

# **INTRODUCCIÓN**

## **Antecedentes**

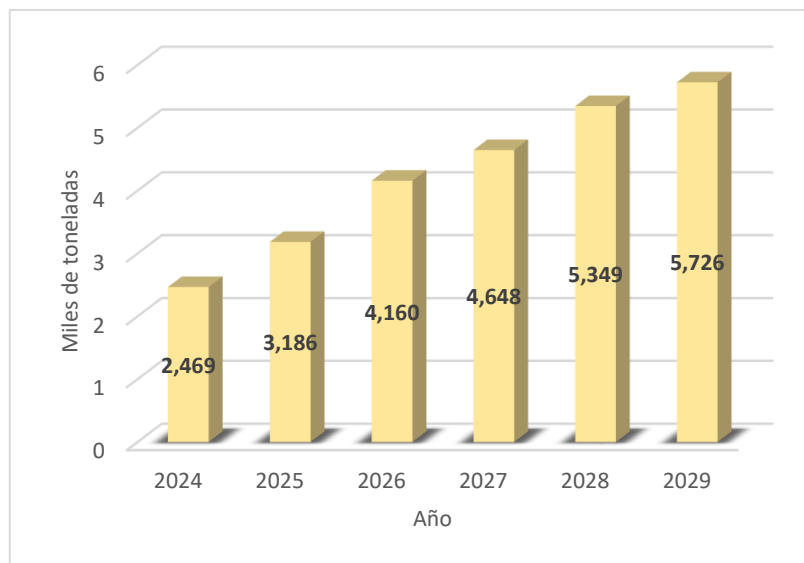
Los primeros plásticos derivaron de materiales orgánicos, aunque originalmente no fueron llamados bioplásticos. El pionero fue John Wesley Hyatt Jr. quien en 1869 creó un plástico derivado de celulosa de algodón como sustituto del marfil. (Renovapack, 2023)

En 1976 la compañía británica Imperial Chemical Industries (ICI) creó el primer producto que se comercializaría como bioplástico, y en 1983 Biopol fue presentado como el primer plástico biodegradable. Durante décadas, los plásticos biodegradables fueron productos que tuvieron precios elevados, alcanzando hasta 20 veces más que los plásticos tradicionales. A partir de la década de los noventa el interés por los plásticos biodegradables se incrementa favorablemente y hoy en día el mercado de los bioplásticos son una realidad y es posible encontrar productos elaborados a partir de estas materias primas. (Trujillo, 2019)

Según European Bioplastics, en la actualidad, los bioplásticos representan aproximadamente el medio por ciento de los casi 414 millones de toneladas de plásticos que se producen anualmente.

La producción mundial de plásticos continúa aumentando de forma constante. Este desarrollo se debe a la creciente demanda, combinada con la aparición de aplicaciones y productos cada vez más sofisticados. En consecuencia, se prevé que la capacidad de producción mundial de bioplásticos aumente significativamente, pasando de aproximadamente 3,186 millones de toneladas en 2025 a aproximadamente 5,726 millones de toneladas en 2029. (Europeanbioplastics, 2024).

En la figura 1 se muestra la producción mundial de bioplásticos desde el año 2024 al 2029

**Fig. 1 Producción Mundial de Bioplásticos 2024-2029**

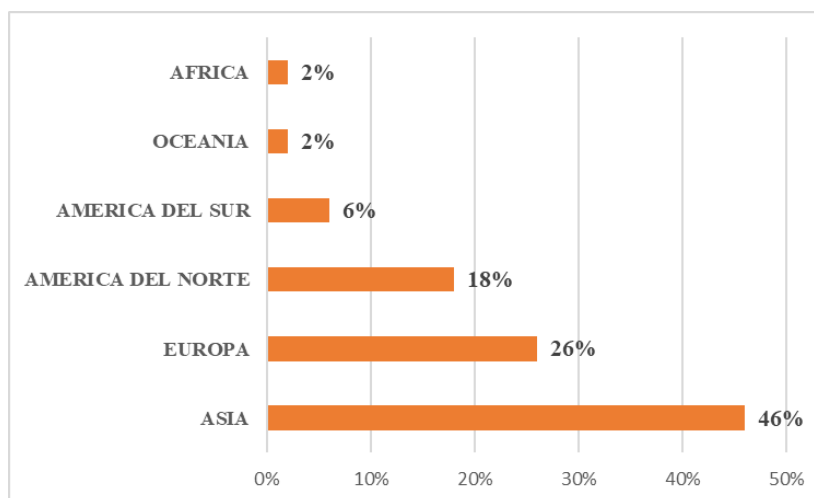
**Fuente:** (Europeanbioplastics, 2024)

La producción de bioplásticos se centra mayormente en Asia que lidera con un 46% de la producción global, seguido por Europa 26% y América del Norte 18%. América del Sur contribuye con un 6%, mientras que Oceanía y África presentan una participación menor, con 2% cada uno, esto se puede apreciar en la figura 2. (Research, 2025)

Esta distribución refleja las diferencias en desarrollo tecnológico, disponibilidad de materias primas y políticas de sostenibilidad entre regiones. Asia consolida su predominio gracias a su capacidad industrial y acceso a recursos agrícolas, mientras que Europa destaca por su marco regulatorio avanzado. Las regiones con menor participación, como África y Oceanía, enfrentan desafíos en infraestructura e inversión, limitando su crecimiento en el sector. (Research, 2025)

Para ver el porcentaje de la distribución mundial de producción de bioplásticos, se detalla en la figura 2.

**Fig. 2 Distribución mundial de producción de bioplásticos**



**Fuente:** (Research, 2025)

El tamaño del mercado de bioplásticos en América Latina alcanzó los 830 millones de dólares en 2024. De cara al futuro, el grupo IMARC espera que el mercado alcance los 2,010 millones de dólares para 2033, con una tasa de crecimiento del 9,20% durante el período 2025 - 2033. El mercado crece a un ritmo constante gracias a los avances en materiales de origen biológico y a las políticas gubernamentales de apoyo. Además, el aumento de la demanda de envases sostenibles y alternativas ecológicas está impulsando la producción regional, lo que sitúa a América Latina como un actor importante en el cambio mundial hacia los plásticos renovables y biodegradables. (Pástor, 2025)

El crecimiento del mercado de bioplásticos en Latinoamérica se debe en gran parte a la creciente demanda de soluciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en la industria alimentaria, de envasado y de productos de consumo. Los bioplásticos a base de almidón son una opción atractiva para las empresas de fabricación porque están hechos de recursos renovables y pueden compostarse o biodegradarse. (Santana, 2023)

La empresa mexicana BioSolutions es una empresa mexicana fundada en 2010 que ha desarrollado una tecnología propia, patentada, para producir compuestos bioplásticos duraderos (biobasados) a base de fibras naturales ricas en celulosa. (Laborde, 2025)

Actualmente transforma fibras del bagazo de agave, considerado un desecho de la industria tequilera y mielera, en materiales para fabricar productos como: películas, bolsas plásticas, piezas inyectadas y envases soplados entre otros. La fundadora de BioSolutions indica que hoy cuenta con una capacidad de producción de 40,000 toneladas mensuales. (Laborde, 2025)

En América del Sur, la producción de bioplásticos se desarrolla en países como Colombia, Chile, Brasil y Argentina. Este último cuenta con la primera planta productora de bioplásticos del país, orientada a reducir el impacto ambiental y los riesgos ecológicos asociados al uso de plásticos convencionales, posicionándose como una de las pioneras en su tipo en Latinoamérica. (Riera, 2018)

En Brasil, la empresa Braskem lidera la producción regional con más de 200,000 toneladas anuales de polietileno verde elaborado a partir de caña de azúcar, exportado a múltiples mercados internacionales. (Braskem, 2025)

En Chile y Colombia, se impulsan proyectos piloto y desarrollos industriales para bioplásticos a partir de residuos agroindustriales, mientras que Perú avanza en investigaciones con algas y subproductos agrícolas. (Redalyc, 2024)

En Ecuador, aunque todavía no existen plantas industriales en funcionamiento, se realizan estudios para producir bioplásticos empleando materias primas como almidón de banano, oca y otras fuentes de biomasa, con el objetivo de promover una producción sostenible en el futuro cercano. (Riera, 2018)

En Bolivia se encuentra la primera planta de producción de plástico biodegradable, llamada Hidrobag, un hito importante para la industria local y un avance significativo en la lucha contra la contaminación ambiental. Esta empresa, ubicada en el Parque Industrial Latinoamericano (PILAT) de Santa Cruz, comenzó sus operaciones en septiembre de 2022 y cuenta con una capacidad de producción de hasta 36 toneladas mensuales de producto terminado. (Toledo, 2023)

Hidrobag destaca por su compromiso con la sostenibilidad, al fabricar bolsas biodegradables a base de almidón de yuca. Estos productos se descomponen en sus componentes básicos en solo 180 días, lo que los convierte en una alternativa ecológica y responsable con el medio ambiente. (Toledo, 2023)

En el Dpto. de Tarija, hasta la fecha aún no existe datos, que indiquen la producción de plásticos biodegradables, aunque el mercado de los bioplásticos es una realidad y se pueden hallar diversos productos elaborados con estas materias primas sostenibles.

En la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, en la carrera de Ingeniería Química existen trabajos de investigación de elaboración de plástico biodegradable a partir de la cascara de plátano, de la fécula de yuca y de almidón de cascara de la papa.

La quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) es un grano andino considerado como el principal alimento de las culturas antiguas de los Andes. Siendo un grano adaptado y cultivado en las altas mesetas de Bolivia y Perú desde la época prehispánica (hace más de 5,000 años). Es una especie oligocéntrica, es decir, con centro de origen de amplia distribución y diversificación. No obstante, la cuenca del Lago Titicaca es considerada como el centro de conservación y la zona de mayor diversidad y de variabilidad genética. (Bojanic, 2011)

De acuerdo a la tabla 1, Estados Unidos se posiciona como el principal importador, con una cantidad significativamente superior de 36,783 toneladas. Esta cifra no solo lo sitúa en la primera posición, sino que también indica un dominio considerable en el mercado, superando a su competidor más cercano Canadá, por un amplio margen. Canadá ocupa el segundo lugar con 9,111 toneladas, seguido por Alemania y Francia, con 7,841 y 7,124 toneladas respectivamente. La diferencia entre el segundo y el cuarto lugar es relativamente menor en comparación con la brecha entre el líder del mercado y el resto de los países. Los Países Bajos y el Reino Unido completan la lista, con 5,822 y 4,275 toneladas, respectivamente. (Trade Map, 2020)

A continuación, se presenta la cantidad importada en toneladas de los principales países importados en 2020 en la tabla 1

**Tabla 1 Cantidad importada en toneladas de los principales países importadores**

Posición	País	Cantidad en toneladas
1	Estados Unidos	36,783
2	Canadá	9,111
3	Alemania	7,841
4	Francia	7,124
5	Países bajos	5,822
6	Reino Unido	4,275

**Fuente:** (Trade Map, 2020)

El mercado de exportaciones está dominado por Perú con 50,998 toneladas y Bolivia con 37,298 toneladas, que en conjunto representan la mayor parte del volumen exportado. Esta concentración de la oferta en dos países sudamericanos sugiere que son los principales productores y exportadores del producto en cuestión a nivel global. (Trade Map, 2020)

A continuación, se muestra la cantidad exportada en toneladas de los principales países exportadores en la tabla 2.

**Tabla 2 Cantidad exportada en toneladas de los principales países exportadores**

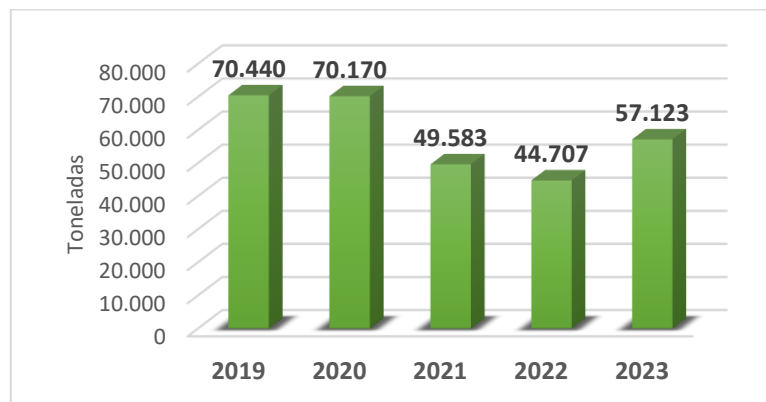
Posición	País	Cantidad en toneladas
1	Perú	50,998
2	Bolivia	37,298
3	Países Bajos	7,041
4	Estados Unidos	4,283
5	España	3,681
6	Alemania	3,464
7	Canadá	2,207

**Fuente:** (Trade Map, 2020)

La quinua es uno de los siete cultivos prioritarios de Bolivia debido a su potencial para contribuir al desarrollo rural. Bolivia es el segundo país productor de quinua del mundo después de Perú, con 70,440 toneladas producidas en 2019. Mientras en 2022 la producción de quinua llegó a 44,707 toneladas, para el 2023 se incrementó a 57,123 toneladas. (INE, 2023)

A continuacion, en la siguiente figura se observa la produccion de quinua en bolivia desde el año 2019 al 2023.

