                                    | Especificación              | Cantidad |
|---------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------|
| Probeta             | Recipiente de vidrio empleado para medir volúmenes.            | Capacidad: 50 ml y 100 ml.  | 2        |
| Vaso de precipitado | Recipiente empleado para contener muestras líquidas, calentar. | Capacidad: 250 ml y 500 ml. | 2        |
| Espátula            | Se emplea para levantar muestras sólidas.                      | -                           | 1        |

|                   |                                                                                                                     |                                                                                                                                |   |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Varilla de vidrio | Consiste en cilindro macizo de vidrio, el cual es empleado para agitar disoluciones.                                | Longitud: 25 cm.                                                                                                               | 1 |
| Cuchillo de acero | Empleado para hacer cortes de la materia prima.                                                                     | -                                                                                                                              | 1 |
| Termómetro        | Instrumento utilizado para la medición de la temperatura de una muestra.                                            | Rango de temperatura: -50°C - +300°C                                                                                           | 1 |
| Vidrio de reloj   | Recipiente de vidrio para depositar sólidos.                                                                        | Diámetro: 10 cm                                                                                                                | 2 |
| pH metro          | Mide la actividad del ion hidrógeno en soluciones acuosas, determinando así la acidez o alcalinidad de una muestra. | Rango de medición: 0-14 pH.<br>Error de medición:<br>Resolución: 0,1 pH.<br>Rango de temperatura: 0-60°C<br>Precisión: 0,1 pH. | 1 |
| Piseta            | Se utilizan para enjuagar el material utilizado.                                                                    | Capacidad: 500 ml                                                                                                              | 1 |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

#### **2.4.3. Reactivos e insumos**

- Ácido acético
- Glicerina

- Pectina
- Almidón de Ajipa
- Agua destilada

## **2.5. Descripción del proceso de obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa a escala laboratorio**

Para la obtención del plástico biodegradable, es necesario previamente extraer el almidón contenido en la ajipa, el cual es descrito a continuación.

### **2.5.1. Extracción de almidón**

#### **2.5.1.1. Recepción de la materia prima (Ajipa)**

La ajipa es adquirida en el mercado Campesino en la localidad de Cercado-Tarija. Se procede a la selección para evitar las raíces con imperfecciones.

**Figura 2-1: Recepción de Ajipa**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### **2.5.1.2. Lavado de la Ajipa con cascara**

Una vez adquiridas las raíces de Ajipa, se procede al lavado con abundante agua para eliminar toda impureza que pudiera llegar a contener.

**Figura 2-2: Lavado de Ajipa**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### **2.5.1.3. Pelado de Ajipa**

Posteriormente, se procede al retiro de la cáscara de la Ajipa de forma manual sin necesidad de hacer uso de un cuchillo ya que este se desprende con facilidad.

**Figura 2-3: Ajipa Pelada**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### 2.5.1.4. Corte y licuado

Se realiza el cortado de la ajipa pelada, esto se realiza con el objetivo de reducir el tamaño de la raíz para facilitar la molienda húmeda, para este procedimiento se utilizó un cuchillo de acero inoxidable. Posteriormente es triturado con la ayuda de una licuadora con el fin de fracturar la estructura celular de la ajipa y de esta manera se liberen los gránulos de almidón que contiene.

**Figura 2-4: Corte y licuado de Ajipa**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### 2.5.1.5. Filtrado y lavado

La muestra triturada se trasvasó a través de un colador filtrante para separar el almidón, la masa remanente consiste en fibra, agua y almidón, por lo que se le realiza varios lavados hasta que el agua del filtrado quede transparente, posteriormente la lechada resultante se vuelve a pasar por un colador para eliminar restos de fibra.

**Figura 2-5: Filtrado y lavado**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### **2.5.1.6. Centrifugado**

En esta operación se separaron las sustancias insolubles por medio de la diferencia de densidades sometidas a una fuerza centrífuga.

Al terminar la centrifugación, se obtienen tres capas en los frascos, el almidón precipitó al fondo, la capa intermedia es denominada “mancha” lo cual es almidón mezclado con material proteico y la capa superior es el agua sobrenadante, misma que se desecha. El tiempo que se dejó centrifugar fue de 10 minutos a una velocidad de 3500 revoluciones por minuto, (r.p.m.).

**Figura 2-6: Almidón centrifugado**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### **2.5.1.7. Lavado del almidón**

El lavado de almidón se realiza para obtener un producto con un color apropiado y mayor pureza, para ello se utilizó agua sobre el almidón precipitado y nuevamente se sometió a la fuerza centrífuga al tiempo y velocidad anteriormente mencionados. Esta operación se realizó hasta eliminar completamente la mancha.

**Figura 2-7: Lavado de Almidón**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### 2.5.1.8. Secado

En esta etapa el almidón precipitado fue trasvasado a bandejas para posteriormente reducir el contenido de humedad en un secador de bandejas durante un periodo de 15 horas a 45°C, una vez concluido el tiempo, se lo almacena a temperatura ambiente.

**Figura 2-8: Secado de Almidón**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### 2.5.1.9. Molienda

Luego de haber terminado la etapa de secado se llevó a molienda para disminuir el tamaño de los gránulos.

**Figura 2-9: Molienda de almidón de Ajipa**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### **2.5.1.10. Tamizado**

El tamizado del almidón se realizó con el fin de utilizar un solo tamaño de partícula, de tal modo que, una vez terminado la molienda, se procedió a tamizar la muestra usando un tamiz vibratorio eléctrico con abertura de malla de 0,25 mm y 0,063 mm en la serie de Tyler.

**Figura 2-10: Almidón tamizado**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### 2.5.1.11. Almidón obtenido

Posterior a la etapa de tamizado, se envasó el almidón en una bolsa hermética para luego ser caracterizado mediante análisis de humedad y porcentaje de amilosa y amilopectina.

**Figura 2-11: Almidón de Ajipa**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

#### 2.5.2. Obtención de plástico biodegradable

##### 2.5.2.1. Preparación de mezcla de plástico biodegradable

Se preparó la primera mezcla, para ello se pesaron 5 g de almidón de ajipa, 3,5 g de pectina, los cuales se mezclaron en sólido en un vaso de precipitado, posteriormente se agregó 80 g de agua destilada caliente, se agitó con una varilla de vidrio hasta lograr una mezcla homogénea.

**Figura 2-12: Preparación de mezcla de plástico biodegradable**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

#### **2.5.2.2. Homogenización de mezcla**

Una vez obtenida la mezcla homogénea se somete a baño maría a una temperatura de 65 °C para luego añadirle 2 ml de glicerina y 4 ml de ácido acético manteniendo la agitación constante por un tiempo de 15 minutos.

**Figura 2-13: Homogenización de mezcla**

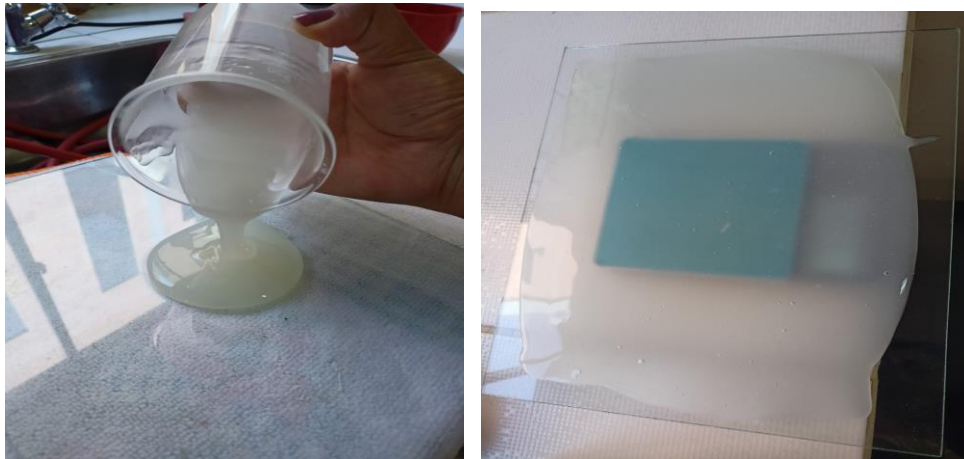


*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### 2.5.2.3. Moldeado

Luego de obtener la mezcla, se procede a verter la misma en placas de vidrio, para esto es muy importante que la muestra quede uniforme al extenderlo.

**Figura 2-14: Moldeado de mezcla**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### 2.5.2.4. Secado

Luego de tener la mezcla vertida en la placa de vidrio, se la deja secar en la estufa a 50°C por un tiempo de 7 horas, posteriormente se lo retira de la estufa para dejarlo enfriar.

**Figura 2-15: Secado de láminas de Plástico biodegradable**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

#### 2.5.2.5. Desmoldado

Una vez obtenida la muestra seca, se procede a dejarlo enfriar para posteriormente desmoldar la lámina de bioplástico y almacenarla.

Una vez obtenidas las láminas de bioplástico se procede a caracterizarlas

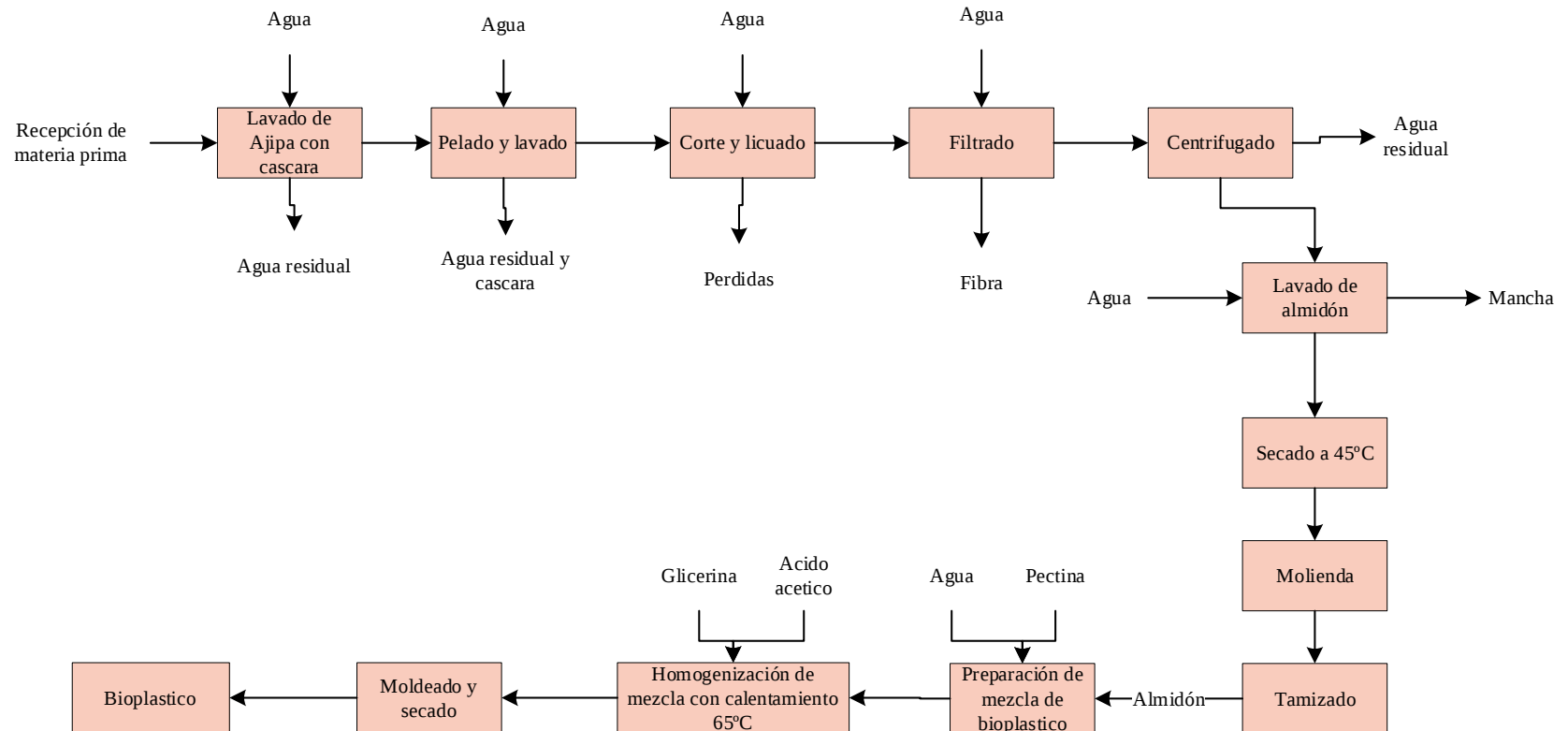
**Figura 2-16: Desmoldado y almacenado de lámina de plástico biodegradable**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

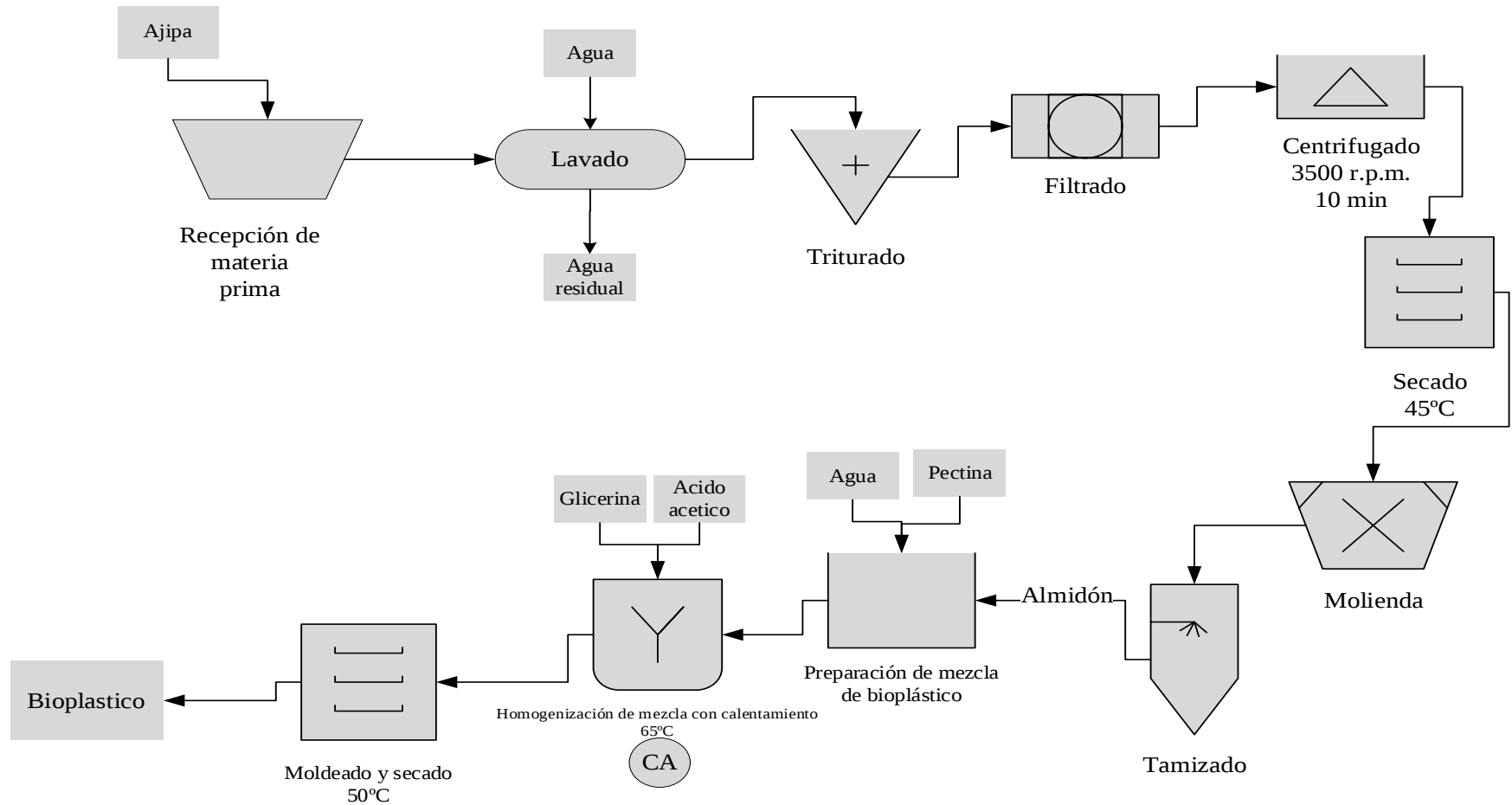
## 2.6. Diagrama del proceso de obtención plástico biodegradable a partir de Ajipa

Figura 2-17: Diagrama de bloques del proceso de obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa



Fuente: Elaboración propia, 2025

**Figura 2-18: Diagrama de flujo instrumentalizado de la obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa**



*Fuente: Elaboración Propia, 2025*

## 2.7. Caracterización del plástico biodegradables

### 2.7.1. Análisis Sensorial

El análisis sensorial permite estimar y seleccionar la formulación de bioplástico que presente las mejores características con respecto a parámetros organolépticos y con características similares a un plástico tradicional. Los parámetros organolépticos que se tomaron en cuenta son el aspecto, textura, flexibilidad y resistencia.