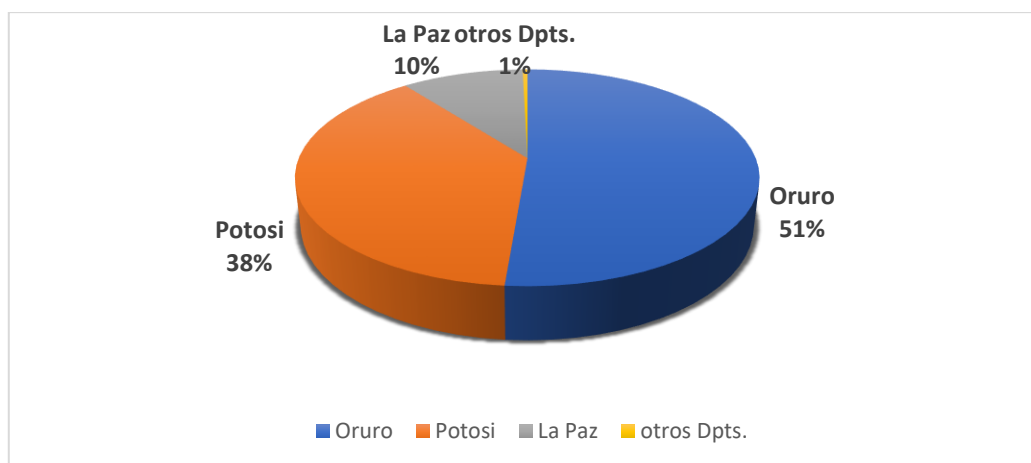
**Fig. 3 Producción de Quinua en Bolivia, 2019-2023 (En toneladas)**



**Fuente:** (INE, 2023)

El principal productor de este grano, es el departamento de Oruro, con el 51% de participación, seguido de Potosí que contempla el 38% y La Paz 10%, entre los departamentos de mayor participación en la producción nacional; el resto de los departamentos cuenta con una producción mínima alcanzando sol el 1%. (UDAPRO, 2013).Ver figura 4

**Fig. 4 Participación de la producción de quinua, por departamento**



**Fuente:** (UDAPRO, 2013)



## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Elaborar plástico biodegradable a partir de la quinua blanca producida en Bolivia.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar la materia prima (Quinua blanca) para la elaboración de plástico biodegradable.
- Seleccionar y diseñar el procedimiento experimental para la elaboración del plástico biodegradable a partir de la quinua blanca
- Obtener el producto terminado (Plástico biodegradable).
- Caracterizar el plástico biodegradable a partir de la quinua blanca.
- Comparar las características del plástico biodegradable, con estándares comerciales.
- Realizar el balance de materia, energía en el proceso de obtención de plástico biodegradable,
- Determinar los costos del proyecto.

## **Justificación**

### **Justificación tecnológica**

Se justifica esta investigación, por el aporte de nuevas formas innovadoras que se le da a la materia prima (quinua blanca), un recurso agrícola boliviano de mucha importancia, aprovechándolo para la implementación de industrias de plásticos biodegradables.

La Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” de Tarija cuenta con un valioso equipamiento especializado para la investigación en la producción de plástico biodegradable. Este recurso, está disponible para estudiantes de ingeniería química y abre un amplio abanico de posibilidades para el desarrollo de proyectos innovadores en el campo de los materiales biodegradables.

**Justificación económica**

La presente investigación tiene un gran potencial para que ayude a la conservación del medio ambiente, por tanto, es un motor de crecimiento económico. La creación de una industria de plásticos biodegradables a partir de la quinua blanca genera empleo en múltiples áreas: desde la investigación y el desarrollo, hasta la producción, comercialización, servicios auxiliares y el fomento de nuevos emprendimientos. Esto no solo impulsaría la economía local y nacional, sino que también diversificaría la matriz productiva de Bolivia y reduciría la dependencia de plásticos derivados del petróleo.

**Justificación social**

La producción del plástico biodegradable no solo aborda el problema de la contaminación plástica, sino que también ofrece beneficios sociales significativos al contribuir la calidad de vida de las comunidades, promover prácticas sostenibles, estimular la innovación y el desarrollo económico.

**Justificación ambiental**

La presente investigación responde directamente a la crisis global de contaminación por plásticos no degradables. Al utilizar quinua, un recurso renovable y biodegradable, se obtendrán materiales que se descompondrán naturalmente, reduciendo drásticamente la acumulación de residuos en vertederos y ecosistemas. Además, disminuye la huella de carbono asociada a la producción de plásticos tradicionales, contribuyendo a la lucha contra el cambio climático y promoviendo un modelo de economía circular más sostenible para Bolivia.

**Justificación personal**

Por medio de este proyecto se pretende generar nuevos conocimientos científicos para la Universidad, incursionando en la innovación, como también en la culminación del plan de estudios de la carrera de Ingeniería Química, generando un impacto positivo a la sociedad.

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

## 1.1 Origen de la quinua blanca

La quinua o quínoa (*Chenopodium quinoa*) es uno de los cultivos más importantes para alimentación humana en la región andina de Sudamérica (FAO 1998). De ser considerada en el pasado como un “cultivo de indios”, actualmente es reconocido como uno de los cultivos subutilizados más promisorios y estratégico a nivel mundial, debido a su potencial en el logro de la seguridad alimentaria y nutricional, su utilidad para la erradicación de la pobreza, como alternativa para solucionar los graves problemas de nutrición humana en países subdesarrollados y su potencial gastronómico y comercial. (Deber, 2023)

La quinua tiene su centro de origen y domesticación en la cuenca del lago Titicaca y valles interandinos de los Andes de Sudamérica. Posiblemente fue domesticada a partir de sus parientes silvestres, hace aproximadamente 6 mil años A.C. por las culturas de Tihahuanaco y Lupacas, en Perú. (Janco, 2023). Ver figura I-1

**Fig. I-1 La Quinua**



**Fuente:** (ADMIN, 2021)

En Bolivia, se cultiva quinua en el Altiplano Norte, Central y Sur, valles interandinos y en los salares existentes al sur que se caracterizan por tener un clima templado. El

cultivo rinde mejor en lugares áridos y semiáridos, con influencia de la radiación solar. (MDRyT, 2009)

En los últimos 5 años la superficie cultivada ha crecido y se estima actualmente en más de 50,000 hectáreas, en el altiplano boliviano. Las principales áreas de cultivo que se han desarrollado son: La Paz, Oruro y Potosí. (MDRyT, 2009)

## 1.2 Características de la quinua blanca

### 1.2.1 Taxonomía

La quinua es una planta alimenticia de desarrollo anual, dicotiledónea que usualmente alcanza una altura de 1 a 3 m. (Rodriguez, 2020).

A continuación, se presenta la taxonomía de la quinua en la tabla I-1

**Tabla I-1 Taxonomía de la Quinua**

<b>Taxonomía</b>	
<b>Nombre científico</b>	Chenopodium quinua
<b>Familia</b>	Chenopodiaceae
<b>Reino</b>	Plantae
<b>Clase</b>	Dicotyledoneas
<b>Subclase</b>	Angiosperma
<b>Orden</b>	Centropermales
<b>Genero</b>	Chenopodium
<b>Sección</b>	Chenopodia
<b>Subsección</b>	Cellulata
<b>Especie</b>	Chenopodium quinoa Willdenow

**Fuente:** (Guerrero, 2013)

### 1.2.2 Composición Nutricional

La quinua tiene un excepcional valor nutritivo, con proteínas de alto valor biológico y excelente balance de aminoácidos esenciales, ubicados en el endosperma o núcleo del grano, a diferencia de otros cereales que los tienen en el exosperma o cáscara, como el arroz o trigo. Desde el punto de vista nutricional y alimentario, la quinua es una fuente

natural de proteína vegetal de alto valor nutritivo, por la mayor proporción de aminoácidos esenciales, que le confieren un alto valor biológico superior al trigo, arroz y maíz, y comparable solo con la leche, la carne y el huevo. Como fuente de proteína vegetal, la quinua ayuda al desarrollo y crecimiento del organismo, conserva el calor y energía del cuerpo, es fácil de digerir y combinada con otros alimentos forma una dieta completa y balanceada que pueden sustituir alimentos de origen animal. (Rojas, 2010)

De acuerdo a la tabla I-2. En 100 g de semillas frescas se tiene:

**Tabla I-2 Composición Nutricional de la Quinua**

<b>Composición nutricional</b>	
<b>Proteínas (g)</b>	11,81
<b>Humedad (%)</b>	9,67
<b>Hidratos de carbono totales (g)</b>	69,68
<b>Grasa (g)</b>	5,70
<b>Calcio (mg)</b>	51
<b>Fósforo (mg)</b>	414
<b>Hierro (mg)</b>	9,7
<b>Cenizas (g)</b>	3,11
<b>Valor energético (cal)</b>	377
<b>Fibras (g)</b>	2,44

**Fuente:** (UNICEF, 1984)

### 1.2.3 Variedades de la quinua

Actualmente hay múltiples cultivos de quinua, los mismos que son destinados para el consumo diario y transformados en diferentes productos.

Entre las variedades de quinua más conocidas se tiene las siguientes:

- **Quinua negra (Chara):** la quinua negra mantiene su llamativo color negro cuando esta cocida. La quinua negra es más oscura, crujiente y su grano tiene un sabor más fuerte que otras variedades. La quinua negra tiene un alto contenido de nutrientes y es más dulce que la quinua blanca. (Morales, 2020)

- **Quinua roja:** Las propiedades de la quinua roja son muy similares a las de la blanca. La quinua roja tiene el mismo contenido de proteína, aminoácidos y beneficios nutritivos que la quinua blanca, aunque su sabor es ligeramente distinto. (Morales, 2020)
- **Quinua Blanca:** Es la más fácil de conseguir, y también es la variedad más conocida. Su contenido calórico es menor que el de las otras variedades, ya que posee 160 calorías por  $\frac{1}{4}$  de taza. Sin embargo, tiene el doble de fibra que la quinua roja, lo cual beneficia el funcionamiento del sistema digestivo y ayuda a controlar los niveles de azúcar en sangre. (Morales, 2020)

### 1.3 Almidón

El almidón es un polisacárido abundante de bajo costo, renovable y totalmente biodegradable que se encuentra en las plantas. El almidón comercial se obtiene de las semillas de cereales: arroz, trigo, varios tipos de arroz, y tubérculos como la patata. Es importante como constituyente de los alimentos en los que está presente, tanto desde el punto de vista nutricional como tecnológico. (Mela, 2017). Ver figura I-2.