Para este análisis, se valoraron cada uno de los atributos de las láminas de bioplástico según la apreciación del tacto y la vista mediante una escala de puntuación, siendo 1 la puntuación menor como inaceptable y 5 la puntuación mayor como aceptable. (Guamán, 2019).

**Tabla II-11: Escala de puntuación para analisis sensorial**

| Atributos organolépticos |         |               |             | Puntuación |
|--------------------------|---------|---------------|-------------|------------|
| Aspecto                  | Textura | Flexibilidad  | Resistencia |            |
| Opaco                    | Áspero  | Poco flexible | Débil       | 1          |
| Traslucido               | Liso    | Flexible      | Fuerte      | 5          |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### 2.7.2. Determinación del espesor

La determinación del espesor se realizó de acuerdo a la norma española UNE-ISO 4593:2010, para lo cual se usó un micrómetro entre 0 y 25 mm con una precisión de 0.001mm. El procedimiento consistió en realizar 9 mediciones en puntos uniformemente espaciados a lo largo de cada lámina de bioplástico y por último el resultado se expresó como el promedio de las mediciones.

**Figura 2-19: Determinación del espesor**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### **2.7.3. Determinación del contenido de humedad**

Este análisis se realizó de acuerdo a los descrito por la revista del Laboratorio Tecnológico de Uruguay cuyo tema es “Películas biodegradables y comestibles desarrollados en base a aislado de proteínas de suero lácteo: estudio de dos métodos de elaboración y del uso de sorbato de potasio como conservador”, el cual fue citado por Charro, M. (2015). Dicha investigación describe que la humedad se determinó gravimétricamente pesando películas secadas al ambiente y posteriormente llevadas a estufa a 105°C durante 2 horas.

La ecuación utilizada para esta prueba es la siguiente:

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{Peso inicial de la película} - \text{peso final de la película}}{\text{peso final de la película}} \times 100$$

### **2.7.4. Determinación de la resistencia a la tracción**

La determinación de tracción se realizó de acuerdo a la norma NTE INEN 2637:2012, la cual es específicamente para láminas de plástico con un espesor menor a 1 mm, con algunas modificaciones, para ello se trabajó con 1 probeta de 10 mm de ancho y 20 mm de largo por cada muestra.

Las probetas fueron sometidas a fuerzas de tracción, posteriormente se fueron añadiendo pesos hasta observar un cambio en el material.

Esta prueba se realizó en el laboratorio de física perteneciente a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

El esfuerzo máximo se determinó mediante la siguiente ecuación. (Tubón, 2013).

$$\sigma = \frac{f}{a}$$

Donde:

$\sigma$ = Esfuerzo máximo (N/cm<sup>2</sup>)

f= Fuerza (N)

a= área (cm<sup>2</sup>)

#### **2.7.5. Determinación de la biodegradabilidad**

Este análisis se determinó en base a la norma ISO 20200:2006 y la metodología descrita por Charro, M. (2015) con algunas modificaciones, en las que indican que la biodegradabilidad se realizó por método gravimétrico, en este caso se consideró un tiempo de exposición de 28 días.

##### **2.7.5.1. Degradación en tierra**

Para la degradación en tierra, se utilizaron muestras de 3 cm x 3 cm, las cuales fueron enterradas en recipientes a una cierta profundidad desde la superficie con el fin de asegurar condiciones de degradación aeróbica a temperatura ambiente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias perteneciente a la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Juan Misael Saracho. Para ello se utilizó tierra agrícola negra recolectada de la comunidad Chiquiacá perteneciente al municipio de Entre Ríos del departamento de Tarija, con alto contenido de materia orgánica con un pH de 6.26, se evaluó la pérdida de peso cada 7 días y el porcentaje de pérdida de peso se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{perdida de peso} = \frac{\text{peso inicial de la lamina} - \text{peso final de la lámina}}{\text{peso inicial de la lámina}} \times 100$$

**Figura 2-20: Degradación en Tierra**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

#### **2.7.5.2. Degradación en agua**

El procedimiento se realizó de acuerdo a la investigación desarrollada por Ocampo M, 2022. Se pesaron las muestras en una balanza analítica, para posteriormente ser colocadas en recipientes, los cuales fueron llenados con agua hasta que las muestras queden sumergidas, posteriormente los recipientes fueron tapados y dejados en reposo absoluto por 30 días. Transcurrido este tiempo se pesa nuevamente las muestras en una balanza analítica. El porcentaje de biodegradabilidad se obtiene mediante la siguiente formula:

$$\% \text{degradabilidad} = 100 - \left( \frac{\text{peso final de la lámina}}{\text{peso inicial de la lámina}} \times 100 \right)$$

# **CAPÍTULO III**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización de la materia prima (Pachyrhizus Ahipa (Wedd))

A continuación, se detallan los análisis realizados a la Ajipa (Pachyrhizus Ahipa (Wedd)).

##### 3.1.1. Propiedades fisicoquímicas

En la tabla III-1, se muestran los resultados obtenidos sobre las propiedades fisicoquímicas que presenta la Ajipa.

**Tabla III-1: Propiedades fisicoquímicas de la Ajipa**

| Nº | Parámetros             | Técnicas y/o<br>Método de<br>ensayo | Unidad    | Resultado |
|----|------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|
| 1  | Ceniza                 | NB 39034:10                         | g/100g    | 0,41      |
| 2  | Fibra                  | Gravimétrico                        | g/100g    | 1,1       |
| 3  | Grasa                  | NB 313019:06                        | g/100g    | 0,17      |
| 4  | Humedad                | Calculo                             | g/100g    | 79,2      |
| 5  | Hidratos de<br>Carbono | NB 313010:05                        | g/100g    | 18,98     |
| 6  | Proteína Total         | NB/ISO 8968-<br>1:08                | g/100g    | 1,24      |
| 7  | Valor<br>Energético    | Calculo                             | kcal/100g | 82,41     |

*Fuente: CEANID,2024*

De acuerdo a los resultados, se puede observar que la ajipa presenta un alto contenido de agua el cual corresponde a 79,20 gramos en 100 gramos de porción comestible y

con una cantidad de hidratos de carbono igual a 18,98 gramos en 100 gramos de porción comestible de ajipa, de los cuales gran parte es almidón.

### 3.1.2. Propiedades físicas

Este análisis se realizó de acuerdo a la metodología realizada por Almazan, J. (2017) con algunas modificaciones, se tomaron diez muestras tomadas al azar a las que se les tomó medidas de longitud, diámetro y peso, posteriormente se calculó el promedio. Los resultados se muestran en la tabla III-2.

**Tabla III-2: Propiedades físicas de la Ajipa**

| <b>Muestras</b> | <b>Longitud (cm)</b> | <b>Diámetro (cm)</b> | <b>Peso (g)</b> | <b>Peso de porción comestible (g)</b> | <b>Peso porción no comestible (g)</b> | <b>Porción comestible (%)</b> | <b>Porción no comestible (%)</b> |
|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 1               | 18,20                | 7,58                 | 404,70          | 384,60                                | 20,10                                 | 95,03                         | 4,967                            |
| 2               | 14,70                | 6,80                 | 268,40          | 255,90                                | 12,50                                 | 95,34                         | 4,657                            |
| 3               | 15,10                | 6,18                 | 296,10          | 283,50                                | 12,60                                 | 95,74                         | 4,255                            |
| 4               | 20,50                | 9,26                 | 601,10          | 557,90                                | 43,20                                 | 92,81                         | 7,187                            |
| 5               | 13,40                | 5,63                 | 205,40          | 194,60                                | 10,80                                 | 94,74                         | 5,258                            |
| 6               | 16,50                | 6,91                 | 378,20          | 357,80                                | 20,40                                 | 94,61                         | 5,394                            |
| 7               | 22,20                | 8,12                 | 629,40          | 596,10                                | 33,30                                 | 94,71                         | 5,291                            |
| 8               | 17,80                | 6,69                 | 291,90          | 276,40                                | 15,50                                 | 94,69                         | 5,310                            |
| 9               | 15,30                | 6,32                 | 410,40          | 392,50                                | 17,90                                 | 95,64                         | 4,362                            |
| 10              | 19,10                | 7,25                 | 386,70          | 369,10                                | 17,60                                 | 95,45                         | 4,551                            |
| <b>Promedio</b> | <b>17,28</b>         | <b>7,07</b>          | <b>387,23</b>   | <b>366,84</b>                         | <b>20,39</b>                          | <b>94,88</b>                  | <b>5,123</b>                     |

*Fuente: Elaboración propia, 2024*

De acuerdo a los resultados promediados, la ajipa tiene una longitud promedio de 17, 28 cm, un diámetro de 7,07 cm y un peso de 387, 23 gramos, de los cuales, el 94,88% es la porción comestible y el 5,12% corresponde a la porción no comestible.

### 3.2. Resultados del proceso de extracción de almidón a partir de Ajipa

Los resultados del proceso de obtención de almidón de acuerdo al diseño factorial propuesto teniendo como variable dependiente el rendimiento se encuentran plasmados en la tabla III-3.

Para determinar el rendimiento del proceso de obtención de almidón a partir de Ajipa se basó en la relación entre la cantidad de almidón obtenido y la cantidad Ajipa utilizada.

$$\text{Rendimiento \%} = \frac{\text{Peso de almidón Obtenido (g)}}{\text{peso de Ajipa (g)}} \times 100$$

**Tabla III-3: Resultados del rendimiento (%) del proceso de obtención de almidón a partir de Ajipa**

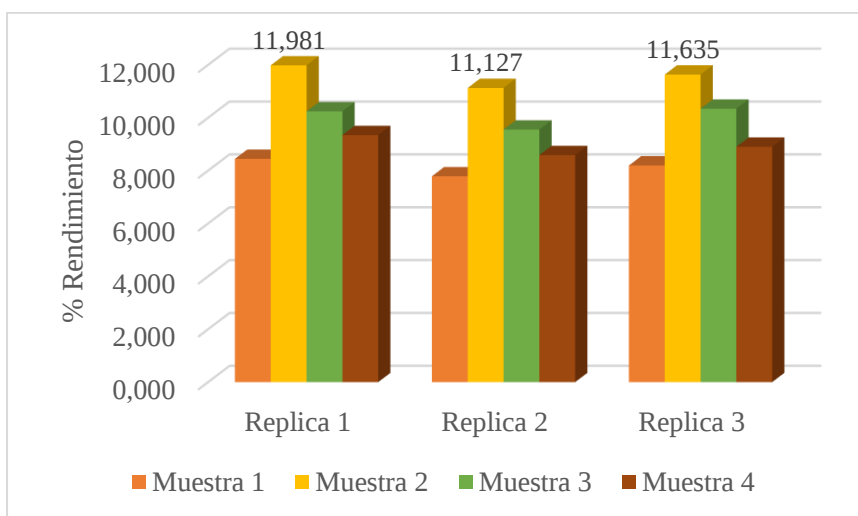
| Numero de Experiencias | Velocidad de centrifugación (r.p.m.) | Tiempo de centrifugación (min) | Rendimiento % |           |           |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---------------|-----------|-----------|
|                        |                                      |                                | Replica 1     | Replica 2 | Replica 3 |
| 1                      | 2500                                 | 10                             | 8,447         | 7,787     | 8,196     |
| 2                      | 3500                                 | 10                             | 11,981        | 11,127    | 11,635    |
| 3                      | 2500                                 | 15                             | 10,242        | 9,554     | 10,342    |
| 4                      | 3500                                 | 15                             | 9,344         | 8,588     | 8,904     |

*Fuente: Elaboración propia, 2024*

En la tabla se observan los resultados del rendimiento de las 4 experiencias con sus respectivas réplicas. En la réplica 1 los resultados oscilan entre el 8,447% a 11,981 %, mientras que en la réplica 2 oscilan entre 7,878% a 11,127% y, por último, en la réplica 3 los resultados oscilan entre 8,196% a 11,635%.

Se puede observar que los resultados con mejores rendimientos pertenecen a la experiencia número 2 y sus respectivas réplicas, lo cual indica que las condiciones ideales de velocidad y tiempo de centrifugación son de 3500 r.p.m. por un tiempo de 10 minutos. Mientras que en condiciones como 2500 r.p.m. y 10 min y 3500 r.p.m. y 15 minutos se obtienen los resultados más bajos de rendimientos, debido a que, a estas condiciones, no se logra la separación completa del almidón generando pérdidas o, por el contrario, se logra separar incluyendo una mayor cantidad de mancha que es una composición de proteínas y fibras finas, al ser eliminada genera pérdida de almidón.

**Figura 3-1: Análisis de Rendimiento por muestra**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

### 3.3. Caracterización del almidón de ajipa

#### 3.3.1. Análisis de humedad

El análisis de humedad se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (L.O.U) de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija.

**Tabla III-4: Análisis humedad del almidón de Ajipa**

| Parámetro | Unidad | Resultado |
|-----------|--------|-----------|
| Humedad   | %      | 5,99      |

*Fuente: Elaboración propia, 2024*

Como se observa en la tabla III-4, el contenido de humedad del almidón extraído de la Ajipa es de 5,99 % lo que indica que el almidón tiene bajo contenido de agua, tuvo un proceso de secado eficiente y garantiza la estabilidad del almidón durante periodos de almacenamiento prolongado manteniendo sus propiedades para su posterior aplicación industrial o alimentaria, ya que detiene la proliferación de microorganismos tales como hongos, bacterias, por lo que el riesgo de deterioro microbiológico es bajo.

**Figura 3-2: Análisis de humedad del almidón de Ajipa**

*Fuente: Elaboración propia, 2024*

### 3.3.2. Análisis de amilosa y amilopectina

En la tabla III-5, se muestran los resultados de los análisis realizados al almidón de Ajipa en la cual se observa que el contenido de amilosa es del 31,69 %, mientras que el contenido de amilopectina es del 67,41 %, lo que indica que el almidón de Ajipa posee un potencial equilibrado para la producción de plástico biodegradable.

Por un lado, la amilosa con 31,69 % sugiere la posibilidad de formar películas con una resistencia mecánica aceptable y, por otro lado, el contenido de amilopectina con 67,41 % al ser predominante sugiere la facilidad del procesamiento para la formación de películas de bioplástico otorgándole cierta flexibilidad.

**Tabla III-5: Análisis de Amilosa y Amilopectina del almidón de Ajipa**

| Parámetros   | Método       | Unidad | Resultado | Limite permisible |
|--------------|--------------|--------|-----------|-------------------|
| Amilosa      | Volumétrico  | %      | 31,69     | SLR               |
| Amilopectina | Gravimétrico | %      | 67,41     | SLR               |

*Fuente: Sector Agroindustrial de SGLAB S.R.L., 2024*

### **3.4. Análisis estadístico del diseño factorial en el proceso de extracción de almidón a partir de Ajipa**

#### **3.4.1. Análisis de varianza ANOVA del diseño factorial**

El análisis estadístico se realizó usando el programa IBM SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) Versión 26.0 para Windows, dicho programa permite un tratamiento integrado de todas las fases de análisis de datos y de esa manera obtener resultados más significativos.

El diseño factorial, tiene el propósito de determinar si los factores velocidad y tiempo de centrifugación tienen influencia en el rendimiento del proceso de obtención de almidón.

En la tabla III-6 se muestran los datos introducidos al programa de acuerdo al diseño factorial planteado.

**Tabla III-6: Matriz de diseño experimental en el proceso de extracción de almidón a partir de Ajipa**

| Experiencias | Factores                             |                                | Variable respuesta |
|--------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------|
|              | Velocidad de centrifugación (r.p.m.) | Tiempo de centrifugación (min) | Rendimiento %      |
| 1            | -1                                   | -1                             | 8,447              |
| 2            | 1                                    | -1                             | 11,981             |
| 3            | -1                                   | 1                              | 10,242             |
| 4            | 1                                    | 1                              | 9,344              |
| 5            | -1                                   | -1                             | 7,787              |
| 6            | 1                                    | -1                             | 11,127             |
| 7            | -1                                   | 1                              | 9,554              |
| 8            | 1                                    | 1                              | 8,588              |
| 9            | -1                                   | -1                             | 8,196              |
| 10           | 1                                    | -1                             | 11,635             |
| 11           | -1                                   | 1                              | 10,342             |
| 12           | 1                                    | 1                              | 8,904              |

*Fuente: Elaboración propia, 2024*

Las variables significativas son aquellas que poseen un nivel de confianza del 95 %, y se tiene una cola de significancia del 5 %, por lo que cualquier valor menor a 0,05 en la columna de significancia indica si la variable es o no significativa en el proceso.

En la tabla III-7, se muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza en el programa anteriormente mencionado, en donde se pueden observar las variables significativas del proceso.

**Tabla III-7: Prueba de efectos inter-sujetos para almidón de Ajipa**

| <b>Variable dependiente: Rendimiento</b>                |                                      |           |                         |               |              |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-------------------------|---------------|--------------|
| <b>Origen</b>                                           | <b>Tipo III de suma de cuadrados</b> | <b>gl</b> | <b>Media cuadrática</b> | <b>F</b>      | <b>Sig.</b>  |
| Modelo corregido                                        | 19,946 <sup>a</sup>                  | 3         | 6,649                   | 42,641        | 0,000        |
| Intersección                                            | 1124,177                             | 1         | 1124,177                | 7209,618      | 0,000        |
| <b>Velocidad</b>                                        | <b>4,096</b>                         | <b>1</b>  | <b>4,096</b>            | <b>26,270</b> | <b>0,001</b> |
| Tiempo                                                  | 0,403                                | 1         | 0,403                   | 2,584         | 0,147        |
| <b>Velocidad * Tiempo</b>                               | <b>15,447</b>                        | <b>1</b>  | <b>15,447</b>           | <b>99,068</b> | <b>0,000</b> |
| Error                                                   | 1,247                                | 8         | 0,156                   |               |              |
| Total                                                   | 1145,371                             | 12        |                         |               |              |
| Total corregido                                         | 21,194                               | 11        |                         |               |              |
| a. R al cuadrado = ,941 (R al cuadrado ajustada = ,919) |                                      |           |                         |               |              |

*Fuente: Elaboración propia, SPSS 26, 2024*

Como resultado del análisis estadístico, se observa que la variable velocidad y la interacción Velocidad\*Tiempo son significativas ya que los valores de significancia son menores a 0,05, por lo que, si tienen un efecto real sobre la variable dependiente, mientras que la variable tiempo no es significativa ya que su valor es 0,146 el cual supera el nivel de significancia, es decir, no tiene efecto sobre la variable dependiente.

### 3.4.2. Regresión lineal del diseño factorial

La regresión lineal permite analizar y predecir como influyen las variables independientes significativas sobre la variable dependiente y de esta manera construir un modelo que explique la variación de los resultados en función a las variables estudiadas.

**Tabla III-8: Resumen del modelo<sup>b</sup> para almidón de Ajipa**

| Modelo                                          | R                 | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|-------------------------------------------------|-------------------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 1                                               | ,960 <sup>a</sup> | 0,922      | 0,905               | 0,42822                         |
| a. Predictores: (Constante), VelTiem, Velocidad |                   |            |                     |                                 |
| b. Variable dependiente: Rendimiento            |                   |            |                     |                                 |

*Fuente: Elaboración propia SPSS 26,2024*

En la tabla III-8, se muestra el resumen del modelo con una R (correlación múltiple) de 0,960 que indica una correlación positiva y significativa entre las variables predictoras y la variable dependiente, también indica un R cuadrado igual a 0,922 que sugiere un buen ajuste a los datos y un modelo confiable. Por último, el modelo presentó un error estándar de la estimación de 0,42822 lo que indica que los valores predichos por la regresión tienen un error promedio de  $\pm 0,42822\%$  respecto al rendimiento real.

El análisis de varianza ANOVA muestra el nivel de significancia del modelo de regresión.

**Tabla III-9: Análisis de Varianza para almidón de Ajipa**

| <b>ANOVA<sup>a</sup></b>                        |                          |           |                         |          |                   |
|-------------------------------------------------|--------------------------|-----------|-------------------------|----------|-------------------|
| <b>Modelo</b>                                   | <b>Suma de cuadrados</b> | <b>gl</b> | <b>Media cuadrática</b> | <b>F</b> | <b>Sig.</b>       |
| Regresión                                       | 19,544                   | 2         | 9,772                   | 53,288   | ,000 <sup>b</sup> |
| Residuo                                         | 1,650                    | 9         | 0,183                   |          |                   |
| Total                                           | 21,194                   | 11        |                         |          |                   |
| a. Variable dependiente: Rendimiento            |                          |           |                         |          |                   |
| b. Predictores: (Constante), VelTiem, Velocidad |                          |           |                         |          |                   |

*Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2024*

En la tabla III-9, se observan los resultados de la regresión lineal que indican que el modelo de regresión es estadísticamente significativo ya que posee un valor de F igual a 53,288 que es un valor alto, lo que indica que el modelo explica una parte muy importante de la variabilidad, también muestra una significancia menor a 0,05, que indica que las variables VelTiem y velocidad tienen un efecto significativo en el proceso.

**Tabla III-10: Coeficiente del Modelo de regresión lineal para el almidón**

| <b>Coeficientes<sup>a</sup></b>      |                                       |                    |                                    |          |             |                                            |                        |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|------------------------------------|----------|-------------|--------------------------------------------|------------------------|
| <b>Modelo</b>                        | <b>Coeficientes no estandarizados</b> |                    | <b>Coeficientes estandarizados</b> | <b>t</b> | <b>Sig.</b> | <b>95,0% intervalo de confianza para B</b> |                        |
|                                      | <b>B</b>                              | <b>Desv. Error</b> | <b>Beta</b>                        |          |             | <b>Límite inferior</b>                     | <b>Límite superior</b> |
| (Constante)                          | 9,679                                 | 0,124              |                                    | 78,297   | 0,000       | 9,399                                      | 9,959                  |
| Velocidad                            | 0,584                                 | 0,124              | 0,440                              | 4,726    | 0,001       | 0,305                                      | 0,864                  |
| VelTiem                              | -1,135                                | 0,124              | -0,854                             | -9,178   | 0,000       | -1,414                                     | -0,855                 |
| a. Variable dependiente: Rendimiento |                                       |                    |                                    |          |             |                                            |                        |

*Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2024*

En la tabla III-10, se presentan los coeficientes del modelo de regresión lineal en función de la velocidad y tiempo. La constante del modelo es de 9,679 lo que indica que cuando la velocidad y tiempo se encuentren en sus valores más bajos, el rendimiento estimado sería aproximadamente de 9,679%. Por otro lado, la velocidad tiene un coeficiente de 0,584 con un nivel de significancia del 0,001, esto indica que la variable velocidad afecta de forma positiva a la variable respuesta, rendimiento, es decir, que al aumentar la velocidad manteniendo un tiempo constante, el rendimiento aumenta en 0,584%. Por último, la interacción Vel\*Tiem tiene un coeficiente igual a -1,135 con un nivel de confianza igual a 0,000 lo que indica que la interacción tiene un efecto negativo significativo sobre el rendimiento, es decir que una mala combinación de los factores velocidad y tiempo reducen de manera significativa el rendimiento.

Con los valores numéricos de B es posible tener el modelo matemático de la regresión lineal para el rendimiento, dichos valores son:

$$\text{Constante} = 9,679$$

$$\text{Velocidad} = 0,584$$

$$\text{Vel} * \text{Tiem} = -1,135$$

De tal modo, el modelo matemático resulta en:

$$\% \text{Rendimiento} = 9,679 + 0,584 * X_1 - 1,135 * X_2$$

Donde:

$$X_1 = \text{Velocidad}$$

$$X_2 = \text{Vel} * \text{Tiem}$$

En la tabla III-11, se muestra los datos de % rendimiento observado y el % rendimiento del modelo y también se observa la diferencia (Error) en cada uno de los casos, se puede observar que los rendimientos más altos del modelo coinciden con las muestras 2, 6 y 10.

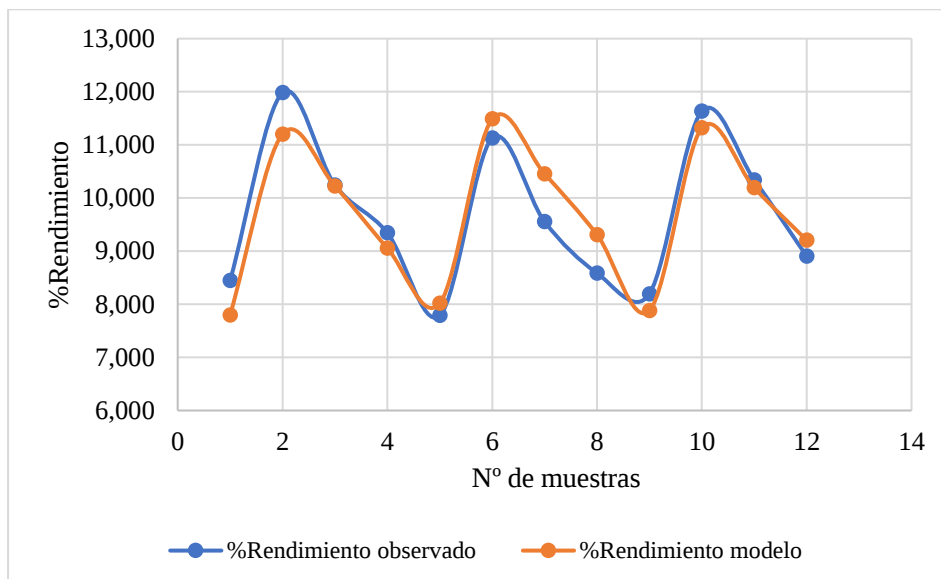
**Tabla III-11: Comparación entre % Rendimiento observado y % Rendimiento del modelo**

| <b>Muestras</b> | <b>% Rendimiento observado</b> | <b>% Rendimiento modelo</b> | <b>Error</b> |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 1               | 8,447                          | 7,798                       | 0,649        |
| 2               | 11,981                         | 11,203                      | 0,778        |
| 3               | 10,242                         | 10,225                      | 0,017        |
| 4               | 9,344                          | 9,057                       | 0,288        |
| 5               | 7,787                          | 8,018                       | -0,231       |
| 6               | 11,127                         | 11,488                      | -0,361       |
| 7               | 9,554                          | 10,454                      | -0,900       |
| 8               | 8,588                          | 9,309                       | -0,721       |
| 9               | 8,196                          | 7,881                       | 0,315        |
| 10              | 11,635                         | 11,319                      | 0,316        |
| 11              | 10,342                         | 10,192                      | 0,150        |
| 12              | 8,904                          | 9,203                       | -0,300       |

*Fuente: Elaboración propia, 2024*

En la figura 3-4, se muestra gráficamente la comparación del % de rendimiento observado y del modelo, se puede observar que las dos líneas tienen una similitud de trayectoria y un error no muy significativo.

**Figura 3-4: Comparación gráfica del %Rendimiento observado y %Rendimiento modelo**



*Fuente: Elaboración propia, 2024*

### 3.5. Caracterización del plástico biodegradables

#### 3.5.1. Análisis sensorial

Se evaluaron las ocho muestras de bioplástico tomando en cuenta el aspecto, textura, flexibilidad y resistencia en una escala de calificación de 1 como opaco, áspero, poco flexible y débil y, 5 como traslúcido, liso, flexible y fuerte.

**Tabla III-12: Resultados de análisis sensorial del bioplástico**

| <b>Muestra</b> | <b>Aspecto</b> | <b>Textura</b> | <b>Flexibilidad</b> | <b>Resistencia</b> |
|----------------|----------------|----------------|---------------------|--------------------|
| <b>1</b>       | Traslúcido     | Liso           | Poco flexible       | Fuerte             |
| <b>2</b>       | Traslúcido     | Áspero         | Poco flexible       | Débil              |
| <b>3</b>       | opaco          | Liso           | Flexible            | Débil              |
| <b>4</b>       | opaco          | Áspero         | Flexible            | Débil              |
| <b>5</b>       | Traslúcido     | Áspero         | Flexible            | Fuerte             |
| <b>6</b>       | Traslúcido     | Liso           | Flexible            | Fuerte             |
| <b>7</b>       | Traslúcido     | Liso           | Flexible            | Débil              |
| <b>8</b>       | opaco          | Liso           | Flexible            | Débil              |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

Como se observa en la tabla III-12, en general, las muestras presentaron una buena flexibilidad, sin embargo, también se debe tomar en cuenta la resistencia siendo esta importante para su aplicabilidad.

Las muestras uno y dos presentaron un aspecto traslucido, aunque la muestra dos presentó una textura áspera, ambas presentaron poca flexibilidad, por otro lado, la muestra uno fue la que presentó una resistencia fuerte mientras que la dos presentó una resistencia débil.

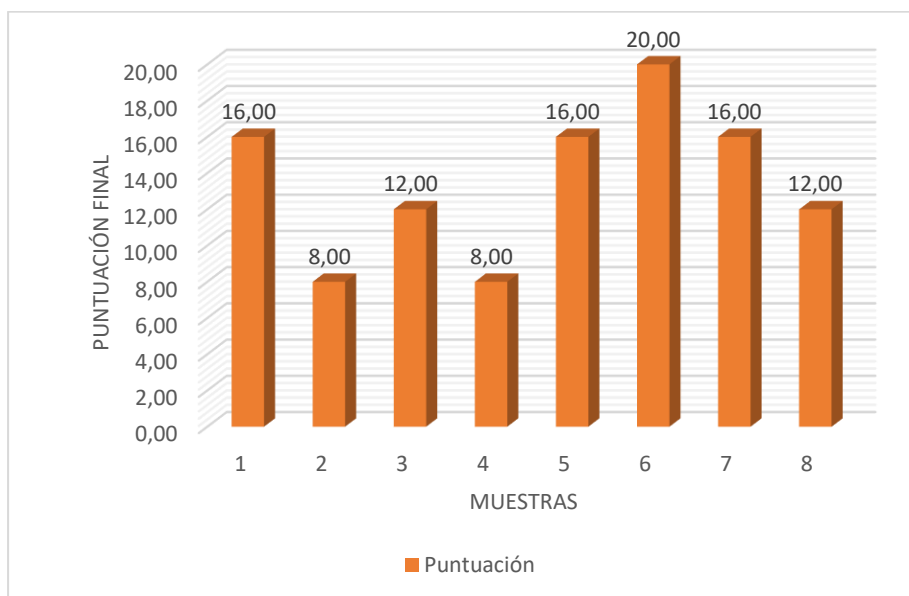
La muestra tres presentó un aspecto opaco y una textura lisa, sin embargo, presentó una resistencia débil, a pesar de tener buena flexibilidad, la muestra cuatro también presentó un aspecto opaco, con una textura áspera, y de igual modo presentó una resistencia débil.

La muestra cinco presentó un aspecto traslucido, textura áspera y flexibilidad así también la muestra seis, que presentó similares características, pero con una textura lisa, sin embargo, ambas presentaron una resistencia fuerte.

Por otro lado, la muestra siete a pesar de presentar un aspecto traslucido, liso y ser flexible, no se tomó en cuenta debido a que presentó una resistencia débil, también la muestra ocho, no se le tomó en cuenta a pesar de presentar una buena flexibilidad, presentó una resistencia débil y un aspecto opaco.