**Fig. I-2 Almidón**



**Fuente:** (Mela, 2017)

#### 1.3.1 Estructura del almidón

El almidón se encuentra almacenado en plantas como gránulos o partículas sólidas. La amilosa comprende casi 20% en masa del almidón y consiste de varios cientos de

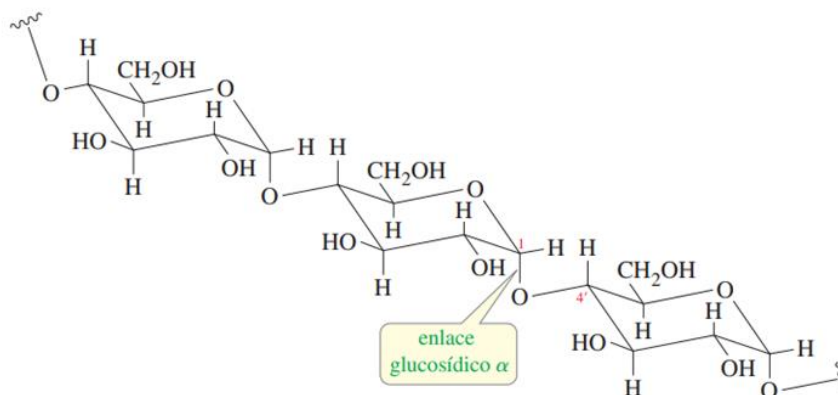
moléculas de glucosa unidas entre sí por enlaces  $1 \rightarrow 4\text{-}\alpha$ -glicosídicos. La amilopectina comprende 80% restante del almidón y es más compleja en estructura que la amilosa. La amilopectina contiene ramificaciones  $1 \rightarrow 6\text{-}\alpha$ -glicosídicas, aproximadamente cada 25 unidades de glucosa. (Wade, 2011)

### 1.3.1.1 Amilosa

La amilosa es un polímero lineal de la glucosa con enlaces glicosídicos 1,4. La amilosa tiene enlaces  $\alpha$ -1,4, en la figura I - 3 se muestra una estructura parcial de la amilosa. El enlace  $\alpha$  en la amilosa pliega la cadena de polímero en una estructura helicoidal. Este plegado incrementa los enlaces por puente de hidrógeno con el agua y suministra la solubilidad adicional, como resultado la amilosa es soluble en agua, es una excelente fuente alimenticia, el enlace glicosídico  $\alpha$ -1,4 se hidroliza con facilidad por medio de una enzima  $\alpha$ -glucosidasa, que se encuentra en todos los animales. (Wade, 2011)

La siguiente figura I-3, muestra la estructura de la amilosa

**Fig. I-3 Amilosa**



**Fuente:** (Wade, 2011)

### 1.3.1.2 Amilopectina

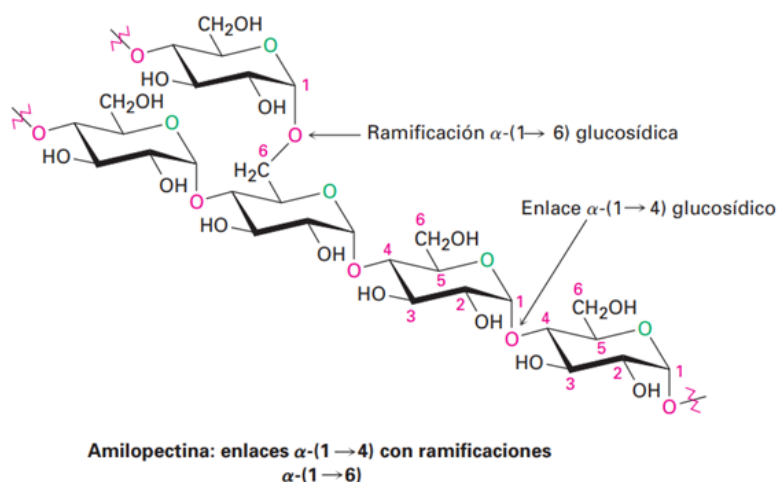
La amilopectina, la fracción insoluble del almidón, también es principalmente un polímero  $\alpha$ -1,4 de la glucosa. La diferencia entre la amilosa y la amilopectina se encuentra en la naturaleza ramificada de la amilopectina, con un punto de ramificación aproximadamente cada 20 a 30 unidades de glucosa. Otra cadena comienza en cada



punto de ramificación, conectada a la cadena principal por medio de un enlace glicosídico  $\alpha$ -1,6. En la figura I - 4 se muestra una estructura parcial de la amilopectina, incluyendo un punto de ramificación. (Wade, 2011)

La siguiente figura I-4, muestra la estructura de la amilopectina

**Fig. I-4 Amilopectina**



**Fuente:** (Wade, 2011)

### 1.3.2 Gelatinización del almidón

Se define como la pérdida de cristalinidad de los granos de almidón en presencia de calor y altas cantidades de agua con muy poca o ninguna despolimerización. Los granos de almidón son insolubles en agua y en solventes orgánicos.

En suspensión acuosa los granos se hinchan por la acción del calor, tienden a perder las propiedades que le confiere su estructura semicristalina y a una temperatura crítica forman un gel. (García A. , 2015)

### 1.3.3 Retrogradación del almidón

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

Por otro lado, la retrogradación de la amilopectina es más lenta y puede ocurrir en días o semanas debido a su estructura ramificada. (Srichuwong & Jane, 2007).

#### **1.3.4 Solubilidad y capacidad de hinchamiento**

La solubilidad y la capacidad de hinchamiento son propiedades funcionales clave para evaluar la calidad del almidón, ya que reflejan su comportamiento frente a procesos térmicos y su interacción con el agua. Estas propiedades son esenciales en aplicaciones industriales, ya que afectan la funcionalidad del almidón en productos alimenticios y no alimenticios. Una mayor solubilidad, por ejemplo, puede ser beneficiosa en procesos donde se requiere dispersión rápida del almidón, mientras que una capacidad de hinchamiento adecuada es clave en la formación de geles y en la textura de alimentos procesados. (Tester & Morrison, 1990).

#### **1.4 Plástico Biodegradable**

Los plásticos biodegradables son aquellos que están fabricados con materias primas renovables, como trigo, maíz o maicena, aceite de soja, patatas, plátanos, etc. Dada su forma de producción, estos plásticos se biodegradan mediante microorganismos, por lo que pueden reintroducirse en el ciclo natural del medio ambiente en forma de abono orgánico beneficioso para el suelo y con un periodo de tiempo de degradación mucho menor al de los plásticos convencionales (Manjon, 2019).

**Fig. I-5 Bioplástico**



**Fuente:** (Waller, 2019)

## **1.5 Plastificantes**

El plastificante es una sustancia normalmente líquida y de viscosidad mayor a la del agua que se adiciona a la mezcla con el fin de mejorar la flexibilidad del material mediante la reducción de las fuerzas intermoleculares, disminuye su fragilidad, mediante la reducción de los enlaces de hidrógeno internos entre las cadenas de polímero y el aumento de los espacios intermoleculares y debido a su naturaleza hidrofílica. El efecto plastificante puede ser dado por sustancias como: alcoholes, aldehídos, cetonas, aminas, ésteres, amidas y mezclas entre estos. (Gonzales, 2020)

La incorporación de los plastificantes mejora el proceso de gelatinización, proceso indispensable para la obtención del plástico biodegradable. (Rojas, 2018)

### **1.5.1 Glicerina**

La glicerina, también conocida como glicerol, es un compuesto orgánico que se encuentra naturalmente en muchas grasas y aceites vegetales. La fórmula química de la glicerina es  $C_3H_8O_3$ , lo que indica que está compuesta por tres átomos de carbono, ocho átomos de hidrógeno y tres átomos de oxígeno. Su estructura química es la de un alcohol, ya que contiene grupos hidroxilo (-OH) unidos a los átomos de carbono (Bravo, 2019).

Al añadir glicerina lo que conseguimos es un aspecto suave, uniforme y tiene una acción como lubricante, mejorando la flexibilidad de las películas resultantes. Al incrementar la concentración del plastificante, la elongación y deformación de la película aumentan, mientras que el esfuerzo de ruptura y el módulo tensil disminuye. (Gonzales, 2020)

### **1.5.2 Agua destilada**

Se trata de agua ( $H_2O$ ) pura, es decir, carente de impurezas, que se ha obtenido mediante un proceso de destilación. Se utiliza comúnmente como plastificante del almidón para la obtención de termoplásticos, debido a que es muy económico, el cual se emplea con la intención de conseguir propiedades mecánicas, así como también propiedades de barrera óptimas. (Castillo, 2020)

## **1.6 Ácido acético**

También llamado ácido etanoico, es un ácido orgánico de dos átomos de carbono, se puede encontrar en forma de ion acetato. Su fórmula es  $\text{CH}_3\text{-COOH}$ , siendo el grupo carboxilo es el que le confiere las propiedades ácidas a la molécula. Este es un ácido que se encuentra en el vinagre, siendo el principal responsable de su sabor y olor agrios. (Barragan, 2018)

Para la elaboración de plástico biodegradable, el ácido acético se lo emplea como un aditivo propuesto para actuar como modificador químico, ya que reduce la naturaleza hidrofílica del almidón, otorgando propiedades hidrofóbicas a la sustancia en la que se actúa. (Castillo, 2020)

La influencia que tiene el ácido acético consiste en acabar con alguna de las ramas de la amilopectina (uno de los componentes básicos del almidón, se trata de un polímero ramificado y corto que le confiere al plástico una estructura quebradiza y débil). (López, 2021)

## **1.7 Factores que requieren control durante la gelatinización del almidón para la obtención de plástico biodegradable**

### **1.7.1 Agitación**

La agitación, tanto inicialmente como durante el proceso de gelatinización, permite a los gránulos de almidón hincharse independientemente y crear una mezcla uniforme, sin grumos. Sin embargo, la agitación excesiva después de que se completa la gelatinización puede romper gránulos y, en consecuencia, aumentar la fluidez del almidón. El tiempo de agitación va depender de la cantidad de mezcla que va ser empleada para la elaboración de plástico biodegradable. (Orellana, 2015)

### **1.7.2 Temperatura**

La gelatinización del almidón se completa a 60-72°C, aunque los almidones varían según su temperatura de gelatinización. Cuando se alarga el tiempo de calentamiento, la mezcla final puede ser menos espesa debido a la rotura de los gránulos agrandados.

Por lo tanto, si el calentamiento es más largo puede evaporar el agua de tal forma que aclararía la mezcla. (Orellana, 2015)

## 1.8 Métodos para obtener plástico biodegradable

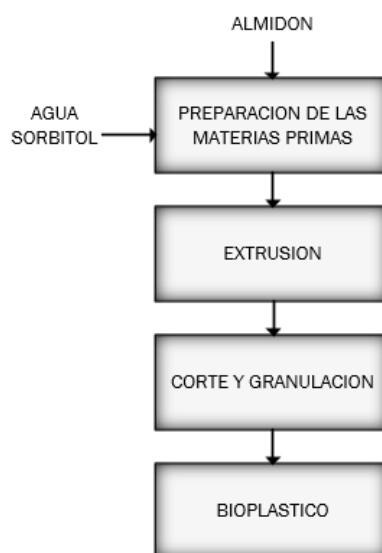
### 1.8.1 Método brasileño

Un método de obtención de plástico biodegradable a partir de harina de yuca, ha sido desarrollado en Brasil, pero que utiliza para la reacción de reticulación una solución de epiclorhidrina que es una sustancia con muy buenas propiedades reticulantes haciendo al material más resistente y que da mayor rigidez a las moléculas, ya que forma enlaces cruzados, pero es una sustancia cancerígena, motivo por el cual no se considera que debería utilizarse ya que en muchos casos el bioplástico está en contacto con alimentos y dada la variedad de condiciones a las que son expuestas, existe el riesgo de contaminar, y como tal pierde la razón de ser del bioplástico que se quiere obtener. (Chero, 2015)

### 1.8.2 Método por extrusión

A continuación, se muestra el diagrama del método por extrusión en la figura I-6

**Fig. I-6 Diagrama por el método por extrusión**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

A continuación, se hace la descripción del proceso “Método por extrusión”:

**1. Preparación de las materias primas:** Esta etapa implica un acondicionamiento preciso de la mezcla. La variable a considerar es el tiempo de mezclado: Fundamental para lograr una distribución homogénea de los plastificantes en el almidón. Típicamente entre 5 y 15 minutos. (Chero, 2015)

- **Agua:** Su función principal es facilitar la gelatinización del almidón al hidratar los gránulos, permitiendo que se hinchen y se rompan bajo las condiciones de temperatura y presión de la extrusora. La cantidad de agua añadida, típicamente entre el 10% y el 20%, es un parámetro crítico que influye en la viscosidad de la mezcla y en las propiedades del producto final. (Chero, 2015)
- **Sorbitol:** Su principal función es reducir la fragilidad, aumentar la flexibilidad y procesabilidad del material, reduciendo la rigidez del bioplástico resultante del bioplástico final, para el proceso se adiciona con una proporción de 15 al 30%. (Chero, 2015)

En esta etapa no ocurren reacciones químicas de transformación profunda del almidón. La principal interacción es de naturaleza física: la hidratación de los gránulos de almidón. Las moléculas de agua comienzan a penetrar en la estructura semicristalina del gránulo, preparando el material para los cambios que sufrirá en la extrusora. (Chero, 2015)

**2. Extrusión:** La extrusión es el corazón del proceso, donde ocurre la transformación termomecánica del almidón.

**Variables a tomar en cuenta:**

- **Temperatura:** Generalmente se opera entre 140 °C y 180 °C. Una temperatura muy alta causa degradación excesiva, mientras que una muy baja no completa la gelatinización. (Chero, 2015)
- **Presión:** Oscila entre 2 y 20 MPa. Es crucial para evitar la vaporización explosiva del agua y para homogenizar la masa fundida. (Chero, 2015)