En la figura 3-5, se tiene la puntuación final del análisis sensorial realizado a las ocho muestras experimentales, en la cual se evidencia que la formulación seis es la que presentó mejor puntuación, seguida de las muestras uno y cinco que presentaron una resistencia fuerte, es por eso que se tomó en cuenta dichas muestras para su posterior caracterización.

**Figura 3-5: Análisis sensorial del bioplástico**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### 3.5.2. Determinación del espesor

En la tabla III-13, se muestran los resultados de los promedios de las 9 mediciones que se hicieron a las muestras uno, cinco y seis con su réplica. Dichos resultados presentan un rango de entre 0,143 mm hasta 0.213 mm.

Como referencia se consideró la investigación desarrollada por Ocampo Yuca, (2022) en donde se reportaron espesores entre 0,2 mm y 0,37 mm en bioplásticos a partir de almidón de cáscara de papa, asimismo en dicha investigación se determinó que la muestra de bioplástico con un espesor igual a 0,2 mm fue el que presentó mejores propiedades físicas, también se consideró la norma UNE-ISO 4593:2010 que establece un límite referencial de 0,2 mm de espesor para láminas plásticas.

De tal forma, se observa que la muestra 6 es la que presenta valor más cercano al espesor óptimo observado en las referencias, mientras que las muestras 1 y 5 están ligeramente por debajo del límite referencial.

**Tabla III-13: Medidas de espesor de bioplástico**

| Muestras |           | Espesor (mm) |
|----------|-----------|--------------|
| 1        | Réplica 1 | 0,168        |
|          | Réplica 2 | 0,167        |
| 5        | Réplica 1 | 0.143        |
|          | Réplica 2 | 0.192        |
| 6        | Réplica 1 | 0.213        |
|          | Réplica 2 | 0.203        |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### 3.5.3. Determinación del contenido de humedad

En la tabla III-14 se presenta los resultados del % de humedad de las muestras 1, 5 y 6, dichos resultados se obtuvieron de láminas de bioplástico de 3 x 3 cm.

De tal forma, se pueden observar los resultados de humedad de las muestras de bioplástico, en donde la muestra 1 presentó una humedad promedio de 23,08 %, la muestra 5 presentó una humedad promedio de 23,75 % y, por otro lado, la muestra 6 presentó una humedad promedio de 22,98 %.

Tomando como referencia la investigación la investigación de Parra, J. (2019) en donde arrojó valores de contenido de humedad entre 15,49 % a 37,88 %, los datos obtenidos están dentro de estos límites de referencia, además se menciona que el contenido de humedad es una característica propia de los plásticos biodegradables ya que es la razón primordial para que se dé su degradación.

**Tabla III-14: Contenido de porcentaje de humedad de muestras de bioplástico**

| Muestra |           | %Humedad | % Humedad promedio |
|---------|-----------|----------|--------------------|
| 1       | Réplica 1 | 23,626   | 23,08              |
|         | Réplica 2 | 22,541   |                    |
| 5       | Réplica 1 | 25,397   | 23,75              |
|         | Réplica 2 | 22,105   |                    |
| 6       | Réplica 1 | 22,34    | 22,98              |
|         | Réplica 2 | 23,62    |                    |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### 3.5.4. Determinación de resistencia a la tracción

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla III-15, se observa que la muestra 6 es la que presenta mayor resistencia a la tracción promedio de 303,497 N/cm<sup>2</sup>, lo que indica que es la muestra más resistente entre todas las demás muestras analizadas, dicha muestra presenta parámetros de 3,5 g de pectina, 2 ml de glicerina, 4 ml de ácido acético, 80 ml de agua y 5 g de almidón de ajipa.

**Tabla III-15: Resultados de Resistencia a la tracción**

| Muestra          | Parámetros  |                |                    | Resistencia a la tracción (N/cm <sup>2</sup> ) |                |                |
|------------------|-------------|----------------|--------------------|------------------------------------------------|----------------|----------------|
|                  | Pectina (g) | Glicerina (ml) | Ácido Acético (ml) | Réplica 1                                      | Réplica 2      | Promedio       |
| Muestra 1        | 2,5         | 2              | 2                  | 190,314                                        | 175,109        | 182,711        |
| Muestra 2        | 3,5         | 2              | 2                  | 227,860                                        | 248,371        | 238,115        |
| Muestra 3        | 2,5         | 3              | 2                  | 131,543                                        | 159,635        | 145,589        |
| Muestra 4        | 3,5         | 3              | 2                  | 109,176                                        | 98,733         | 103,954        |
| Muestra 5        | 2,5         | 2              | 4                  | 259,148                                        | 256,695        | 257,921        |
| <b>Muestra 6</b> | <b>3,5</b>  | <b>2</b>       | <b>4</b>           | <b>285,716</b>                                 | <b>321,278</b> | <b>303,497</b> |
| Muestra 7        | 2,5         | 3              | 4                  | 137,856                                        | 122,367        | 130,112        |
| Muestra 8        | 3,5         | 3              | 4                  | 115,327                                        | 158,874        | 137,101        |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### **3.5.5. Determinación de biodegradabilidad**

#### **3.5.5.1. Degradación en tierra**

En la tabla III-16, se muestran los resultados de porcentaje de biodegradabilidad, como se puede observar cada una de las muestras y sus respectivas réplicas presentaron un desgaste en peso en el transcurso de los 28 días, la muestra que resultó con mayor porcentaje de degradación física fue la muestra numero 4 con 71,064%, mientras que, la que tuvo mayor resistencia a la degradación fue la muestra 2 con 49,310%.

**Tabla III-16: Degradación en tierra del plástico biodegradable**

| Muestras |                  | Peso de muestra (gr) |              |              |              |              | % Biodegradabilidad | % Promedio    |
|----------|------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|---------------|
|          |                  | Día 0                | Día 7        | Día 14       | Día 21       | Día 28       |                     |               |
| M.1      | Réplica 1        | 0,155                | 0,126        | 0,11         | 0,092        | 0,060        | 61,290              | 60,878        |
|          | Réplica 2        | 0,172                | 0,145        | 0,116        | 0,098        | 0,068        | 60,465              |               |
| M.2      | Réplica 1        | 0,29                 | 0,223        | 0,205        | 0,161        | 0,147        | 49,310              | 49,952        |
|          | Réplica 2        | 0,253                | 0,21         | 0,187        | 0,146        | 0,125        | 50,593              |               |
| M.3      | Réplica1         | 0,211                | 0,137        | 0,116        | 0,099        | 0,077        | 63,507              | 62,763        |
|          | Réplica 2        | 0,208                | 0,132        | 0,11         | 0,094        | 0,079        | 62,019              |               |
| M.4      | <b>Réplica 1</b> | <b>0,235</b>         | <b>0,195</b> | <b>0,158</b> | <b>0,108</b> | <b>0,068</b> | <b>71,064</b>       | <b>68,325</b> |
|          | <b>Réplica 2</b> | <b>0,247</b>         | <b>0,203</b> | <b>0,165</b> | <b>0,121</b> | <b>0,085</b> | <b>65,587</b>       |               |
| M.5      | Réplica 1        | 0,196                | 0,148        | 0,125        | 0,101        | 0,081        | 58,673              | 56,019        |
|          | Réplica 2        | 0,208                | 0,167        | 0,142        | 0,118        | 0,097        | 53,365              |               |
| M.6      | Réplica 1        | 0,169                | 0,15         | 0,123        | 0,105        | 0,08         | 52,663              | 53,375        |
|          | Réplica 2        | 0,159                | 0,135        | 0,109        | 0,096        | 0,073        | 54,088              |               |
| M.7      | Réplica 1        | 0,238                | 0,206        | 0,178        | 0,138        | 0,103        | 56,723              | 57,887        |
|          | Réplica 2        | 0,232                | 0,198        | 0,165        | 0,126        | 0,095        | 59,052              |               |
| M.8      | Réplica 1        | 0,224                | 0,182        | 0,132        | 0,109        | 0,086        | 61,607              | 60,241        |
|          | Réplica 2        | 0,231                | 0,209        | 0,172        | 0,126        | 0,095        | 58,874              |               |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

A continuación, en la tabla III-17 se muestra el porcentaje de biodegradación por día

**Tabla III-17: Porcentaje de degradación en tierra por día**

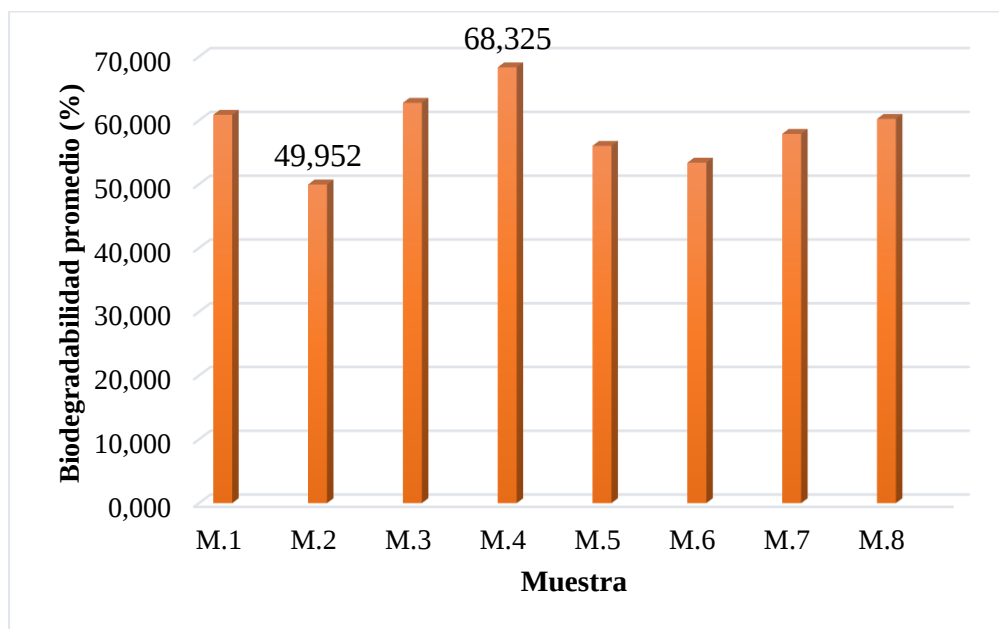
| <b>Muestras</b> |                  | <b>% Biodegradación cada 7 días</b> |               |               |               |
|-----------------|------------------|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                 |                  | <b>Día 7</b>                        | <b>Día 14</b> | <b>Día 21</b> | <b>Día 28</b> |
| M.1             | Réplica 1        | 18,710                              | 29,032        | 40,645        | 61,290        |
|                 | Réplica 2        | 15,698                              | 32,558        | 43,023        | 60,465        |
| M.2             | Réplica 1        | 23,103                              | 29,310        | 44,483        | 49,310        |
|                 | Réplica 2        | 16,996                              | 26,087        | 42,292        | 50,593        |
| M.3             | Réplica1         | 35,071                              | 45,024        | 53,081        | 63,507        |
|                 | Réplica 2        | 36,538                              | 47,115        | 54,808        | 62,019        |
| <b>M.4</b>      | <b>Réplica 1</b> | <b>17,021</b>                       | <b>35,319</b> | <b>54,043</b> | <b>71,064</b> |
|                 | <b>Réplica 2</b> | <b>17,814</b>                       | <b>33,198</b> | <b>51,012</b> | <b>65,587</b> |
| M.5             | Réplica 1        | 24,490                              | 36,224        | 48,469        | 58,673        |
|                 | Réplica 2        | 19,712                              | 31,731        | 43,269        | 53,365        |
| M.6             | Réplica 1        | 11,243                              | 27,219        | 37,870        | 52,663        |
|                 | Réplica 2        | 15,094                              | 31,447        | 39,623        | 54,088        |
| M.7             | Réplica 1        | 13,445                              | 25,210        | 42,017        | 56,723        |
|                 | Réplica 2        | 14,655                              | 28,879        | 45,690        | 59,052        |
| M.8             | Réplica 1        | 18,750                              | 41,071        | 51,339        | 61,607        |
|                 | Réplica 2        | 9,524                               | 25,541        | 45,455        | 58,874        |

*Fuente: elaboración propia, 2025*

En la figura 3-6, se puede observar el porcentaje de biodegradación promedio de cada muestra y se evidencia que la muestra 4 obtuvo el mayor porcentaje de degradación

con un 68,325 % mientras que la muestra 2 fue la más resistente a la degradación con un 49,952 %.

**Figura 3-6: Porcentaje de degradación promedio por muestra en tierra**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

#### 3.5.5.2. Degradación en agua

En la tabla III-18, se observan los resultados de la prueba de degradación en agua. Se evidencia que la muestra número 4 tuvo el mayor porcentaje de degradación física con 85,171%, y, por otro lado, la muestra que presentó mayor resistencia a la degradación fue la muestra 2 con 40,782%.

**Tabla III-18: Degradación en agua del plástico biodegradable**

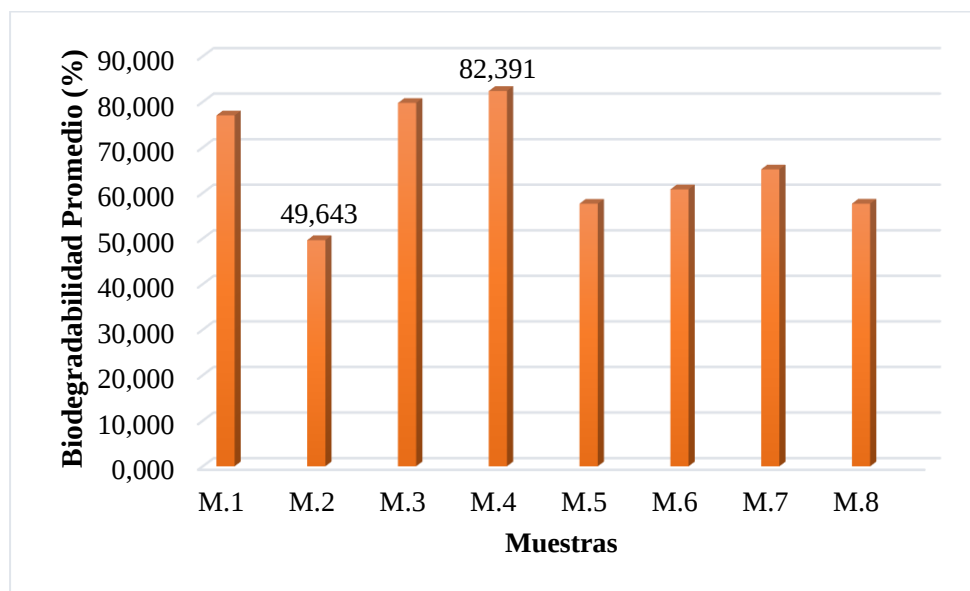
| <b>Muestras</b> |                  | <b>Peso de muestra (g)</b> |               | <b>%<br/>Biodegradación</b> | <b>%<br/>Promedio</b> |
|-----------------|------------------|----------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------|
|                 |                  | <b>Día 0</b>               | <b>Día 28</b> |                             |                       |
| M.1             | Réplica 1        | 0,203                      | 0,05          | 75,369                      | 77,025                |
|                 | Réplica 2        | 0,197                      | 0,042         | 78,680                      |                       |
| M.2             | Réplica 1        | 0,294                      | 0,122         | 58,503                      | 49,643                |
|                 | Réplica 2        | 0,179                      | 0,106         | 40,782                      |                       |
| M.3             | Réplica1         | 0,269                      | 0,053         | 80,297                      | 79,759                |
|                 | Réplica 2        | 0,231                      | 0,048         | 79,221                      |                       |
| <b>M.4</b>      | <b>Réplica 1</b> | <b>0,206</b>               | <b>0,042</b>  | <b>79,612</b>               | <b>82,391</b>         |
|                 | <b>Réplica 2</b> | <b>0,263</b>               | <b>0,039</b>  | <b>85,171</b>               |                       |
| M.5             | Réplica 1        | 0,17                       | 0,079         | 53,529                      | 57,641                |
|                 | Réplica 2        | 0,251                      | 0,096         | 61,753                      |                       |
| M.6             | Réplica 1        | 0,227                      | 0,083         | 63,436                      | 60,782                |
|                 | Réplica 2        | 0,203                      | 0,085         | 58,128                      |                       |
| M.7             | Réplica 1        | 0,248                      | 0,078         | 68,548                      | 65,175                |
|                 | Réplica 2        | 0,233                      | 0,089         | 61,803                      |                       |
| M.8             | Réplica 1        | 0,265                      | 0,106         | 60,000                      | 57,650                |
|                 | Réplica 2        | 0,217                      | 0,097         | 55,300                      |                       |

*Fuente: elaboración propia, 2025*

En la figura 3-7, se puede observar el porcentaje de biodegradación promedio de cada muestra y se evidencia que la muestra 4 obtuvo el mayor porcentaje de degradación

con un 82,391% mientras que la muestra 2 fue la más resistente a la degradación con un 49,643%.