- Velocidad del tornillo: El tiempo que el material permanece dentro del extrusor, usualmente entre 1 y 3 minutos en el extrusor y la velocidad oscila entre 100 y 300 rpm. (Chero, 2015)

La interacción que tiene el almidón con el sorbitol no es una reacción con formación de nuevos enlaces covalentes, sino la formación de nuevos puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo -OH del almidón gelatinizado y los grupos -OH del agua y del sorbitol. Esta interacción molecular es la que plastifica efectivamente la matriz de almidón, impidiendo la retrogradación y conferiendo flexibilidad. (Chero, 2015)

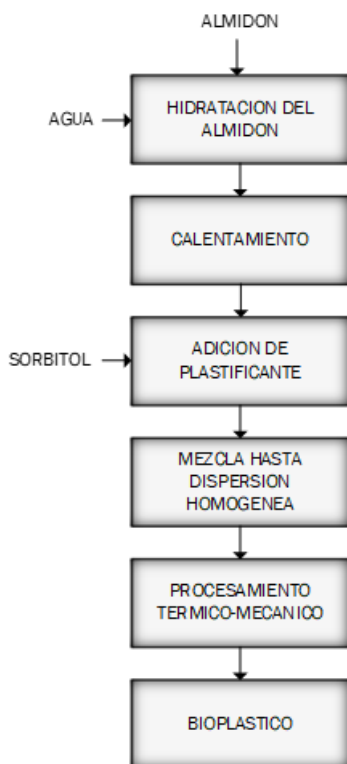
Un aspecto a considerar, es de que las piezas del extrusor de tornillo a utilizar deben ser altamente resistentes al desgaste, aunque los costos de éste sean altos, lo cual es una desventaja para este proceso. (Chero, 2015)

3. **Corte y granulación:** Esta etapa es crucial para determinar la forma y tamaño final del producto. El corte se realiza mientras el material está aún caliente y maleable, aprovechando su plasticidad. La granulación permite obtener formas específicas (pellets, gránulos, tiras) que facilitan el manejo, almacenamiento y posterior procesamiento del bioplástico. (Chero, 2015)

### 1.8.3 Método termo mecánico

A continuación, se muestra el diagrama del proceso termo mecánico en la figura I-7

**Fig. I-7 Diagrama del proceso termo mecánico**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

A continuación se hace la descripción del proceso “ Método termo mecánico”:

1. **Mezcla de Almidón con Agua:** La primera etapa para la preparación del almidón termoplástico es la mezcla del almidón con agua en proporciones que dependen de la calidad de plástico que se quiere obtener. Esta etapa dura aproximadamente 20 minutos hasta lograr una buena disolución a temperatura ambiente. (Chero, 2015)
2. **Calentamiento:** La mezcla se calienta para gelatinizar el almidón, rompiendo la estructura cristalina. Los gránulos de almidón se hinchan y rompen, liberando amilosa. Se forma una pasta viscosa por ruptura de puentes de hidrógeno entre cadenas de glucosa. (Chero, 2015)



**Las variables a tomar en cuenta son:**

- Temperatura: Que oscila entre 65 - 90°C, según tipo de almidón (maíz, yuca, etc). (Chero, 2015)
- Tiempo: De 10 a 20 minutos, hasta formar una pasta homogénea viscosa. (Chero, 2015)
- Agitación: La agitación debe ser constante, con el fin de evitar grumos y quemado. (Chero, 2015)

3. **Adición de Plastificante:** Se añade un plastificante (sorbitol o una mezcla de polioles como sorbitol más manitol) para mejorar la plasticidad del material. El uso de una cantidad insuficiente de plastificante puede resultar en una destrucción incompleta de la estructura cristalográfica del almidón, afectando las propiedades del producto final. (Chero, 2015)

Aquí ocurre una interacción física, donde el plastificante (Sorbitol) se interpone entre las cadenas de amilosa/amilopectina, reduciendo fuerzas intermoleculares. (Chero, 2015)

**Las variables a tomar en cuenta son:**

- Temperatura: El valor recomendado oscila entre 60 - 70°C, con la finalidad de evitar evaporación del plastificante. (Chero, 2015)
- Tiempo de mezcla: Oscila entre 5 a 10 minutos, hasta su incorporación completa. (Chero, 2015)

4. **Mezcla hasta Dispersión Homogénea:** Se continúa mezclando hasta lograr una dispersión homogénea de todos los componentes. (Chero, 2015)
5. **Procesamiento Térmico-Mecánico:** Mediante el uso de máquinas como extrusoras, se aplica temperatura y fuerza de cizalla para romper la estructura cristalina de los gránulos de almidón, transformándolos en una fase continua de polímero. En este estudio se afirma que para obtener el bioplástico se hace el uso de máquinas convencionales para procesar plásticos, (por ejemplo, por extrusión). (Chero, 2015)

En esta etapa existe ruptura de enlaces de hidrógeno entre cadenas de glucosa. Desestructuración total del granulo → forma una fase continua polimérica y posible degradación térmica si se excede temperatura ( $>180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). (Chero, 2015)

**Las variables a tomar en cuenta:**

- Temperatura: El valor recomendado es de  $100 - 160^{\circ}\text{C}$ . (Chero, 2015)
- Velocidad: Oscila entre 100 a 200 rpm. (Chero, 2015)
- Presión: El valor recomendado es de 5 a 15 Mpa. (Chero, 2015)
- Tiempo de residencia: Debe ser menor a 2 minutos, para así evitar la degradación térmica. (Chero, 2015)

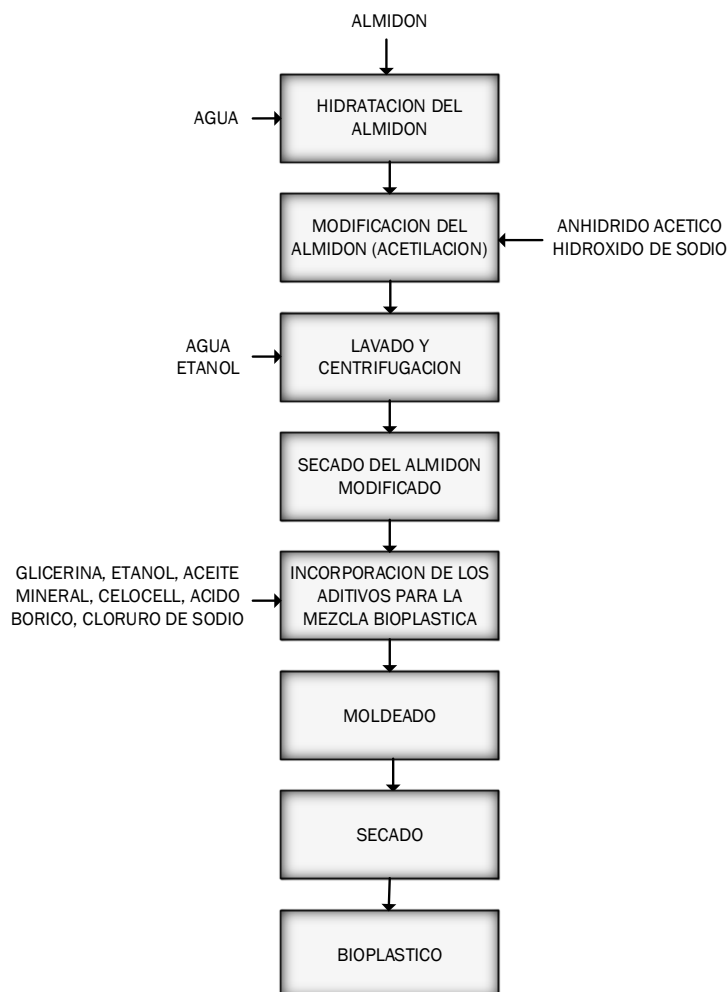
6. **Obtención del Almidón Termoplástico:** El resultado final es un material plástico basado en almidón termoplástico, listo para su uso en aplicaciones específicas. (Chero, 2015)

#### **1.8.4 Método con almidón modificado por acetilación**

Este método se constituye en la sustitución de los hidrógenos presentes en los grupos hidroxilos de la molécula de la amilosa. Este proceso cuenta con una etapa adicional, que consiste en que previo a iniciar el proceso de obtención de la película plástica, se realiza la modificación a la molécula del almidón. (Cardona, 2019)

A continuación, se muestra el diagrama del proceso “Método con almidón modificado por acetilación” en la figura I-8.

**Fig. I-8 Diagrama del método con almidón modificado por acetilación**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

A continuación, se hace la descripción del proceso “Método con almidón modificado por acetilación”:

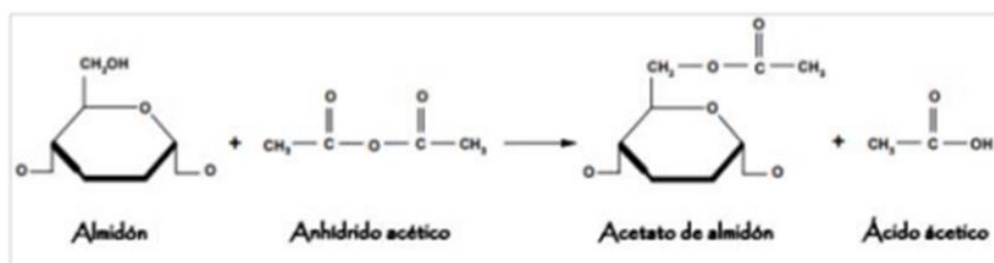
1. **Hidratación del Almidón:** Se mezcla el almidón nativo con agua destilada en proporciones definidas. La hidratación se realiza bajo agitación constante entre 150 – 200 rpm, por un tiempo de 10 min y temperatura de 25°C para hinchar los gránulos y exponer los grupos hidroxilo (–OH) de las cadenas de amilosa y amilopectina. (Cardona, 2019)

- 2. Modificación del Almidón (Acetilación):** Se ajusta el pH a 8 - 8.5 con NaOH o con el fin de mantener controlada la alcalinidad de la solución. Se añade anhídrido acético gota a gota bajo agitación. La reacción se mantiene a 25 - 30°C durante 50 - 65 min. (Cardona, 2019)

El hidróxido de sodio actúa como un catalizador básico. Su función es deprotonar ligeramente los grupos hidroxilo del almidón, generando un nucleófilo más fuerte (alcóxido,  $\text{-O}^-$ ). Este nucleófilo ataca al carbono carbonílico electrofílico del anhídrido acético. El intermediario resultante colapsa, expulsando un ion acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ), que luego protona para formar ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), y formando el éster (almidón acetato).

La reacción mostrada en la Figura I-9 corresponde a la adición de Anhídrido acético, reactivo más comúnmente utilizado para la acetilación del almidón, mismo que se usa en el presente estudio.

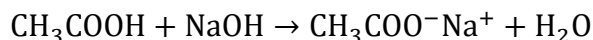
**Fig. I-9 Reacción química del almidón modificado por acetilación**



**Fuente:** Arenas y Pedraza, (2017)

El hidróxido de sodio neutraliza el ácido acético subproducto, evitando que rompa las cadenas de almidón, lo que debilitaría el bioplástico. A continuación, se muestra la ecuación I-1.

**Ecuación I-1 Reacción química del hidróxido de sodio y el ácido acético**



- 3. Lavado y Centrifugación:** El objetivo de esta etapa es eliminar los subproductos y reactivos no consumidos de la reacción de acetilación, principalmente ácido acético y posiblemente anhídrido acético residual. El

lavado con una mezcla de agua/etanol es efectivo porque disuelve estas impurezas sin redissolver el almidón acetilado.