**Figura 3-7: Representación gráfica de % degradación en agua**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### 3.6. Curva de secado del plástico biodegradable

En la tabla III-19, se presentan los datos de secado de la lámina de bioplástico, dicho proceso se realizó en una estufa de convección forzada por un tiempo de 7 horas.

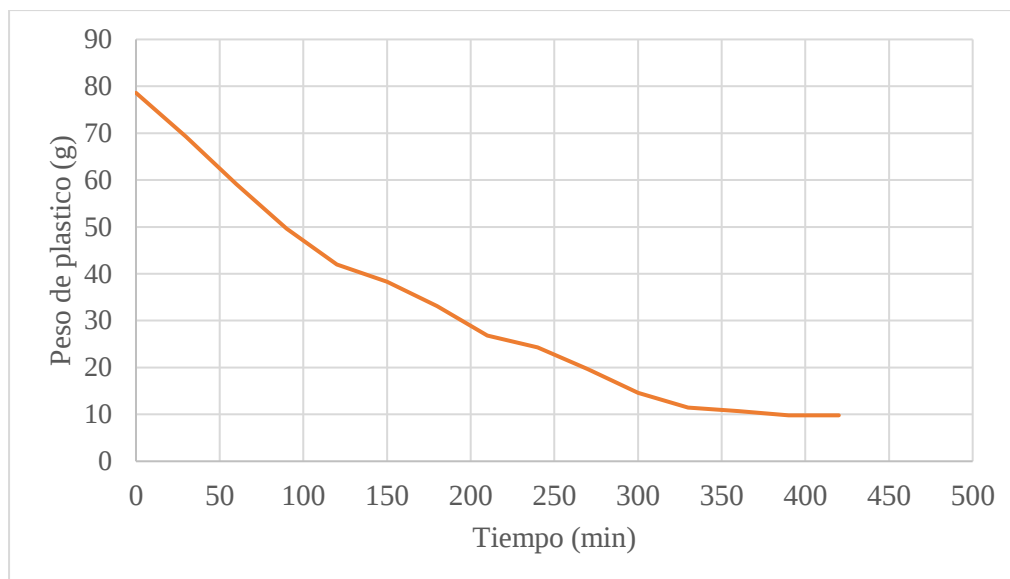
**Tabla III-19: Tiempo de Secado del bioplástico**

| <b>Tiempo (min)</b> | <b>Peso (g)</b> |
|---------------------|-----------------|
| 0                   | 78,6            |
| 30                  | 69,2            |
| 60                  | 59,1            |
| 90                  | 49,6            |
| 120                 | 42              |
| 150                 | 38,31           |
| 180                 | 33,1            |
| 210                 | 26,8            |
| 240                 | 24,3            |
| 270                 | 19,62           |
| 300                 | 14,6            |
| 330                 | 11,46           |
| 360                 | 10,68           |
| 390                 | 9,8             |
| 420                 | 9,8             |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

Se puede observar la pérdida de peso del bioplástico en función del tiempo, el bioplástico inició con una masa igual a 78,6 g, a medida que transcurre el tiempo terminó con una masa igual a 9,8 g en un tiempo de secado de 7 horas a una temperatura de 50°C.

**Figura 3-8: Curva de secado del bioplástico**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### **3.7. Resultados de análisis estadístico para la obtención de plástico biodegradable a partir del almidón de ajipa**

En la tabla III-20, se muestran los datos introducidos al programa de acuerdo al diseño factorial planteado.

**Tabla III-20: Matriz de diseño experimental en el proceso de obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa**

| <b>Muestras</b> | <b>Pectina</b> | <b>Glicerina</b> | <b>Ácido Acético</b> | <b>Resistencia (N/cm2)</b> |
|-----------------|----------------|------------------|----------------------|----------------------------|
| 1               | -1             | -1               | -1                   | 190,314                    |
| 2               | 1              | -1               | -1                   | 227,860                    |
| 3               | -1             | 1                | -1                   | 131,543                    |
| 4               | 1              | 1                | -1                   | 109,176                    |
| 5               | -1             | -1               | 1                    | 259,148                    |
| 6               | 1              | -1               | 1                    | 285,716                    |
| 7               | -1             | 1                | 1                    | 137,856                    |
| 8               | 1              | 1                | 1                    | 115,327                    |
| 9               | -1             | -1               | -1                   | 175,109                    |
| 10              | 1              | -1               | -1                   | 248,371                    |
| 11              | -1             | 1                | -1                   | 159,635                    |
| 12              | 1              | 1                | -1                   | 98,733                     |
| 13              | -1             | -1               | 1                    | 256,695                    |
| 14              | 1              | -1               | 1                    | 321,278                    |
| 15              | -1             | 1                | 1                    | 122,367                    |
| 16              | 1              | 1                | 1                    | 158,874                    |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

A continuación, en la tabla III-21, se muestran los resultados obtenidos del análisis de varianza en el programa anteriormente mencionado, en el cual se pueden observar las variables significativas del proceso.

**Tabla III-21: Pruebas de efectos inter-sujetos para plástico biodegradable**

| Variable dependiente: Resistencia                       |                               |          |                  |                |              |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|------------------|----------------|--------------|
| Origen                                                  | Tipo III de suma de cuadrados | gl       | Media cuadrática | F              | Sig.         |
| Modelo corregido                                        | 70284,156 <sup>a</sup>        | 6        | 11714,026        | 31,634         | 0,000        |
| Intersección                                            | 561751,000                    | 1        | 561751,000       | 1517,027       | 0,000        |
| Pectina                                                 | 1100,050                      | 1        | 1100,050         | 2,971          | 0,119        |
| <b>Glicerina</b>                                        | <b>54170,235</b>              | <b>1</b> | <b>54170,235</b> | <b>146,288</b> | <b>0,000</b> |
| <b>Ácido Acético</b>                                    | <b>6261,557</b>               | <b>1</b> | <b>6261,557</b>  | <b>16,910</b>  | <b>0,003</b> |
| <b>Pectina * Glicerina</b>                              | <b>4598,535</b>               | <b>1</b> | <b>4598,535</b>  | <b>12,418</b>  | <b>0,006</b> |
| Pectina * ÁcidoAcético                                  | 376,263                       | 1        | 376,263          | 1,016          | 0,340        |
| <b>Glicerina * ÁcidoAcético</b>                         | <b>3777,516</b>               | <b>1</b> | <b>3777,516</b>  | <b>10,201</b>  | <b>0,011</b> |
| Error                                                   | 3332,676                      | 9        | 370,297          |                |              |
| Total                                                   | 635367,831                    | 16       |                  |                |              |
| Total corregido                                         | 73616,832                     | 15       |                  |                |              |
| a. R al cuadrado = ,955 (R al cuadrado ajustada = ,925) |                               |          |                  |                |              |

*Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2025*

Como resultado del análisis estadístico, se observa que las variables Glicerina, Ácido Acético y las interacciones Pectina\*Glicerina y Glicerina\*ÁcidoAcético son significativas ya que los valores de significancia son menores a 0,05, por lo que, si

tienen un efecto real sobre la variable dependiente, mientras que la variable Pectina y la interacción Pectina\*Glicerina no son significativas ya que sus valores son 0.119 y 0.340 respectivamente, los cuales superan el nivel de significancia, es decir, no tiene efecto sobre la variable dependiente.

### 3.7.1. Regresión lineal del diseño factorial

En la tabla III-22, se muestra el resumen del modelo con una R (correlación múltiple) de 0,967 que indica una correlación positiva y significativa entre las variables predictoras y la variable dependiente, también indica un R cuadrado igual a 0,935 que sugiere un buen ajuste a los datos y un modelo confiable. Por último, el modelo presentó un error estándar de la estimación de 20,908, lo que indica que los valores predichos por la regresión tienen un error promedio de  $\pm 20,908$  unidades respecto a la resistencia a la tracción observada.

**Tabla III-22: Resumen del modelo<sup>b</sup> para plástico biodegradable**

| Modelo                                                                                       | R                 | R cuadrado | R cuadrado ajustado | Error estándar de la estimación |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------|---------------------|---------------------------------|
| 1                                                                                            | ,967 <sup>a</sup> | 0,935      | 0,911               | 20,90887                        |
| a. Predictores: (Constante), GlicerinaÁcidoAcetic, PectinaGlicerina, ÁcidoAcético, Glicerina |                   |            |                     |                                 |
| b. Variable dependiente: Resistencia                                                         |                   |            |                     |                                 |

*Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2025*

El análisis de varianza ANOVA muestra el nivel de significancia del modelo de regresión.

**Tabla III-23: Análisis de Varianza para plástico biodegradable**

| <b>ANOVA<sup>a</sup></b>                                                                     |                          |           |                         |          |                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------|-------------------------|----------|-------------------|
| <b>Modelo</b>                                                                                | <b>Suma de cuadrados</b> | <b>gl</b> | <b>Media cuadrática</b> | <b>F</b> | <b>Sig.</b>       |
| Regresión                                                                                    | 68807,843                | 4         | 17201,961               | 39,347   | ,000 <sup>b</sup> |
| Residuo                                                                                      | 4808,989                 | 11        | 437,181                 |          |                   |
| Total                                                                                        | 73616,832                | 15        |                         |          |                   |
| a. Variable dependiente: Resistencia                                                         |                          |           |                         |          |                   |
| b. Predictores: (Constante), GlicerinaAcidoAcetic, PectinaGlicerina, ÁcidoAcético, Glicerina |                          |           |                         |          |                   |

*Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2025*

En la tabla III-23, se observan los resultados de la regresión lineal que indican que el modelo de regresión es estadísticamente significativo ya que posee un valor de F igual a 39,347 y una significancia menor a 0,05, que indica que las variables GlicerinaÁcidoAcetic, PectinaGlicerina, Ácido Acético y glicerina tienen un efecto significativo en el proceso.

**Tabla III-24: Coeficiente del Modelo de regresión lineal para plástico biodegradable**

| <b>Coeficientes<sup>a</sup></b>      |                                       |                    |                                    |          |             |                                            |                        |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|------------------------------------|----------|-------------|--------------------------------------------|------------------------|
| <b>Modelo</b>                        | <b>Coeficientes no estandarizados</b> |                    | <b>Coeficientes estandarizados</b> | <b>t</b> | <b>Sig.</b> | <b>95,0% intervalo de confianza para B</b> |                        |
|                                      | <b>B</b>                              | <b>Desv. Error</b> | <b>Beta</b>                        |          |             | <b>Límite inferior</b>                     | <b>Límite superior</b> |
| (Constante)                          | 187,375                               | 5,227              |                                    | 35,846   | 0,000       | 175,870                                    | 198,880                |
| Glicerina                            | -58,186                               | 5,227              | -0,858                             | -11,131  | 0,000       | -69,691                                    | -46,681                |
| AcidoAcetico                         | 19,783                                | 5,227              | 0,292                              | 3,785    | 0,003       | 8,277                                      | 31,288                 |
| PectinaGlicerina                     | -16,953                               | 5,227              | -0,250                             | -3,243   | 0,008       | -28,458                                    | -5,448                 |
| GlicerinaAcidoAcetic                 | -15,365                               | 5,227              | -0,227                             | -2,939   | 0,013       | -26,870                                    | -3,860                 |
| a. Variable dependiente: Resistencia |                                       |                    |                                    |          |             |                                            |                        |

*Fuente: Elaboración propia SPSS 26.0, 2025*

En la tabla III-24, se presentan los coeficientes del modelo de regresión lineal. La constante del modelo es de 187,375 el cual es el valor promedio de la resistencia cuando las variables, pectina, glicerina y ácido acético se encuentren en sus valores más bajos. Por otro lado, la glicerina tiene un coeficiente de -58,186 con un nivel de significancia del 0,000 esto indica que dicha variable afecta de forma negativa a la variable respuesta, es decir, que al aumentar la cantidad de glicerina manteniendo todo constante la resistencia disminuye, el ácido acético tiene un coeficiente de +19,783 con un nivel de significancia de 0,003, lo que indica que tiene un efecto positivo moderado, es decir, que al aumentar la cantidad de ácido acético la resistencia aumenta, la interacción PectinaGlicerina tiene un coeficiente de -16,953 con un nivel de confianza de 0,008 lo que indica que tiene un efecto negativo, es decir que la combinación de ambas reduce

la resistencia, por último, la interacción GlicerinaAcidoAcetic tiene un coeficiente igual a -15,365 con un nivel de confianza igual a 0,013, esto indica que la interacción tiene un efecto negativo significativo sobre la resistencia, es decir que una mala combinación de las variables Glicerina y Ácido acético reduce la resistencia a la tracción.

Con los valores numéricos de B es posible tener el modelo matemático de la regresión lineal para la resistencia a la tracción, dichos valores son:

Constante = 187,375

Glicerina = -58,186

Ácido Acético = 19,783

PectinaGlicerina = -16,953

GlicerinaAcidoAcetic = -15,365

De tal modo, el modelo matemático resulta en:

$$Resistencia \left( \frac{N}{cm^2} \right) = 187,375 - 58,186 * X_1 + 19,783 * X_2 - 16,953 * X_3 - 15,365 * X_4$$

Donde:

$X_1$  = Glicerina

$X_2$  = Ácido Acético

$X_3$  = PectinaGlicerina

$X_4$  = GlicerinaAcidoAcetico

En la tabla III-25, se muestra los datos del esfuerzo máximo observado y el esfuerzo máximo del modelo, también se observa la diferencia (Error) en cada uno de los casos, se puede observar que las muestras 2, 4 y 8 son las que menos variación presentan.

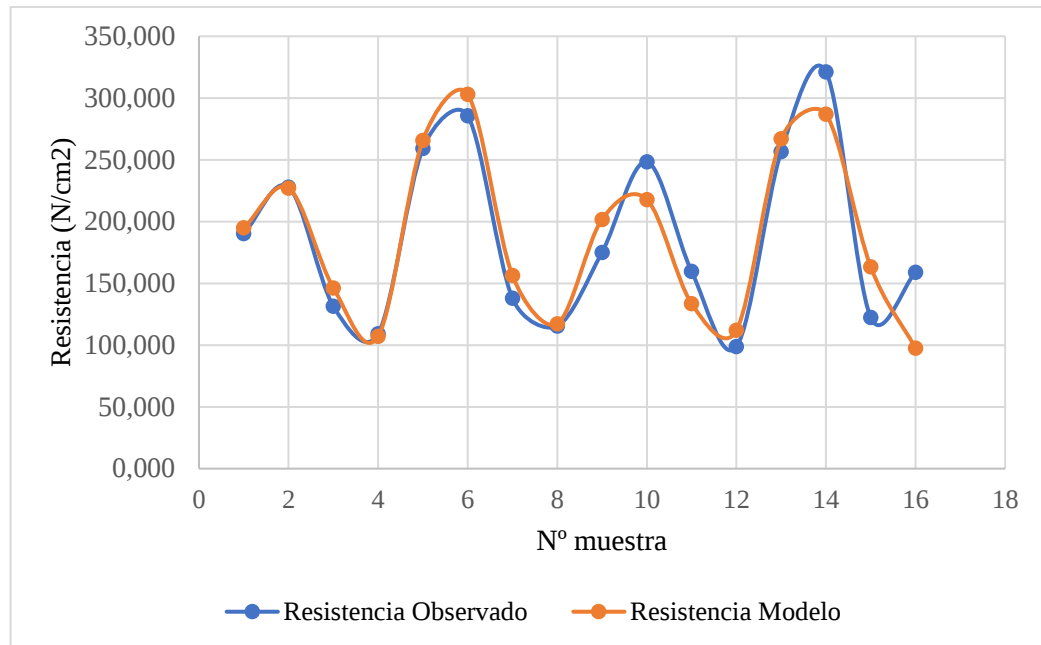
**Tabla III-25: Comparación de la Resistencia observada y la Resistencia del modelo**

| <b>Muestra</b> | <b>Resistencia Observado</b> | <b>Resistencia Modelo</b> | <b>Error</b> |
|----------------|------------------------------|---------------------------|--------------|
| 1              | 190,310                      | 194,891                   | -4,581       |
| 2              | 227,860                      | 227,142                   | 0,718        |
| 3              | 131,540                      | 146,353                   | -14,813      |
| 4              | 109,180                      | 107,202                   | 1,978        |
| 5              | 259,150                      | 265,851                   | -6,701       |
| 6              | 285,720                      | 303,093                   | -17,373      |
| 7              | 137,860                      | 156,333                   | -18,473      |
| 8              | 115,330                      | 117,256                   | -1,926       |
| 9              | 175,110                      | 201,802                   | -26,692      |
| 10             | 248,370                      | 217,819                   | 30,551       |
| 11             | 159,640                      | 133,584                   | 26,056       |
| 12             | 98,730                       | 111,948                   | -13,218      |
| 13             | 256,700                      | 266,966                   | -10,266      |
| 14             | 321,280                      | 286,928                   | 34,352       |
| 15             | 122,370                      | 163,374                   | -41,004      |
| 16             | 158,870                      | 97,461                    | 61,409       |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

En la figura 3-9, se muestra gráficamente la comparación de la resistencia observada y del modelo, se puede observar que las dos líneas tienen una similitud de trayectoria y un error no muy significativo.