- Lavado con agua (3 veces): Neutraliza el medio y remueve sales.
- Lavado con etanol (1 vez): Elimina trazas de anhídrido no reaccionado y acetatos.
- Centrifugación (10 min, 3000 - 4000 rpm): Separa el almidón modificado de los líquidos residuales. (Cardona, 2019)

**4. Secado del Almidón Modificado:** En esta etapa se busca obtener un polvo estable para su uso en la síntesis de bioplástico. El secado se realiza en una estufa a 40°C por 8 h. (Cardona, 2019)

**5. Mezcla de almidón modificado con agua destilada:** Al tener el almidón modificado se sigue el proceso descrito, con el fin de obtener el bioplástico, que presenta resultados fisicoquímicos favorables, puesto que la gelatinización del material aumenta al doble comparada con la del almidón sin modificar (la temperatura de gelatinización normal del almidón es de 60 a 72 °C, y con el almidón modificado va de 120 a 140 °C), esto muestra que el producto final aumenta la capacidad de retención de agua y disminuye la deformación del material. (Cardona, 2019)

En esta etapa se mezcla el almidón modificado con agua destilada, con el fin de hidratar al almidón, esta mezcla se lleva a cabo utilizando agitación magnética con calentamiento a 25°C, a una velocidad de agitación de 150 rpm durante 10 minutos. (Cardona, 2019)

**6. Incorporación de los aditivos para la mezcla bioplástica:** Para esta etapa, se emplea los siguientes aditivos como se muestra en la tabla I-3:

**Tabla I-3 Aditivos y funciones para elaborar bioplástico**

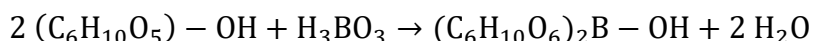
Componente	Función
Glicerina	Forma puentes de hidrógeno con los grupos -OH libres y -O-COCH <sub>3</sub> del almidón modificado. Esto interpone moléculas entre las cadenas poliméricas, rompe interacciones fuertes y proporciona flexibilidad al material final.

Etanol	Actúa como solvente y ayuda a la mezcla y dispersión de los componentes.
Aceite mineral	Lubricante (mejora la procesabilidad, facilitando su manejo y moldeado)
Celocell	Actúa como refuerzo (mejora resistencia a la tracción y módulo), reduce contracción por secado y puede mejorar estructura.
Goma xhantan	Incrementa elasticidad
Ácido bórico	forma complejos con grupos diol de almidón y glicerol, generando enlaces cruzados que aumentan la resistencia mecánica, reducen solubilidad y cambian comportamiento viscoelástico.
Cloruro de sodio	Actúa como estabilizante de la mezcla del almidón, además de ello aumenta las propiedades elásticas ya que su cadena polimérica actúa como fibras de refuerzo.

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El almidón modificado por acetilación aún conserva grupos –OH libres en su estructura. Estos grupos reaccionan con el ácido bórico formando ésteres boroésteres. Ver ecuación I-2.

#### **Ecuación I-2 Reacción química del almidón y ácido bórico**



Se mezclan todos los componentes a una temperatura controlada y agitación constante (25 - 40 min) hasta obtener una pasta viscosa y homogénea. (Cardona, 2019)

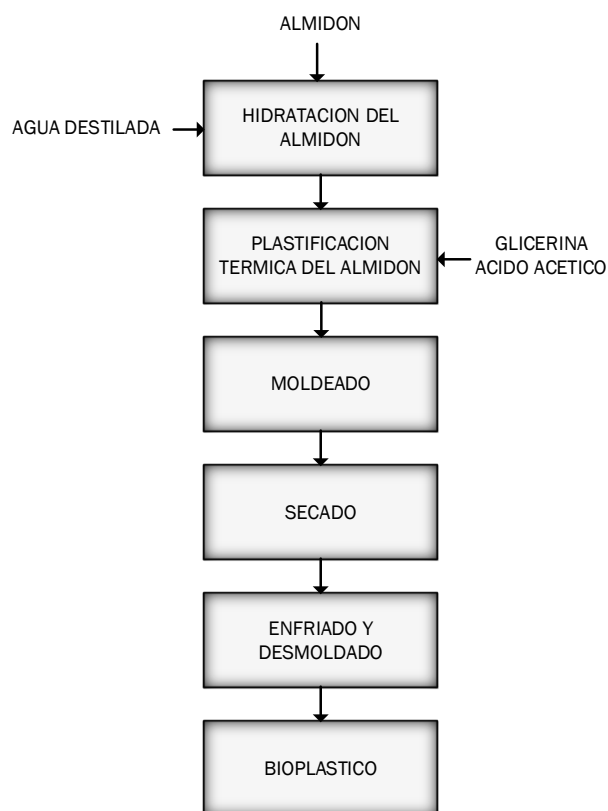
7. **Moldeado:** En esta etapa se busca dar forma al bioplástico mediante moldeo, que consta del vaciado de la pasta en moldes planos. (Cardona, 2019)
8. **Secado:** Posterior al moldeado, se somete a una estufa a una temperatura de 35°C a 12 - 96 h. (Cardona, 2019)

Según la literatura, los hallazgos con este método refieren que los productos obtenidos cumplían con las características físico químicas propias de un plástico. Sin embargo, para este método requieren mayor control con la temperatura, presión, velocidad entre otros y la adquisición de los reactivos se torna sumamente costoso, este método de obtención arroja buenos resultados, pero requieren más tiempo. (Cardona, 2019)

### 1.8.5 Método Casting

A continuación, se muestra el diagrama del método casting en la figura I-10

**Fig. I-10 Diagrama del Método Casting**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

A continuación, se describe el proceso “Método Casting”

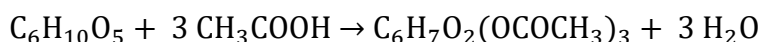
1. **Hidratación del Almidón:** El almidón se mezcla con agua destilada en proporciones específicas, la finalidad de esta etapa es disolver el almidón en agua destilada a temperatura ambiente aproximadamente 20 - 25°C y agitación moderada. Esta etapa es importante ya que, sin una hidratación adecuada, el almidón no interactuaría eficientemente con los plastificantes, lo que resultaría en un material frágil y heterogéneo. (Cajahuamna, 2020)

En esta etapa no ocurre una reacción química irreversible de modificación de la estructura molecular. El proceso es fundamentalmente físico: La hidratación del almidón. (Cajahuamna, 2020)

2. **Plastificación térmica del almidón:** En esta etapa se incorpora glicerina que actúa como un plastificante. Sus grupos hidroxilos (-OH) forman puentes de hidrógeno con los grupos hidroxilos de las cadenas de almidón. Esto interrumpe las interacciones entre las cadenas de almidón, aumenta la flexibilidad y reduce la fragilidad del bioplástico final. (Cajahuamna, 2020)

También se adiciona ácido acético, al calentarse, cataliza la ruptura de los enlaces glicosídicos ( $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6) que unen las moléculas de glucosa en el almidón. Esto reduce el peso molecular del polímero, haciendo la mezcla menos viscosa y más manejable para el moldeado. El ácido acético no solo actúa como catalizador, sino también como reactivo. Puede reaccionar con los grupos hidroxilo (-OH) del almidón para formar ésteres, específicamente acetato de almidón. Este proceso modifica químicamente el polímero, mejorando sus propiedades termoplásticas y reduciendo su retrogradación (endurecimiento). A continuación, se muestra la ecuación química I-3:

#### **Ecuación I-3 Esterificación del almidón con ácido acético**



La mezcla se somete a agitación constante (300 – 600 rpm) y calentamiento controlado (60 – 80°C) durante 15 – 25 minutos. La agitación mecánica asegura una distribución uniforme de los aditivos y evita la sedimentación del almidón. El calor facilita la ruptura total de los gránulos de almidón, formando una red polimérica continua. Como resultado a esta etapa se obtiene una pasta bioplástica. (Cajahuamna, 2020)

#### **Variables a considerar:**

- Temperatura (60 – 80°C): Es el rango óptimo. Por debajo de 60°C, las reacciones (especialmente la esterificación) son demasiado lentas. Por encima de 80°C, se corre el riesgo de una degradación excesiva del polímero (carbonización), desnaturalización de los aditivos y



evaporación acelerada del agua y del ácido acético, lo que altera las proporciones de la formulación.

- **Velocidad de Agitación (150 – 300 rpm):** Es fundamental para la transferencia de calor y masa. Una agitación lenta genera gradientes de temperatura y sedimentación. Una agitación excesiva podría incorporar demasiado aire (atrapamiento de burbujas) en la pasta. La agitación constante y vigorosa durante la etapa de plastificación térmica es crucial para asegurar que cada molécula de almidón esté en contacto con el plastificante. Una distribución inhomogénea creará puntos débiles y puntos quebradizos en el material. (Cajahuamna, 2020)
  - **Tiempo (15 – 25 min):** Determina el grado de avance de las reacciones. Un tiempo insuficiente resultará en una esterificación incompleta, dando lugar a una pasta viscosa y un material final quebradizo y propenso a la retrogradación. Un tiempo excesivo degradará el polímero en exceso, dando como resultado un material débil y quebradizo. (Cajahuamna, 2020)
- 3. Moldeado:** En esta etapa se busca dar forma al bioplástico mediante moldeo, que consta del vaciado de la pasta en moldes planos. (Cajahuamna, 2020)
  - 4. Secado:** Posterior al moldeo, se somete a una estufa a una temperatura de 40°C a 12 - 24 h. (Cajahuamna, 2020)
  - 5. Enfriado y desmoldado:** Tras el secado, el bioplástico se enfría a temperatura ambiente antes de retirarlo del molde. (Cajahuamna, 2020)

De acuerdo a literatura científica respalda el método de casting como una técnica fundamental, sencilla y altamente adaptable para el desarrollo de nuevos materiales bioplásticos. Se agrupan algunas investigaciones que aplicaron este proceso, en las cuales el material obtenido se somete a propiedades físico-químicas donde se obtuvieron resultados favorables. (Cajahuamna, 2020)

## **1.9 Aplicaciones del plástico biodegradable**

### **1.9.1 Envasado de alimentos**

Los plásticos biodegradables se utilizan ampliamente en los envases de alimentos debido a su capacidad para descomponerse de forma natural sin dejar residuos nocivos. Se pueden moldear en diversas formas, como bandejas, contenedores y envoltorios. (Blades, 2020)

### **1.9.2 Embalaje textil**

Los plásticos biodegradables están ganando terreno en los envases textiles, especialmente para prendas y accesorios. Proporcionan durabilidad durante el transporte y almacenamiento. (Blades, 2020)

### **1.9.3 Envases cosméticos**

Los plásticos biodegradables se utilizan cada vez más en envases de cosméticos, incluidos botellas, tubos y frascos. Mantienen la integridad del producto y al mismo tiempo son ecológicos. (Blades, 2020)

### **1.9.4 Dispositivos médicos y productos farmacéuticos**

Los plásticos biodegradables desempeñan un papel en los envases médicos, especialmente para artículos desechables como jeringas, bolsas intravenosas y apósitos para heridas. (Blades, 2020)

## **1.10 Características a considerar para la caracterización del plástico biodegradable**

### **1.10.1 Espesor**

El espesor se define como el grosor o ancho que tiene una capa de material. Esta medida puede ser expresada en diferentes unidades, como milímetros, micrómetros o pulgadas. El espesor puede variar significativamente dependiendo del tipo de material, su forma y su uso previsto. (Baldez, 2023)

En ingeniería el espesor define la resistencia o elasticidad de un material y esto se puede determinar mediante medición directa con micrómetro. El espesor para un plástico biodegradable tiene un rango de 0,010 – 0,200 mm. (Sánchez, 2017).

### 1.10.2 Modulo tensil

El módulo de elasticidad es la razón entre la tensión y la deformación dentro del límite elástico, en el que la deformación es totalmente proporcional a la tensión. Expresa que tan rígido es el material y la habilidad que tiene un trozo de material para resistir la deformación. (Trujillo 2014).

Para determinar este parámetro, se corta la muestra en forma de una probeta, se registra las dimensiones y se mide el espesor con ayuda de un micrómetro digital, luego se utiliza el dilatómetro donde aplica una fuerza de tracción controlada, mide la fuerza y la elongación del material.

El módulo tensil se expresa como la relación entre fuerza ejercida sobre la muestra y el grado de deformación:

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad (\text{Ecuación I-1})$$

**Donde:**

F = fuerza ejercida

L<sub>0</sub> = longitud inicial de la muestra

ΔL = Alargamiento de la muestra

A = Área de la sección transversal de la muestra

De acuerdo a literatura, el módulo tensil óptimo se encuentra en un rango de 0,171 Mpa a 211,638 Mpa.

### 1.10.3 Solubilidad

El estudio de la solubilidad de los polímeros es importante a la hora de especificar su resistencia a determinados ambientes, por su utilización en la fabricación de envases,

recipientes de almacenamiento, así como en aplicaciones en las que el polímero se encuentra en disolución como pinturas, recubrimientos, hilado de fibras, adhesivos, plastificantes. (Galicía, 2014)

La determinación de la solubilidad del plástico biodegradable es una propiedad importante de la película relacionada con el tipo de aplicación y el comportamiento que puede tener cuando se sumerge en agua o cuando entra en contacto con ambientes húmedos.