**Figura 3-9: Comparación gráfica de la Resistencia observada y Resistencia del modelo**



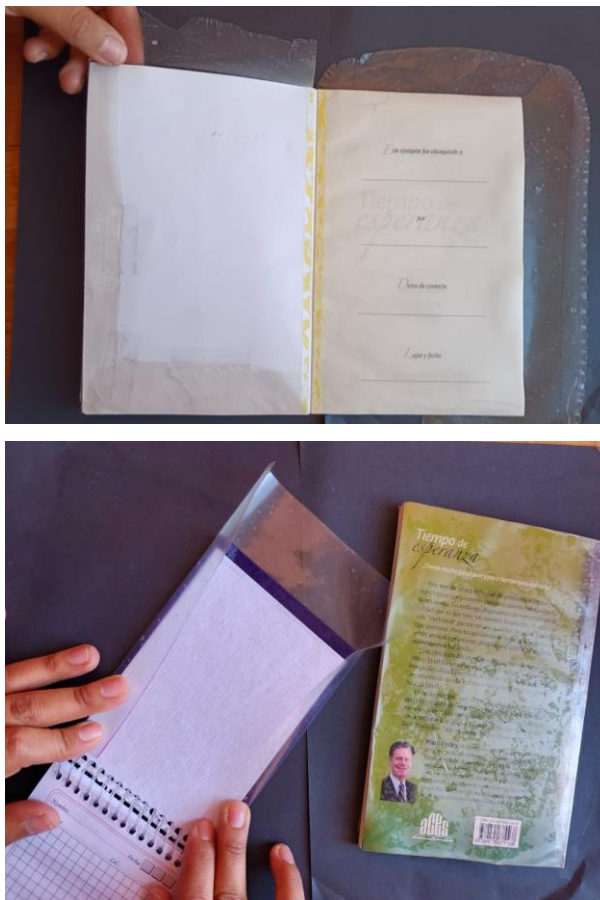
*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### 3.7.2. Aplicabilidad del producto

En base a los resultados obtenidos en cada una de las muestras descritas, se consideró como principal parámetro el esfuerzo máximo cuyo resultado más alto alcanzado fue por la muestra 6 y de esta manera determinar la aplicación más apropiada.

A continuación, se tiene un prototipo, una lámina bioplástica para empaque protector, por ejemplo, forro de cuadernos o libros protegiéndolos de suciedad, desgaste o rasgado gracias a su flexibilidad, resistencia y apariencia simula los ya conocidos plásticos comerciales.

**Figura 3-10: Empaque protector (Forro de cuaderno y libro)**



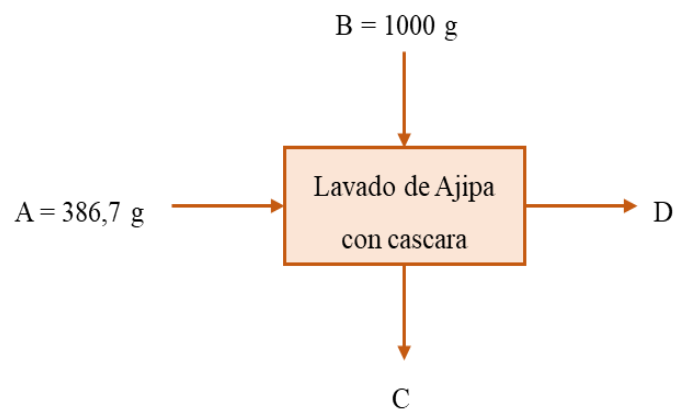
*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### **3.8. Balance de materia de extracción de almidón de ajipa**

#### **3.8.1. Recepción de la materia prima (Ajipa)**

En la figura 3-11, se muestra la operación de lavado de ajipa con cáscara, para el cual se utilizó 386,7 g de ajipa, la cual contiene un 1% tierra e impurezas y 1000 g de agua para su lavado.

**Figura 3-11: Etapa de lavado de Ajipa con cáscara**



Donde:

A = Peso inicial de Ajipa

B = Peso de agua para lavado

C = Peso de Agua residual más impurezas

D = Peso de Ajipa lavada

Se consideró una densidad del agua destilada de 1 g/ml.

$$A + B = C + D \quad \text{Ec. N°3-1}$$

$$C = B + (A * 1\%)$$

$$C = 1000 \text{ g} + (386,7 \text{ g} * 1\%)$$

$$C = 1003,867 \text{ g}$$

$$D = A + B - C \quad \text{Ec. N°3-2}$$

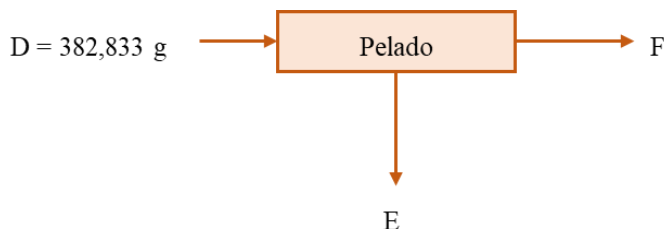
$$D = 386,7 \text{ g} + 1000 \text{ g} - 1003,867 \text{ g}$$

$$D = 382,833 \text{ g}$$

### 3.8.2. Balance de materia en la etapa de pelado

En la figura 3-12, se muestra la etapa de pelado, en donde se utilizó 382,833 g de ajipa, del cual el 94,877% es la porción comestible, la diferencia corresponde al contenido de la cáscara que es del 5,123%.

**Figura 3-12: Etapa de pelado**



Donde:

E = Peso de cáscaras de ajipa

F = Peso de ajipa sin cáscara

$$D = F + E \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-3$$

$$E = D * 5,123\%$$

$$E = 382,833 \text{ g} * 5,123\%$$

$$E = 19,613 \text{ g}$$

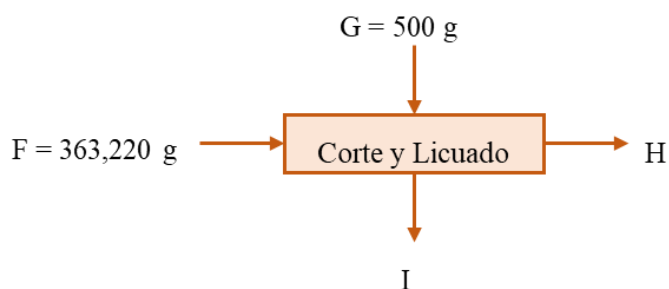
$$F = D - E \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-4$$

$$F = 382,833 \text{ g} - 19,613 \text{ g}$$

$$F = 363,22 \text{ g}$$

### 3.8.3. Balance de materia para la etapa de corte y licuado

En la figura 3-13, se muestra la etapa de corte y licuado, el cual se realizó con 363,220 g de ajipa y se añadió 500 g de agua, considerando una pérdida de 1,5% en función al peso que ingresa.

**Figura 3-13: Etapa de Corte y licuado**

Donde:

G = Peso de agua destilada para el licuado

H = Peso de licuado de Ajipa

I = Peso de pérdida de licuado

$$F + G = H \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-5$$

$$I = (F + G) * 1,5\% \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-6$$

$$I = (363,220 \text{ g} + 500 \text{ g}) * 1,5\%$$

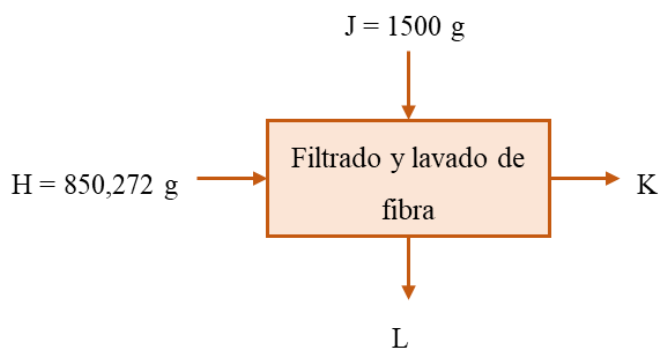
$$I = 12,948 \text{ g}$$

$$H = 363,220 \text{ g} + 500 \text{ g} - 12,948 \text{ g}$$

$$H = 850,272 \text{ g}$$

#### **3.8.4. Balance de materia para la etapa de filtrado y lavado de fibra**

En la figura 3-14, se muestra la etapa de filtrado y lavado de fibra, el cual se dio inicio con 850,272 g, y se separó un 4,167% de fibra húmeda en función al peso de la masa licuada y se añadió 1500 g de agua para el lavado.

**Figura 3-14: Etapa de Filtrado y lavado de fibra**

Donde:

J = Peso de Agua destilada para el lavado de fibra

L = Peso de fibra humeda

K = Peso de lechada de almidón de ajipa

$$H + J = L + K \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-7$$

$$L = H * 4,167\% \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-8$$

$$L = 850,272 \text{ g} * 4,167\%$$

$$L = 35,431 \text{ g}$$

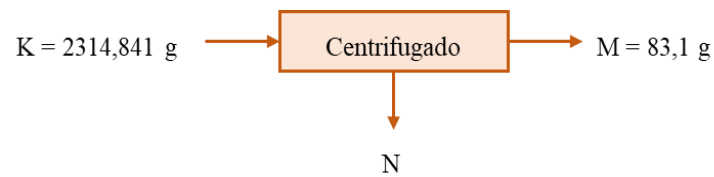
$$K = H + J - L \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-9$$

$$K = 850,272 \text{ g} + 1500 \text{ g} - 35,431 \text{ g}$$

$$K = 2314,841 \text{ g}$$

### 3.8.5. Balance de materia para la etapa de centrifugado

En la figura 3-15, se presenta la etapa de centrifugado, la cual se realizó con 2314,841 g de lechada de almidón de ajipa, al realizar la separación se obtuvo 83,1 g de almidón.

**Figura 3-15 Etapa de centrifugado**

Donde:

N = Peso de agua saliente de la centrífuga

M = Peso almidón centrifugado

$$K = L + M \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-10$$

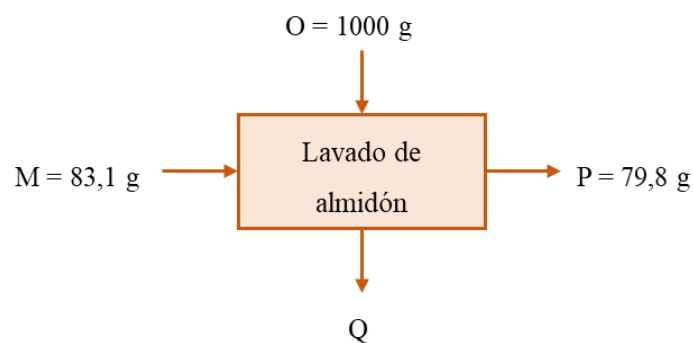
$$L = K - M \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-11$$

$$L = 2314,841 \text{ g} - 83,1 \text{ g}$$

$$L = 2231,741 \text{ g}$$

### 3.8.6. Balance de materia para la etapa de lavado de almidón

En la figura 3-16, se presenta la etapa de lavado de almidón el cual se inicia con 83,1 g de almidón, para ello se utiliza 1000 g de agua, del cual sale almidón de 79,8 g.

**Figura 3-16: Etapa de Lavado de almidón**

Donde:

O = Peso de agua para el lavado de almidón

Q = Peso de mancha de almidón con agua

P = Peso de almidón húmedo

$$M + O = Q + P \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-12$$

$$Q = M + O - P \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-13$$

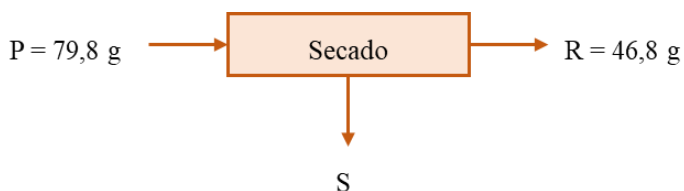
$$O = 83,1 \text{ g} + 1000 \text{ g} - 79,8 \text{ g}$$

$$O = 1003,3 \text{ g}$$

### 3.8.7. Balance de materia para la etapa de secado

En la figura 3-17, se presenta la etapa de secado del almidón, la cantidad de almidón húmedo que ingresó al secador fue de 79,8 g y salió 46,8 g de almidón con una humedad del 5,99%.

**Figura 3-17: Etapa de secado**



**Donde:**

S = Peso de agua evaporada

R = Peso de Almidón seco

$$P = S + R \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-14$$

$$S = P - R \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-15$$

$$S = 79,8 \text{ g} - 46,8 \text{ g}$$

$$S = 33,0 \text{ g}$$

Balance por componente para el agua.

Donde:

$X^S_{H_2O} = 1\%$  es el vapor de agua

$X^R_{H_2O} = 5,99\%$  es la humedad del almidón seco

$$P * X^p_{H_2O} = R * X^R_{H_2O} + S * X^S_{H_2O} \quad \text{Ec. N°3-16}$$

$$79,8 \text{ g} * X^p_{H_2O} = 46,8 \text{ g} * 0,0596 + 33,0 \text{ g} * 1$$

$$79,8 \text{ g} * X^p_{H_2O} = 2,761 \text{ g} + 33,0 \text{ g}$$

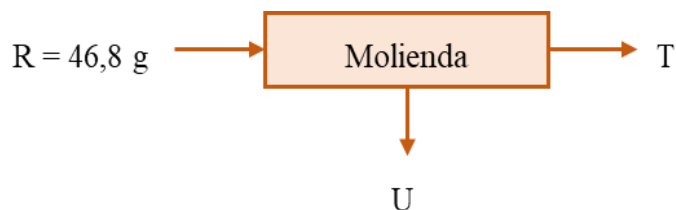
$$X^p_{H_2O} = \frac{35,761 \text{ g}}{79,8 \text{ g}}$$

$$X^p_{H_2O} = 0,448$$

### 3.8.8. Balance de materia para la etapa de molienda

En la figura 3-18, se presenta la etapa de la molienda el cual se inicia con 46,8 g de almidón y se considera un porcentaje de pérdida del 0,5% con respecto al flujo de ingreso.

**Figura 3-18: Etapa de molienda**



Donde:

U = Peso de almidón perdido en la molienda

T = Peso de Almidón de ajipa molido

$$R = U + T \quad \text{Ec. N°3-17}$$

$$U = R * 0,5\%$$

$$U = 46,8 \text{ gr} * 0,5\%$$

$$U = 0,234 \text{ g}$$

$$T = R - U \quad \text{Ec. N°3-18}$$

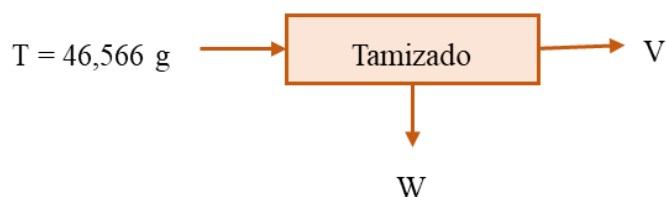
$$T = 46,8 \text{ g} - 0,234 \text{ g}$$

$$T = 46,566 \text{ g}$$

### 3.8.9. Balance de materia para la etapa de tamizado

En la figura 3-19, se presenta la etapa de tamizado, el cual se inició con una cantidad de 46,566 g de almidón y se consideró una pérdida de 1,5% con respecto al flujo de entrada entre impurezas y gránulos grandes.

**Figura 3-19: Etapa de tamizado**



Donde:

W = Peso de almidón perdido en el tamizado

V = Peso de almidón de ajipa tamizado

$$T = W + V \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-19$$

$$W = T * 1,5\% \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-20$$

$$W = 46,566 \text{ g} * 1,5\%$$

$$W = 0,698 \text{ g}$$

$$V = T - W \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-21$$

$$V = 46,566 \text{ g} - 0,698 \text{ g}$$

$$V = 45,868 \text{ g}$$

### 3.8.10. Cálculo de rendimiento del proceso de extracción de almidón de ajipa

$$\%Rendimiento = \frac{\text{peso de almidón obtenido (g)}}{\text{peso de Ajipa (g)}} * 100$$

$$\%Rendimiento = \frac{45,868 \text{ g}}{382,833 \text{ g}} * 100$$

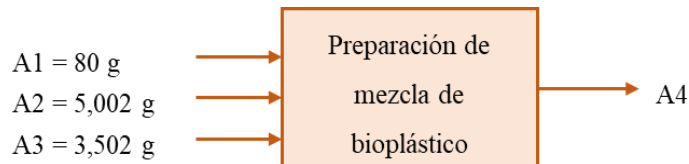
$$\%Rendimiento = 11,98\%$$

### 3.9. Balance de materia de obtención de plástico biodegradable a partir de almidón de ajipa

#### 3.9.1. Balance de materia en la etapa de preparación de mezcla de bioplástico

En la figura 3-20, se presenta la etapa de preparación de mezcla de bioplástico, en donde se agregaron 5,002 g de almidón, 3,502 g de pectina y 80 g de agua destilada.

**Figura 3-20: Etapa de preparación de mezcla de bioplástico**



Donde:

A1 = Peso de Agua destilada

A2 = Peso de almidón de ajipa

A3 = Peso de pectina

A4 = Peso de mezcla inicial

Se consideró la densidad del agua destilada de 1 g/ml

$$A1 + A2 + A3 = A4 \quad \text{Ec. N°3-22}$$

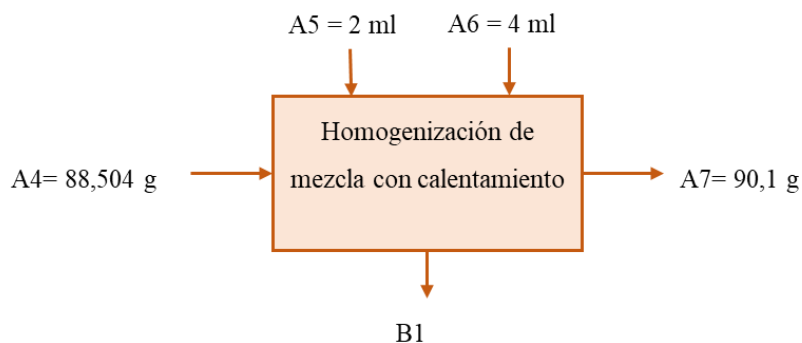
$$80 \text{ g} + 5,002 \text{ g} + 3,5002 \text{ g} = A4$$

$$A4 = 88,504 \text{ g}$$

### 3.9.2. Balance de materia en la etapa de homogenización de mezcla con calentamiento

En la figura 3-21, se presenta la etapa de homogenización de mezcla con calentamiento, en donde se da inicio con 88,504 g de mezcla la cual se lleva a baño maría y se agregan 2 ml de glicerina y 4 ml de ácido acético.

**Figura 3-21: Etapa de homogenización de mezcla con calentamiento**



Donde:

A5 = Peso de glicerina

A6 = Peso de ácido acético

B1 = Peso de solución evaporada

A7 = Peso de bioplástico húmedo

$$\rho_{\text{glicerina}} = 1,264 \text{ g/ml}$$

$$\rho_{\text{ácido acético}} = 0,985 \text{ g/ml}$$

$$A5 = \frac{2 \text{ ml}}{1,264 \text{ g/ml}} = 1,582 \text{ g}$$

$$A6 = \frac{4 \text{ ml}}{0,985 \text{ g/ml}} = 4,061 \text{ g}$$

$$A4 + A5 + A6 = B1 + A7 \quad \text{Ec. N}^{\circ}3\text{-}23$$

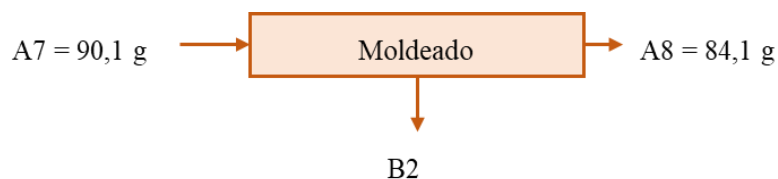
$$B1 = 88,504 \text{ g} + 1,582 \text{ g} + 4,061 \text{ g} - 90,1$$

$$B1 = 4,047 \text{ g}$$

### 3.9.3. Balance de materia en la etapa de moldeado

En la figura 3-22, se presenta la etapa de moldeado, el cual inicia con 90,1 g de mezcla, de la cual 84,1 g es vertida en una placa de vidrio, la diferencia corresponde a la pérdida de mezcla.

**Figura 3-22: Etapa de moldeado**



Donde:

A8 = Peso de bioplástico húmedo en placa de vidrio

B2 = Peso perdido de bioplástico

$$A7 = A8 + B2 \quad \text{Ec. N}^{\circ}3\text{-}24$$

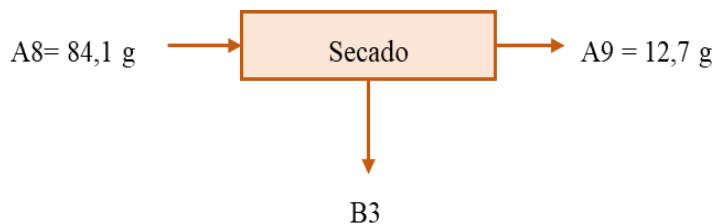
$$B2 = A7 - A8 \quad \text{Ec. N}^{\circ}3\text{-}25$$

$$B2 = 90,1 \text{ g} - 84,1 \text{ g}$$

$$B2 = 6,0 \text{ g}$$

### 3.9.4. Balance de materia en la etapa de secado

En la figura 3-23, se presenta la etapa de secado, en donde ingresa 84,1 g de mezcla a la estufa y de esta sale 12,7 g de bioplástico seco.

**Figura 3-23: Etapa de secado**

A9 = Peso de bioplástico seco

B3 = Peso de agua evaporada

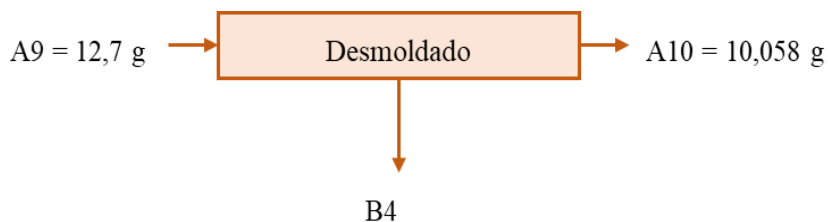
$$A8 = A9 + B3 \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-26$$

$$B3 = 84,1 \text{ g} - 12,7 \text{ g}$$

$$B3 = 71,4 \text{ g}$$

### 3.9.5. Balance de materia en la etapa de desmoldado

En la figura 3-24, se presenta la etapa de desmoldado, la cual se inicia con 12,7 g de bioplástico seco en la placa de vidrio y al desmoldarlo se obtuvo 10,058 g de bioplástico, la diferencia corresponde a la perdida de bioplástico.

**Figura 3-24: Etapa de desmoldado**

Donde:

A10 = Peso de bioplástico obtenido

B4 = Peso de perdidas de bioplástico

$$A9 = A10 + B4 \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-27$$

$$B4 = A9 - A10 \quad \text{Ec. N}^{\circ}3-28$$

$$B4 = 12,7 \text{ g} - 10,058 \text{ g}$$

$$B4 = 2,642 \text{ g}$$

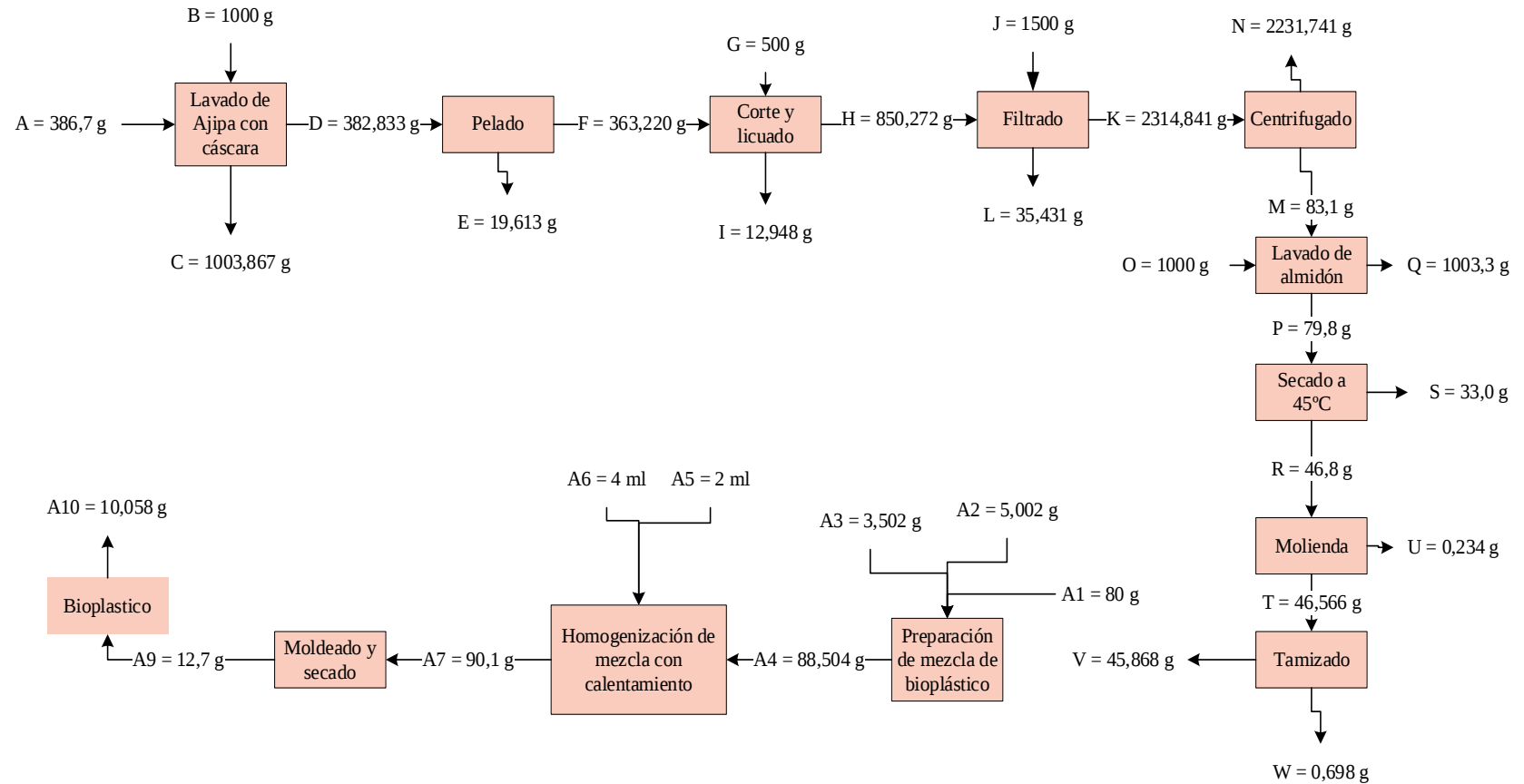
### 3.9.6. Cálculo de rendimiento de obtención de plástico biodegradable

$$\%Rendimiento = \frac{\text{peso de bioplástico seco}}{\text{peso de Ajipa}} * 100$$

$$\%Rendimiento = \frac{10,058 \text{ g}}{382.833 \text{ g}} * 100$$

$$\%Rendimiento = 2,63 \%$$

**Figura 3-25: Resumen de balance de materia de obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa**



*Fuente: Elaboración propia, 2025*

Tabla III-26: Resumen del balance de materia

| N° | Entrada                                |              |              | Proceso                     | Salida                              |              |              |
|----|----------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------|
|    | Nombre                                 | Flujo masico | Cantidad (g) |                             | Nombre                              | Flujo masico | Cantidad (g) |
| 1  | Peso inicial (Ajipa)                   | A            | 386,7        | Lavado de Ajipa con cáscara | Peso de Ajipa lavada                | D            | 382,833      |
| 2  | Peso de Ajipa lavada                   | D            | 382,833      | Pelado                      | Peso de Ajipa sin cascara           | F            | 363,22       |
| 3  | Peso de Ajipa sin cascara              | F            | 363,22       | Corte y licuado             | Peso de licuado de Ajipa            | H            | 850,272      |
|    | Peso de agua destilada para el licuado | G            | 500          |                             |                                     |              |              |
| 4  | Peso de licuado de Ajipa               | H            | 850,272      | Filtrado y lavado de fibra  | Peso de lechada de almidón de Ajipa | K            | 2314,841     |
| 5  | Peso de lechada de almidón de Ajipa    | K            | 2314,841     | Centrifugado                | Peso de almidón centrifugado        | M            | 83,1         |
| 6  | Peso de almidón centrifugado           | M            | 83,1         | Lavado de almidón           | Peso de almidón húmedo              | P            | 79,8         |
| 7  | Peso de almidón húmedo                 | P            | 79,8         | Secado                      | Peso de almidón seco                | R            | 46,8         |
| 8  | Peso de almidón seco                   | R            | 46,8         | Molienda                    | Peso de almidón de ajipa molido     | T            | 46,566       |
| 9  | Peso de almidón de ajipa molido        | T            | 46,566       | Tamizado                    | Peso de almidón de ajipa            | W            | 45,868       |

|    |                                        |    |        |                                            |                                        |     |        |
|----|----------------------------------------|----|--------|--------------------------------------------|----------------------------------------|-----|--------|
| 10 | Peso de agua destilada                 | A1 | 80     | Preparación de mezcla de bioplástico       | Peso de mezcla inicial                 | A4  | 88,504 |
|    | Peso de almidón de ajipa               | A2 | 5,002  |                                            |                                        |     |        |
|    | Peso de pectina                        | A3 | 3,502  |                                            |                                        |     |        |
| 11 | Peso de mezcla inicial                 | A4 | 88,504 | Homogenización de mezcla con calentamiento | Peso de bioplástico húmedo             | A7  | 90,1   |
|    | Peso de glicerina                      | A5 | 1,582  |                                            |                                        |     |        |
|    | Peso de ácido acético                  | A6 | 4,061  |                                            |                                        |     |        |
| 12 | Peso de bioplástico húmedo             | A7 | 90,1   | Moldeado                                   | Peso de bioplástico en placa de vidrio | A8  | 84,1   |
| 13 | Peso de bioplástico en placa de vidrio | A8 | 84,1   | Secado                                     | Peso de bioplástico seco               | A9  | 12,7   |
| 14 | Peso de bioplástico seco               | A9 | 12,7   | Desmoldado                                 | Peso de bioplástico obtenido           | A10 | 10,058 |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

### **3.10. Balance de energía para la obtención de plástico biodegradable**

#### **3.10.1. Balance de energía en la etapa de licuado**

En esta etapa se utilizó una licuadora por un tiempo de 30 segundos para romper las células vegetales y de esta manera liberar los gránulos de almidón, esta operación se realizó a temperatura ambiente 18°C, no hubo cambio de temperatura significativo.

$$E = P_{\text{licuadora}} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

$P_{\text{licuadora}}$  = Potencia de la licuadora

t = tiempo de uso

$P_{\text{licuadora}} = 400 \text{ W} = 0,40 \text{ kW}$

t = 30 segundos = 0.0083 h

$$E = 0,40 \text{ kW} \times 0.0083 \text{ h}$$

$$E = 0.0033 \text{ kW} - \text{h}$$

$$E = 0.0033 \text{ kW} - \text{h} \times \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kW} - \text{h}}$$

$$E = 11,88 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de licuado es 11,88 kJ.