Para la obtención de este parámetro se corta las láminas de plástico biodegradable en las medidas que requiera el investigador, se seca hasta peso contante en la estufa a 105°C durante 2h. Luego se coloca con una cierta cantidad de agua con agitación constante durante 2 h. Posteriormente se retiran las muestras y se llevan a estufa a 40 °C hasta que esté seco y seguidamente a 105 °C hasta peso constante.

El porcentaje de materia soluble se determina con la siguiente ecuación:

$$\% \text{Solubilidad} = \frac{P_{\text{inicial seco}} - P_{\text{final seco}}}{P_{\text{inicial seco}}} * 100 \quad (\text{Ecuación I-2})$$

**Donde:**

$P_{\text{inicial seco}}$  = Es el peso inicial en seco de la muestra bioplástica

$P_{\text{final seco}}$  = Es el peso final en seco de la muestra bioplástica después de haber sido sumergido en agua y luego secado.

#### **1.10.4 Permeabilidad de vapor de agua**

Se define permeabilidad al vapor de agua como la velocidad de transmisión de vapor de agua por unidad de área del material y por unidad de diferencia de presión entre dos superficies específicas bajo determinadas condiciones de temperatura y humedad (Escobar, 2009).

La permeabilidad de vapor de agua se determina gravimétricamente de acuerdo a la norma ASTM E96. Las láminas de plástico biodegradable se cortan de acuerdo al área que tiene el vaso precipitado, posteriormente se agrega una cierta cantidad de agua destilada al vaso precipitado y las láminas cortadas se colocan encima del vaso

precipitado, asegurando con cinta adhesiva a los bordes. Los vasos precipitados se colocan en un desecador con sílica y se pesa periódicamente para determinar la pérdida de peso del vaso precipitado.

La diferencia de presión de vapor ( $\Delta P$ ) ocurre entre la presión de vapor del entorno donde se encuentra el bioplástico y la presión de vapor en el interior del recipiente de prueba.

La determinación de la permeabilidad de vapor de agua (PVA) se calcula con la siguiente ecuación:

$$PVA = \left( \frac{g}{t} \right) * \frac{e}{A * \Delta P} \quad (\text{Ecuación I-3})$$

**Donde:**

e = es el espesor de las películas

$\Delta P$  = es la diferencia de presión de vapor

A = es el área de permeación

g/t = Viene a ser la tasa de transmisión de vapor de agua que se determina por regresión lineal entre los puntos de pérdida de peso en función del tiempo

### **1.10.5 Biodegradación**

La biodegradabilidad es la acción que tiene un material de descomponerse en dióxido de carbono, metano, agua y componentes orgánicos mediante la ayuda de microorganismos tales como bacterias, hongos y algas. Así mismo un polímero es biodegradable siempre y cuando provenga de fuentes renovables, con la finalidad de que su degradación sea amigable con el medio ambiente. (Menoscal y Rodriguez, 2017).

Para determinar este parámetro se corta la lámina de plástico de acuerdo a las medidas que requiera el investigador. Si el medio es en tierra se coloca a cierta profundidad y se registra cada día el peso del plástico biodegradable. Si el medio es en el ambiente,

las láminas se colocan en recipientes sin tapa y se lo expone al ambiente. Para estos dos medios presentados, se debe registrar el peso cada día.

Si el medio es en agua, se registra el peso inicial de la muestra, se lo sumerge en agua en un recipiente y se debe evitar mover al recipiente con la muestra. Pasado el tiempo, según a los requerimientos del investigador, se lo saca de los recipientes la muestra y se lo seca las muestras plásticas, para posteriormente registrar el peso final.

La determinación de la biodegradabilidad del plástico biodegradable se realiza de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{Pérdida de peso} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}} * 100 \% \quad (\text{Ecuación I-4})$$

**Donde:**

$P_{\text{inicial}}$  = Es el peso inicial de la muestra bioplástica

$P_{\text{final}}$  = Es el peso final de la muestra bioplástica

### **1.11 Estudios previos para la elaboración de plástico biodegradable**

Se cuenta con diversos estudios sobre la elaboración de plástico biodegradable. Si bien algunas publicaciones en revistas no profundizan en el desarrollo experimental, todos los estudios mencionados aportan datos significativos que son útiles para diseñar un procedimiento experimental para la elaboración de plástico biodegradable. En muchos casos, aunque solo se presenta un resumen del estudio, este resulta ser muy puntual y objetivo.

**Bioplásticos a partir de almidón de Yuca:** Se han encontrado muchos beneficios sobre el almidón de yuca y en varios diseños experimentales se ha verificado las características mecánicas y la viabilidad de formar biopelículas en el laboratorio. Se realizó en el 2014 en Colombia, lo interesante e innovador de esta alternativa es que se reforzó la malla molecular de harina de yuca y glicerina con la adición de la fibra de fique. Otro punto para resaltar de este proyecto es que se evaluaron distintas condiciones de temperatura en un total de 7 muestras, con el propósito de encontrar las

condiciones más estables. Dentro de las conclusiones más relevantes se puede mencionar que someter a las películas a condiciones de altas temperaturas, no favorecieron el comportamiento mecánico del material porque, las fibras proteicas del fique al desnaturalizarse produjeron aglomeraciones en la amilasa y en la amilopectina modificando la estructura de la matriz termoplástica. Así mismo se afirmó que en 180°C presentaron los mayores valores en esfuerzo en la Rotura y Modulo elástico (Navia & Bejarano, 2014)

**Bioplásticos de almidón de Maíz:** El objetivo de esta investigación consistió en extraer almidón de los granos de maíz para luego emplearlo con glicerina y ácido acético en la elaboración de una lámina de bioplástico. En primera instancia el maíz se recolectó en la provincia de Manabí, Ecuador. Luego las muestras se trasladaron al laboratorio y se inició la extracción del almidón siguiendo un proceso de varias etapas, para el proceso se tomaron 100 g de maíz. Después de efectuar todo el procedimiento de la extracción de almidón se calculó el porcentaje del rendimiento de la extracción que fue del 5,721 % un valor muy pequeño comparado con otras investigaciones. Para la producción del bioplástico se empleó el método casting, donde se agregaron: 5,721 g de almidón, 17 mL de agua destilada, 1.7 mL de Glicerina, y 3 mL de Ácido Acético al 3%v/v. Por último, se formó una lámina de bioplástico que presentó un alto nivel de degradación con un porcentaje de 89,40% en 42 días (Avellán, 2020).

**Biopolímeros de almidón a partir de semilla de mango:** La investigación que se describirá tuvo lugar en Indonesia, donde semillas de mango simplemente se tratan como un residuo. Como la semilla contiene reservas de macromoléculas en grandes cantidades y además tienen un contenido de almidón que se puede utilizar porque no es un sustituto de alimento básico, se decidió emplearlas para la fabricación de bioplásticos. Los niveles de amilosa en semillas de mango proporcionan propiedades mecánicas óptimas, y los niveles de amilopectina proporcionan pegajosidad. En este estudio, el relleno utilizado fue arcilla y el glicerol actuó como el plastificante (Maulida, 2018).

El almidón derivado de semillas de mango se obtuvo de comerciantes de jugo en Medan, arcilla con tamaño de partícula 10,813  $\mu\text{m}$  y glicerol al 99% se obtuvo de Rudang Jaya Medan. Las semillas de mango (100 gramos). Las semillas de mango ralladas se pelaron y colocaron en batidora. El almidón resultante fue un polvo grisáceo con un tamaño de partícula de malla  $\pm 100$ . El rendimiento de la extracción del almidón obtenido fue del 43,221%, lo que indica que por 100 g de semilla de mango seco se obtienen 43,221 g de almidón. Los bioplásticos con refuerzos de arcilla mejoraron su resistencia a la tracción (5,707 MPa) con respecto a los bioplásticos de almidón puro (1,567 MPa). La mejora de los bioplásticos con refuerzo de arcilla podría atribuirse al fuerte enlace de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de la interfaz de ambos rellenos de arcilla y la matriz de almidón. El bioplástico con la mayor resistencia a la tracción se dosificó con el 6% de arcilla y un 25% de glicerol (Maulida, 2018).

**Bioplástico a partir de la cascara de papa:** La investigación indica que se extrajo el almidón de las cáscaras de papa utilizando un método por vía húmeda, con modificaciones basadas en otros estudios. Se logró un rendimiento de extracción del 8,310 %, considerado satisfactorio. En la elaboración del bioplástico se empleó el método casting, se utilizaron cinco formulaciones para elaborar el bioplástico, basadas en un diseño factorial  $2^2$  (se tomó en cuenta la cantidad de glicerina y ácido acético). La formulación óptima, determinada mediante un análisis sensorial, fue el número uno. Esta formulación contenía 3,95% de glicerina, 3,950 % de ácido acético, 13,160 % de almidón y 78,950 % de agua destilada. Se prepararon muestras con esta formulación y se compararon con bioplásticos elaborados con almidón comercial de papa. Los bioplásticos obtenidos se caracterizaron mediante ensayos físicos, donde cuyos resultados fueron: espesor 0,12 mm, humedad 19,310 %, biodegradabilidad del 29,740 % en compost por un periodo de 15 días y el módulo tensil fue de 7,626 Mpa. (Bravo, 2019)

En la tabla I-4 se presenta un cuadro comparativo de alternativas.



**Tabla I-4 Cuadro comparativo de alternativas**

<b>Almidón</b>	<b>Estudio</b>	<b>Aditivos</b>	<b>Resultados</b>
Yuca	(Navia & Bejarano, 2014)	Glicerina, fibra de fique	La temperatura de 180°C mejoró condiciones mecánicas del material.
Maíz	(Avellán, 2020)	Glicerina, ácido acético	El rendimiento de extracción de almidón fue de 5,721 % y se degradó el 89,40% en 42 días
Semilla de mango	(Maulida, 2018)	Glicerina, arcilla	Extracción del almidón obtenido fue del 43,221%. Los bioplásticos con refuerzos de arcilla mejoraron su resistencia a la tracción 5,707 Mpa
Cáscara de papa	(Bravo, 2019)	Glicerina, ácido acético	El rendimiento de extracción del almidón fue del 8,31%. La formulación óptima contenía 3,950% de glicerina y 3,950% de ácido acético. El bioplástico obtuvo un módulo tensil de 7,626 MPa y una biodegradabilidad del 29,740% en 15 días

**Fuente:** Elaboración propia, 2025

## 1.12 Aspectos ambientales y económicos

### 1.12.1 Aspectos ambientales del plástico biodegradable

- **Reducción de la Contaminación:** El principal beneficio es que estos plásticos se descomponen en el medio ambiente por la acción de microorganismos (bacterias, hongos y algas), transformándose en elementos naturales como agua, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y biomasa (Vásquez, 2016).
- **Fuentes Renovables:** Se fabrican a partir de recursos renovables como almidón de maíz, yuca, caña de azúcar, etc., lo que reduce la dependencia del petróleo (Envaselia, 2024). También señalan que los productos agrícolas naturales son una alternativa para la creación de bioplásticos ecológicos.
- **Reducción de Gases de Efecto Invernadero:** La producción de bioplásticos puede disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta en un 80% en comparación con los plásticos tradicionales, según la Asociación de Industrias de Biotecnología (BIO). Esto contribuye a mitigar el calentamiento global (Venvirotech, 2024).

- **Reducción de la Dependencia del Petróleo:** La producción de bioplásticos se basa en recursos renovables como el almidón de maíz, la caña de azúcar o la celulosa, lo que disminuye la dependencia de los combustibles fósiles, que son recursos no renovables (Envaselia, 2024).
- **Menor Huella de Carbono:** Según la Asociación de Industrias de Biotecnología (BIO), la producción de bioplásticos puede disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta en un 80% en comparación con la de los plásticos tradicionales (Venvirotech, 2024).

#### 1.12.2 Aspectos económicos del plástico biodegradable

- **Reducción de la Dependencia del Petróleo:** La producción de bioplásticos a partir de materias primas renovables (como el almidón de maíz o la caña de azúcar) ayuda a las empresas a reducir su dependencia del petróleo, cuyos precios son volátiles. Esto puede ofrecer mayor estabilidad en los costos de las materias primas a largo plazo (Plasticol, 2024).
- **Demanda del Consumidor:** Hay una creciente tendencia de consumidores que prefieren productos sostenibles y están dispuestos a pagar más por ellos. Las empresas que utilizan plásticos biodegradables pueden aprovechar esta demanda y mejorar su imagen de marca (SPG-Pack, 2023).
- **Innovación y Creación de Empleo:** La creciente industria de los bioplásticos impulsa la investigación y el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías. Esto no solo mejora las propiedades de los productos, sino que también genera oportunidades de negocio y empleo en sectores relacionados, como la biotecnología, la agricultura sostenible y la gestión de residuos (The Food Tech, 2010).
- **Incentivos Gubernamentales y Normativas:** Los gobiernos de muchos países están implementando regulaciones y prohibiciones sobre los plásticos de un solo uso. Esto crea un mercado favorable para los bioplásticos, ya que las empresas pueden evitar sanciones y, en algunos casos, acceder a subvenciones

o incentivos fiscales por adoptar materiales más sostenibles, lo que las hace más competitivas (Envaselia, 2024).

- **Costo del Ciclo de Vida:** Aunque el costo inicial de producción de los bioplásticos es mayor, su uso puede reducir los costos totales del ciclo de vida del producto. Por ejemplo, en aplicaciones agrícolas, los bioplásticos que se descomponen en el suelo pueden eliminar los costos de recolección y gestión de residuos al final de la temporada, ofreciendo un ahorro significativo a los agricultores (Yoigo luz y gas, 2025).

**CAPÍTULO II**  
**MARCO METODOLÓGICO Y PARTE**  
**EXPERIMENTAL**

## **2.1 Introducción marco metodológico y parte experimental**

En este estudio se utilizó un método experimental enfocado en la elaboración de plástico biodegradable a partir de la quinua blanca, permitiendo evaluar variables críticas del proceso, como la temperatura, volumen de ácido acético y volumen de la glicerina. El enfoque experimental fue seleccionado debido a su capacidad para validar el módulo tensil y la calidad del producto obtenido a escala laboratorio.

### **2.1.1 Método de la investigación**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, empleando dos métodos principales: el método experimental y el método documental. Este enfoque permitió analizar de manera objetiva las variables que influyen en el módulo tensil del plástico biodegradable, mediante la recopilación y análisis de datos numéricos obtenidos en laboratorio. El presente trabajo de investigación aplicada “Elaboración de plástico biodegradable a partir de la quinua blanca producida en Bolivia” se realizó, en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias, dependiente de la Carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad “Juan Misael Saracho”.

### **2.1.2 Método experimental (cuantitativo)**

El estudio se basó en un método experimental con enfoque cuantitativo, ya que se realizaron pruebas experimentales preliminares y el desarrollo de los experimentos del diseño factorial, en laboratorio con el propósito de evaluar y optimizar el módulo tensil del plástico biodegradable. Se manipularon distintas variables operacionales, tales como: Temperatura, volumen de ácido acético y volumen de glicerina. El enfoque cuantitativo permitió medir con precisión la influencia de estas variables en el módulo tensil del plástico biodegradable. A través de cálculos matemáticos y análisis estadísticos, se validaron los resultados obtenidos en cada experimento del diseño factorial. El uso de este método facilitó la obtención de datos numéricos precisos, necesarios para optimizar el módulo tensil, la comparación objetiva entre diferentes

condiciones experimentales y la identificación de las condiciones óptimas para mejorar el módulo tensil del plástico biodegradable.

### **2.1.3 Método documental**

De manera complementaria, se utilizó un método documental, el cual consistió en la revisión de literatura científica, normas técnicas y estudios previos relacionados con la elaboración y caracterización del plástico biodegradable. Este método permitió establecer un marco teórico sólido, basado en investigaciones previas, comparar los valores obtenidos experimentalmente con estándares comerciales y justificar la selección de parámetros operacionales, en función de estudios previos y normativas. Esta metodología implicó recopilar, seleccionar, analizar y presentar información coherente proveniente de diversos documentos, como revistas científicas, sitios web, tesis y otros recursos pertinentes. El propósito fue obtener una base de datos precisa y fundamentada sobre proyectos similares enfocados en la elaboración y caracterización del plástico biodegradable, proporcionando así un respaldo científico sólido.

### **2.1.4 Justificación de la metodología**

La combinación del método experimental cuantitativo y el método documental permitió realizar un análisis integral del proceso de elaboración del plástico biodegradable. Mientras que el método experimental proporcionó mediciones precisas sobre el módulo tensil y otras características del plástico biodegradable, el método documental permitió respaldar los resultados con información científica validada. El enfoque cuantitativo de la investigación garantizó que cada resultado fuera medido y analizado con precisión, asegurando la fiabilidad de los datos y su aplicabilidad en la optimización del proceso de elaboración del plástico biodegradable.

## **2.2 Muestreo**

El muestreo es una etapa fundamental para garantizar que la materia prima utilizada en el estudio sea representativa y adecuada para los objetivos de la investigación. En este caso, se empleó un muestreo aleatorio simple, asegurando que cada unidad de quinua

blanca seleccionada tuviera la misma probabilidad de ser elegida, sin sesgos en la selección

### **2.2.1 Procedencia de las muestras**

El universo del estudio está conformado por la quinua blanca cultivadas y comercializadas en Bolivia. La población objetivo para este estudio es la quinua blanca disponible para la venta en el mercado campesino de la ciudad de Tarija. El objetivo del muestreo fue obtener una muestra representativa de la diversidad de quinua blanca, considerando las variaciones de otros departamentos y las posibles diferencias en características físicas y químicas, provenientes de los principales departamentos productores que abastecen el mercado.

### **2.2.2 Estrategia de muestreo aleatorio simple**

Se optó por un muestreo aleatorio simple para la selección de la materia prima. Se realizó un recorrido por el mercado campesino de Tarija, seleccionando puestos de venta de manera uniforme, procurando cubrir diferentes secciones del mercado para abarcar la posible variabilidad. Dentro de cada puesto seleccionado, se eligieron ejemplares de quinua blanca al azar, sin seguir un patrón específico, asegurando así la inclusión de quinua blanca proveniente de Oruro, Potosí y La Paz.

### **2.2.3 Criterios de la selección de la muestra**

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

Los criterios de inclusión fueron:

- **Granos enteros y sin daños aparentes:** Para asegurar la integridad estructural y composicional de la materia prima, vital para procesos homogéneos.
- **Color uniforme característico de la variedad blanca:** Para garantizar la pureza de la variedad y evitar la inclusión de granos de otras cepas o con defectos.

- **Libre de impurezas visibles (tierra, residuos vegetales, etc.):** Para minimizar la interferencia de contaminantes en el proceso de extracción y elaboración del plástico.

Los criterios de exclusión fueron:

- **Presencia de humedad o signos de deterioro:** Para prevenir la degradación de la quinua y asegurar propiedades iniciales estables.
- **Mezcla con otras variedades de quinua o cereales:** Para mantener la especificidad de la materia prima y evitar resultados sesgados por la inclusión de otros componentes.

#### **2.2.4 Tamaño de la muestra**

El tamaño de la muestra se determinó considerando la variabilidad de la quinua blanca en los tres departamentos y los recursos disponibles para el estudio y prueba experimental preliminar. Se seleccionó un total de 2 Kg de quinua blanca por departamento, lo que suma un total de 6 Kg de quinua blanca para el estudio. Este número se considera adecuado para capturar la variabilidad natural del producto y garantizar la precisión de los resultados.

#### **2.2.5 Justificación del muestreo**

El muestreo aleatorio simple fue seleccionado debido a su capacidad para garantizar que la muestra sea representativa de la población de quinua blanca. Este enfoque minimiza los sesgos de selección y permite generalizar los resultados obtenidos. Además, la inclusión de quinua blanca proveniente de tres departamentos diferentes (Oruro, Potosí y La Paz) enriquece el estudio al capturar la variabilidad natural del producto, lo que resulta en conclusiones más robustas y aplicables a diferentes contextos. La selección de un total de 2 Kg de quinua blanca por departamento se justifica por ser un tamaño muestral suficiente para capturar las diferencias departamentales y garantizar la confiabilidad de los resultados, sin exceder los recursos disponibles para la investigación.



### 2.3 Selección del método de proceso para la elaboración de plástico biodegradable

Para la selección del método experimental se pudo evidenciar todos los procesos existentes para elaborar plástico biodegradable de acuerdo a literatura, es por ello que solo se tomó en cuenta dos de ellos, debido a que se cuenta con los equipos y materiales necesarios en el laboratorio de operaciones unitarias (L.O.U) de la carrera de Ingeniería Química, dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, Tarija-Bolivia.

Los procesos se mencionan:

- Proceso por el método con almidón modificado por acetilación (1)
- Proceso por el método casting (2)

En estos procesos de decisión es necesario presentar ventajas y desventajas, para establecer criterios de selección adecuados sin llegar a alterar el proceso. Ver tabla II-1

**Tabla II-1 Ventajas y Desventajas**

Proceso	Ventajas	Desventajas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta resultados fisicoquímicos favorables, puesto que la gelatinización del material aumenta al doble comparada con la del almidón sin modificar (la temperatura de gelatinización normal del almidón es de 60 a</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere una etapa adicional de modificación de la molécula de almidón antes de la obtención de la película plástica.</li> <li>• Proceso que requiere mayores tiempos de producción.</li> <li>• Acceso a reactivos controlados como anhídrido acético, puede ser complicado.</li> </ul>

	<p>72 °C, y con el almidón modificado va de 120 a 140 °C),</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumenta la capacidad de retención de agua y disminuye la deformación del material.</li> <li>• Los productos obtenidos cumplen con las características fisicoquímicas apropiadas</li> <li>• Equipos disponibles en laboratorios comunes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El consumo energético es mayor, debido a que se requiere más tiempo de operación.</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proceso más directo y menos complejo en cuanto a las etapas de la modificación del almidón</li> <li>• Utiliza modificadores químicos que no alteran la estructura del almidón, sino que facilitan la interacción con plastificantes.</li> <li>• Fácil acceso a equipos y reactivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere agitación constante.</li> <li>• Requiere control de la temperatura.</li> <li>• Uso de reactivo controlado que es el ácido acético.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los tiempos de producción son menores y mejora las propiedades del producto final.</li> <li>• Método económico y sencillo.</li> <li>• Equipos disponibles en laboratorios comunes.</li> </ul>	
--	--	--

**Fuente:** Elaboración Propia, 2024

### 2.3.1 Evaluación de métodos y procesos

Para la correcta selección y calificación del proceso a utilizar para la elaboración de plástico biodegradable a partir de la quinua blanca, se efectuó mediante la realización del método de factores ponderados.

Este método realiza un análisis cuantitativo en el que compara las diferentes alternativas, asignando un peso relativo a cada factor fundamental del proceso que refleje su importancia relativa fijando una escala de calificación. Ver tabla II-2

**Tabla II-2 Escala de Calificación del 1-10**

Calificación	Puntuación
<b>Excelente</b>	9-10
<b>Muy buena</b>	7-8
<b>Buena</b>	5-6
<b>Regular</b>	3-4
<b>Mala</b>	0-2

**Fuente:** Elaboración Propia, 2024

Para la determinación de la ponderación de los factores considerados se tomó en cuenta mediante la revisión de literatura de diferentes trabajos de investigación en el cual debe reflejar la importancia relativa de cada factor en el contexto del presente proyecto.

La ponderación de los factores considerados para la elaboración de plástico biodegradable mediante el método casting y método con almidón modificado por acetilación se aprecia en la tabla II-3.

**Tabla II-3 Ponderación de los factores considerados para la elaboración de plástico biodegradable mediante el método clásico y método almidón modificado por acetilación**

<b>Nº</b>	<b>Factor Evaluado</b>	<b>Peso relativo (%)</b>	<b>Comentario</b>
<b>1</b>	Aplicabilidad del proceso	0,3	Por el método de almidón modificado por acetilación se obtiene un producto de buena calidad, pero sin embargo requiere mucho más tiempo para obtener dicho producto, a comparación del método casting los tiempos de producción son menores.
<b>2</b>	Equipos para la elaboración del plástico biodegradable	0,2	Ambos métodos requieren equipos precisos.
<b>3</b>	Costo de inversión inicial	0,25	El método de almidón modificado por acetilación, es más costosa en términos de reactivos. En cambio, en el método casting los costos son menores, debido a que no se emplean muchos reactivos para la obtención de dicho producto.
<b>4</b>	Requerimiento energético	0,05	Para obtener el plástico biodegradable se somete a un calentamiento, por lo tanto, en el proceso de almidón modificado por acetilación requieren más tiempo con el control de la temperatura a comparación con el método casting.
<b>5</b>	Calidad del producto	0,2	Ambos procesos ofrecen un producto de buena calidad según bibliografía.