### 3.10.2. Balance de energía en la etapa de centrifugación

En esta etapa se utilizó una centrífuga por un tiempo de 15 minutos para separar el almidón ya que este permite una separación más rápida y eficiente, este también se realizó a temperatura ambiente 18°C, no hubo cambio de temperatura significativo.

$$E = P_{\text{centrifuga}} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

$P_{\text{centrifuga}}$  = Potencia de centrífuga

t = tiempo de uso

$P_{\text{centrifuga}} = 0,08 \text{ kW}$

t = 15 minutos = 0,25 h

$$E = 0,08 \text{ kW} \times 0,25 \text{ h}$$

$$E = 0.02 \text{ kW} - \text{h}$$

$$E = 0.02 \text{ kW} - \text{h} \times \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kW} - \text{h}}$$

$$E = 72,0 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de centrifugación fue de 72,0 kJ.

### 3.10.3. Balance de energía en la etapa de secado

El secado del almidón se realizó en una estufa a una temperatura de  $45 \pm 5^\circ\text{C}$  por un tiempo de 15 horas.

$$E = P_{\text{secador}} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

$P_{\text{secador}}$  = Potencia de secador

t = tiempo de uso

$$P_{\text{secador}} = 2000 \text{ W} = 2 \text{ kW}$$

$$t = 15 \text{ h}$$

$$E = 2 \text{ kW} \times 15 \text{ h}$$

$$E = 30 \text{ kW} - \text{h}$$

$$E = 30 \text{ kW} - \text{h} \times \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kW} - \text{h}}$$

$$E = 108\,000 \text{ kJ}$$

La energía consumida por la estufa es de 108 000 kJ.

### 3.10.4. Balance de energía en la etapa de molienda

Se utilizó un molino para obtener un polvo fino y uniforme por un tiempo de 5 minutos.

$$E = P_{\text{molino}} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

$P_{\text{molino}}$  = Potencia del molino

t = tiempo de uso

$P_{\text{molino}} = 350 \text{ W} = 0,40 \text{ kW}$

t = 5 min = 0,083 h

$$E = 0,35 \text{ kW} \times 0,083 \text{ h}$$

$$E = 0,0292 \text{ kW} - \text{h}$$

$$E = 0,0292 \text{ kW} - \text{h} \times \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kW} - \text{h}}$$

$$E = 105,12 \text{ kJ}$$

La energía consumida por el molino es de 105,12 kJ.

### 3.10.5. Balance de energía en la etapa de tamizado

Se utilizó un tamizador vibratorio por un tiempo de 20 minutos para obtener un almidón con partículas de un tamaño uniforme, libre de impurezas.

$$E = P_{\text{tamizador}} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

$P_{\text{tamizador}}$  = Potencia del tamizador

t = tiempo de uso

$P_{\text{tamizador}} = 80 \text{ W} = 0,080 \text{ kW}$

t = 20 minutos = 0,33 h

$$E = 0,080 \text{ kW} \times 0,33 \text{ h}$$

$$E = 0,0264 \text{ kW} - \text{h}$$

$$E = 0,0264 \text{ kW} - \text{h} \times \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kW} - \text{h}}$$

$$E = 95,04 \text{ kJ}$$

La energía consumida por el tamizador es de 95,04 kJ.

### **3.10.6. Balance de energía en la etapa de preparación de mezcla de plástico biodegradable**

Para la preparación de la mezcla de bioplástico se utilizó la olla del evaporador rotativo para hacer baño maría, se usó por un tiempo de 15 minutos a una temperatura de 65°C.

$$E = P_{\text{evaporador}} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

$P_{\text{evaporador}}$  = Potencia evaporador rotativo

t = tiempo de uso

Temperatura de baño maría = 65°C

$P_{\text{evaporador}} = 1320 \text{ W} = 1,32 \text{ kW}$

t = 15 minutos = 0,25 h

$$E = 1,32 \text{ kW} \times 0,25 \text{ h}$$

$$E = 0,33 \text{ kW} - \text{h}$$

$$E = 0,33 \text{ kW} - \text{h} \times \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kW} - \text{h}}$$

$$E = 1188 \text{ kJ}$$

La energía consumida por calentamiento y agitación de mezcla es de 1188 kJ.

### 3.10.7. Balance de energía en la etapa de secado de plástico biodegradable

Para el secado del bioplástico, se usó una estufa a una temperatura de 50°C por un tiempo de 7 horas.

$$E = P_{\text{secador}} \times t$$

Donde:

E = Energía eléctrica suministrada

$P_{\text{secador}}$  = Potencia de secador

t = tiempo de uso

$P_{\text{secador}} = 2000 \text{ W} = 2 \text{ kW}$

t = 7 h

$$E = 2 \text{ kW} \times 7 \text{ h}$$

$$E = 14 \text{ kW} - \text{h}$$

$$E = 14 \text{ kW} - \text{h} \times \frac{3600 \text{ kJ}}{1 \text{ kW} - \text{h}}$$

$$E = 50400 \text{ kJ}$$

La energía consumida por la estufa es igual a 50400 kJ.

**Tabla III-27: Valores del consumo energético del balance de energía**

| <b>Equipo</b>               | <b>Proceso</b>                                        | <b>Consumo energético<br/>(kW-h)</b> |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Licuadora                   | Licuadao                                              | 0,0033                               |
| Centrífuga                  | Centrifugado                                          | 0,02                                 |
| Estufa                      | Secado de almidón                                     | 30                                   |
| Molino                      | Molienda                                              | 0,0292                               |
| Tamizador vibratorio        | Tamizado                                              | 0,0264                               |
| Olla de evaporador rotativo | Preparación de mezcla<br>de plástico<br>biodegradable | 0,33                                 |
| Estufa                      | Secado de bioplástico                                 | 14                                   |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

**CAPÍTULO IV**  
**COSTOS DE PRODUCTO**

#### 4. COSTOS DE PRODUCTO

##### 4.1. Costos de materiales y reactivos

Para determinar los costos de producción del plástico biodegradable, se tomaron en cuenta los costos directos, los cuales se presentan en las siguientes tablas.

**Tabla IV-1: Costo de materiales**

| <b>Materiales</b> |                            |                 |                              |                    |
|-------------------|----------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------|
| <b>Nº</b>         | <b>Detalle</b>             | <b>Cantidad</b> | <b>Precio unitario (Bs.)</b> | <b>Costo (Bs.)</b> |
| 1                 | Vaso de precipitado 250 ml | 2               | 25                           | 50                 |
| 2                 | pHmetro                    | 1               | 140                          | 140                |
| 3                 | Balanza                    | 1               | 180                          | 180                |
| 4                 | Vaso de precipitado 500 ml | 1               | 30                           | 30                 |
| 5                 | Varilla                    | 1               | 15                           | 15                 |
| 6                 | Piseta 500 ml              | 1               | 25                           | 25                 |
| 7                 | Probeta de vidrio 10 ml    | 1               | 15                           | 15                 |
| 8                 | Cernidor de plástico       | 1               | 6                            | 6                  |
| 9                 | Baldes 2 litros            | 3               | 8                            | 24                 |
| 10                | Placas de vidrio           | 4               | 15                           | 60                 |
| 11                | Espátula de silicón        | 1               | 6                            | 6                  |
| <b>Total</b>      |                            |                 |                              | <b>551</b>         |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

Los materiales que no se encuentran detallados en la tabla IV-1 fueron proporcionados por el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Para determinar los costos de materia prima y reactivos se trabajó con los datos del balance de materia que se encuentra en el capítulo III.

**Tabla IV-2: Costos de materia prima y reactivos**

| <b>Materia prima y reactivos</b> |                      |                 |               |                             |                   |
|----------------------------------|----------------------|-----------------|---------------|-----------------------------|-------------------|
| <b>Nº</b>                        | <b>Detalle</b>       | <b>Cantidad</b> | <b>Unidad</b> | <b>Costo unitario (Bs.)</b> | <b>Costo (Bs)</b> |
| 1                                | Ajipa                | 0,3             | kg            | 7                           | 2,1               |
| 2                                | Ácido acético al 25% | 0,004           | l             | 600                         | 2,4               |
| 3                                | Glicerina            | 0,002           | l             | 40                          | 0,08              |
| 4                                | Pectina              | 0,0035          | kg            | 280                         | 0,98              |
| 5                                | Agua destilada       | 4,08            | l             | 0,75                        | 3,06              |
| <b>Total</b>                     |                      |                 |               |                             | <b>8,62</b>       |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

**Tabla IV-3: Costos de análisis fisicoquímicos**

| <b>Costos de análisis fisicoquímicos</b> |                  |                      |                             |                 |                   |
|------------------------------------------|------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------|
| <b>Nº</b>                                | <b>Detalle</b>   |                      | <b>Precio unitario (Bs)</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Costo (Bs)</b> |
| 1                                        | Ajipa            | Ceniza               | 70                          | 1               | 70                |
| 2                                        |                  | Fibra                | 100                         | 1               | 100               |
| 3                                        |                  | Grasa                | 90                          | 1               | 90                |
| 4                                        |                  | Humedad              | 40                          | 1               | 40                |
| 5                                        |                  | Hidratos de carbono  | 20                          | 1               | 20                |
| 6                                        |                  | Proteína Total       | 100                         | 1               | 100               |
| 7                                        |                  | Valor energético     | 20                          | 1               | 20                |
| 8                                        | Almidón de Ajipa | Amilosa/Amilopectina | 340                         | 1               | 340               |
| <b>Total</b>                             |                  |                      |                             |                 | <b>780</b>        |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

En la tabla IV-4, se observan los valores de energía consumida en cada etapa, los cuales se obtuvieron del balance de energía que se encuentra en el capítulo III.

**Tabla IV-4: Costos de consumo energético**

| <b>N°</b>    | <b>Etapas</b>                           | <b>Energía consumida<br/>(kW-h)</b> | <b>Costo de kW-h<br/>(Bs.)</b> | <b>Costo<br/>(Bs.)</b> |
|--------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 1            | Licuada                                 | 0,0033                              | 0,9                            | 0,0030                 |
| 2            | Centrifugado                            | 0,02                                | 0,9                            | 0,0180                 |
| 3            | Secado de almidón                       | 30                                  | 0,9                            | 27,000                 |
| 4            | Molino                                  | 0,0292                              | 0,9                            | 0,0263                 |
| 5            | Tamizado                                | 0,0264                              | 0,9                            | 0,0238                 |
| 6            | Preparación de mezcla de<br>bioplástico | 0,33                                | 0,9                            | 0,2970                 |
| 7            | Secado de bioplástico                   | 14                                  | 0,9                            | 12,600                 |
| <b>Total</b> |                                         |                                     |                                | <b>39,968</b>          |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

**Tabla IV-5: Costos de material de apoyo y mano de obra**

| Nº    | Detalle                        | Precio unitario (Bs.) | Unidades  | Cantidad | Costo (Bs.) |
|-------|--------------------------------|-----------------------|-----------|----------|-------------|
| 1     | Investigación en Internet      | 169                   | Mes       | 9        | 1521        |
| 2     | Transporte                     | 2,5                   | Pasaje    | 230      | 575         |
| 3     | Impresión                      | 0,2                   | Hoja      | 1350     | 270         |
| 4     | Empastado                      | 4                     | Empastado | 60       | 240         |
| 4     | Mano de obra como investigador | 17                    | hora      | 500      | 8500        |
| Total |                                |                       |           |          | 11106       |

*Fuente: Elaboración propia, 2025*

El valor del costo total de producción del plástico biodegradable a partir de Ajipa a escala laboratorio es la suma de los costos de materia prima, reactivos y costos de consumo energético utilizados para la elaboración del bioplástico.

$$\text{Costo total} = (8,62 + 39,968)\text{Bs.}$$

$$\text{Costo total} = 48,588 \text{ Bs.}$$

El costo para producir 10,058 g de plástico biodegradable a partir de ajipa tiene un costo total de 48,588 Bs.

# **CAPÍTULO V**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

De acuerdo a lo que se propuso en el presente trabajo de investigación, se logró la obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa (*Pachyrhizus Ahipa Wedd*) a escala laboratorio, de tal modo se concluye que:

- La Ajipa proveniente de Caraparí usada como materia prima presentó las siguientes propiedades fisicoquímicas que fueron determinadas por el C.E.A.N.I.D.: 0,41% de ceniza, 1,1% de fibra, 0,17% de Grasa, 79,2% de humedad, 18,98% de hidratos de carbono, 1,24% de proteína total y 82,41% de valor energético.
- Durante el proceso de extracción del almidón de la ajipa, se obtuvo un rendimiento de 11,981% tomando en cuenta el peso total de la ajipa, esto se atribuye al uso de una centrífuga en la etapa de separación, en la cual se determinó que los parámetros óptimos son: velocidad de 3500 r.p.m. por un tiempo de 10 minutos, lo que permitió una separación eficiente y rápida del almidón.
- El almidón obtenido presenta 31,69% de amilosa y 67,41% de amilopectina, lo que la hace apta para formar películas con una resistencia y flexibilidad aceptable.
- Se realizó la selección del proceso de obtención de plástico biodegradable, se ejecutó el proceso de obtención y se determinaron las muestras que presentaron mejores características del plástico biodegradable mediante un análisis sensorial en el cual se tomó en cuenta el aspecto, textura, flexibilidad y resistencia de cada muestra, dicho análisis dio como resultado que las muestras 1, 5 y 6 obtuvieron mayor puntuación.
- Tomando en cuenta los resultados del análisis sensorial y la resistencia a la tracción, se determinó que la formulación óptima para la elaboración de plástico biodegradable es la de la muestra 6 que contiene 5 g de almidón de ajipa, 3,5 g de pectina, 2,528 g de glicerina, 4,061 g de ácido acético y 80 g de agua destilada.
- La caracterización del bioplástico se realizó de acuerdo a normas vigentes los resultados son: Espesor de 0,2 mm (norma NTE INEN 2542), humedad de 22,34%

(de acuerdo a Charro, M., 2015) y resistencia a la tracción de 303,497 N/cm<sup>2</sup> (norma ASTM D882).

- Se realizó prueba de degradación en tierra y en agua de acuerdo a la norma ISO 20200:2006, dando como resultado que la muestra 4 alcanzó un 68,325% de degradación en tierra y un 85,171% de degradación en agua en un tiempo de 28 días, mientras que la muestra 6 que presentó mejores características alcanzó un 54,088% de degradación en tierra y 63,436% de degradación en agua, por lo que se estima que en 52 días se habría degradado por completo.
- De acuerdo a los resultados, el plástico obtenido no debe someterse a un esfuerzo muy alto y tampoco debe estar expuesto al agua o condiciones de humedad elevadas, por lo que podría dársele uso como empaque protector y de esta manera tratar de sustituir un producto.
- El costo estimado de obtención de plástico biodegradable a partir de Ajipa (*Pachyrhizus Ahipa Wedd*) a escala laboratorio es de Bs. 48,588 por 10,058 g de plástico biodegradable.

## 5.2. Recomendaciones

Se recomienda a la carrera de Ingeniería química realizar investigación, ya sea como trabajos de grado o investigaciones concursables:

- Impulsar el estudio sobre la ajipa, sus derivados y sus aplicaciones potenciales en diversos sectores.
- Optimizar el uso de plastificantes en el proceso de obtención de plástico biodegradable.
- Desarrollar nuevas formulaciones de plástico biodegradable a partir de la Ajipa en función a sus utilidades.
- Investigar métodos para minimizar la formación de burbujas durante la etapa de preparación de mezcla en el proceso de obtención de plástico biodegradable.