**Fuente:** Elaboración Propia, 2024

### 2.3.1.1 Calificación de los métodos para la elaboración del plástico biodegradable

La calificación global para cada alternativa se calculó como la suma de las puntuaciones para cada factor ponderado según su peso relativo. Según resultados de la tabla II-4 presentada se observa que el mejor proceso para la obtención del plástico biodegradable es el método clásico con una puntuación de 8,3 puntos.

La matriz de decisión de los métodos para la elaboración de plástico biodegradable se refleja en la tabla II-4.

**Tabla II-4 Matriz de decisión de los métodos para la elaboración de plástico biodegradable**

Nº	Actividades del proceso	Peso relativo (%)	Nota Proceso 1	Ponderado 1	Nota Proceso 2	Ponderado 2
1	Aplicabilidad del proceso	0,3	7	2,1	8	2,4
2	Equipos para la elaboración del plástico biodegradable	0,2	9	1,8	9	1,8
3	Coste de inversión inicial	0,25	5	1,25	7	1,75
4	Requerimiento energético	0,05	6	0,3	7	0,35
5	Calidad del producto	0,2	10	2	10	2
<b>Puntuación final</b>			<b>Total</b>	7,45	<b>Total</b>	8,3

**Fuente:** Elaboración Propia, 2024

Entonces se realizó la obtención del plástico biodegradable por el método casting, debido a que contamos con todos los equipos e insumos necesarios en el laboratorio de operaciones unitarias (L.O.U.) de la carrera de ingeniería química, dependiente de la

facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, Tarija-Bolivia. Con la disponibilidad de los reactivos como es el caso del ácido acético que a pesar de ello cuenta con restricciones para su adquisición, sin embargo, las empresas constituidas pueden adquirir el reactivo, declarando el uso. La glicerina al igual que el agua destilada son accesibles puesto a que estos son de venta libre sin ninguna restricción.


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

La versatilidad en la adaptación del proceso fue otro de los puntos tomados en cuenta, ya que en las distintas etapas del proceso del método casting se tienen cambios en cuanto a su ejecución como se pudo observar en la parte bibliográfica, pudiéndose optar por algunas etapas en los cuales se pueda tener un mayor control de las mismas dando una gran cantidad de opciones a tomar en cuenta y así elegir o formular una técnica que permita una obtención del producto de manera eficiente.

### 2.3.2 Equipos

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

**Tabla II-5 Especificaciones de los equipos utilizados en el desarrollo experimental**


EQUIPO	ESPECIFICACIONES
<p><b>Estufa</b></p> 	<p><b>Modelo:</b> Conterm 2000201  <b>Marca:</b> J.P Selecta S.A.  <b>Rango de temperatura:</b> 30-250 °C  <b>Potencia:</b> 2000 W  <b>Voltaje:</b> 230 V  <b>Frecuencia:</b> 50/60 Hz</p>

EQUIPO	ESPECIFICACIONES
<p><b>Balanza digital</b></p> 	<p> <b>Modelo:</b> EUROPE 500  <b>Marca:</b> Gibertini  <b>Rango de temperatura:</b> 15-30 °C  <b>Peso máximo:</b> 510 g  <b>Peso mínimo:</b> 1 g  <b>Error de precisión:</b> 0,01 g  <b>Voltaje:</b> 220 V  <b>Frecuencia:</b> 50 Hz         </p>

EQUIPO	ESPECIFICACIONES
<p><b>Balanza analítica</b></p> 	<p> <b>Marca:</b> RADWAG  <b>Capacidad máxima:</b> 310 g  <b>Capacidad mínima:</b> 10 mg  <b>Precision:</b> 0,1 mg  <b>Temperatura de trabajo:</b> 10-50°C  <b>Voltaje:</b> 230 V         </p>

EQUIPO	ESPECIFICACIONES
<p><b>Agitador Magnético</b></p> 	<p> <b>Marca:</b> J.P. SELECTA  <b>Potencia:</b> 640 kW  <b>Voltaje:</b> 230 V  <b>Frecuencia:</b> 50-60 Hz  <b>Temperatura máxima:</b> 350°C  <b>RPM:</b> 60-1600  <b>Peso:</b> 3,5 kg         </p>

EQUIPO	ESPECIFICACIONES
<p><b>Tamiz</b></p> 	<p><b>Marca:</b> Orto Alresa  <b>Potencia:</b> 120 W  <b>Rango de partículas:</b> 20<math>\mu</math> a 125 mm  <b>Capacidad:</b> 6 Kg de muestra</p>

EQUIPO	ESPECIFICACIONES
<p><b>Centrífuga</b></p> 	<p><b>Marca:</b> JANETZKI  <b>Potencia:</b> 0,08 kW  <b>Peso:</b> 50Kg  <b>R.P.M:</b> 500-3000</p>

EQUIPO	ESPECIFICACIONES
<p><b>Licuada</b></p> 	<p><b>Marca:</b> OSTER  <b>Modelo:</b> BRLY07-Z00-013  <b>Potencia:</b> 1 kW  <b>Velocidades:</b> 3 velocidades manuales, 2 funciones de pulso y 2 programas automáticos preprogramados (para granizados/frappés y procesador de alimentos).</p>

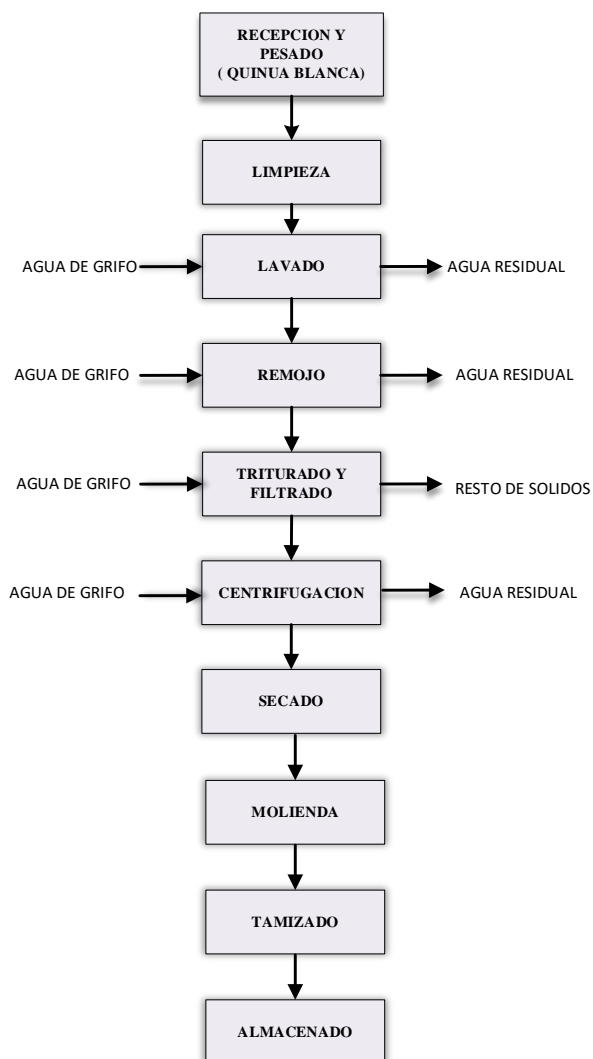
## 2.4 Descripción del proceso de obtención de plástico biodegradable a partir del almidón de quinua blanca

### 2.4.1 Extracción del almidón de la quinua blanca

Para ver el diagrama de flujo de extracción del almidón de la quinua blanca, Ver figura II-1



**Figura II-1 Diagrama de flujo de extracción de almidón de la quinua blanca**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

Se describe a continuación el proceso por etapas:

#### **2.4.1.1 Recepción y pesado**

Se compró la materia prima del Mercado Campesino de la ciudad de Tarija la cual proviene un 33,33% de La Paz, 33,33% de Oruro y 33,33% de Potosí, al comprar la quinua blanca se inspeccionó cuidadosamente para asegurar que esta no se encuentre en mal estado. Se pesó y posteriormente fue transportada a un establecimiento para su posterior procesamiento. Ver fotografía II-1

### **Fotografía II-1 Recepción de la Quinua Blanca**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### **2.4.1.2 Limpieza**

En esta etapa consiste en separar las impurezas (palos, insectos muertos, tierra, etc) de la quinua blanca. Ver fotografía II-2

### **Fotografía II-2 Limpieza de la Quinua Blanca**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### **2.4.1.3 Lavado**

La quinua blanca fue sometida a un proceso de lavado mediante enjuagues sucesivos con agua de grifo. El procedimiento se repitió hasta que el agua residual se observe completamente transparente y se verifique la ausencia total de espuma. Este último criterio se utilizó como indicador cualitativo de la remoción efectiva de las saponinas presentes en la superficie del grano. Ver fotografía II-3

**Fotografía II-3 Lavado**

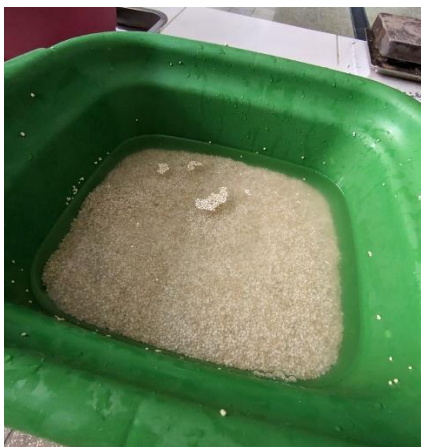


**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### **2.4.1.4 Remojo**

En esta etapa se realiza el ablandamiento de la semilla (quinua blanca) por un periodo de 2 h en agua de grifo, tomando en cuenta que el agua cubra totalmente a la muestra de quinua, facilitando así un mejor ablandamiento de la semilla. Ver fotografía II-4

**Fotografía II-4 Remojo de la Quinua Blanca**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### **2.4.1.5 Triturado y filtrado**

Una vez terminada la etapa de remojo se procede a triturar las semillas de quinua con ayuda de una licuadora por un periodo de 5 min. Posteriormente se procedió a filtrar la

mezcla triturada, a través de un colador cubierto con una tela lienzo con el fin de separar el resto de sólidos de la materia prima. Ver fotografía II-5

#### **Fotografía II-5 Triturado y Filtrado**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### **2.4.1.6 Centrifugación**

Para agilizar la separación del agua y el almidón. La suspensión obtenida del proceso anterior se somete a una centrifugación por 20 min y 3000 rpm. Esta etapa se debe realizar 4 veces hasta que el agua sobrenadante quede totalmente clarificada. Los ciclos de centrifugación múltiples (específicamente, cuatro repeticiones) se realizan para asegurar una separación exhaustiva y completa del almidón del agua. Para la primera repetición la mezcla filtrada obtenida de la anterior etapa, se lo llena a los frascos y se realiza la centrifugación, se quita el agua con impurezas. Para la segunda repetición, se agregó agua de grifo al frasco con el almidón separado, y consecutivamente se realiza la centrifugación. Y así sucesivamente hasta que el agua quede totalmente clarificada.

Cada paso de centrifugación ayuda a eliminar una mayor cantidad de impurezas y el agua restante de la mezcla de almidón. Al repetir el proceso hasta que el agua sobrenadante esté "totalmente clarificada", el objetivo es lograr una mayor pureza del almidón de quinua blanca, asegurando que se elimine la mayor cantidad posible de material no amiláceo del producto final. Ver Fotografía II-6

**Fotografía II-6 Centrifugación**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### **2.4.1.7 Secado**

Es la etapa en donde se busca reducir el contenido de humedad del almidón para lo cual se procede a recoger el sedimentado (almidón) con cuidado en la bandeja y se deja secar en la estufa a 40 °C por un tiempo de 14 h. Concluido el tiempo se lo retira se almacena a temperatura ambiente. Ver fotografía II-7

**Fotografía 2-7 Secado**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### 2.4.1.8 Molienda

La molienda con el mortero tiene como objetivo reducir el tamaño de las partículas hasta el punto en que puedan ser clasificadas con precisión por la serie de tamices, siendo el de 0,063 mm el de menor abertura. Ver fotografía II-8

**Fotografía II-8 Molienda**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### 2.4.1.9 Tamizado

Se procede a tamizar la muestra molida con el fin de obtener un almidón completamente fino. Para ello se coloca la muestra en un tamizador, que contiene bandejas de diferente abertura de malla. El producto final (almidón de quinua blanca) va pasar hasta la última bandeja del tamizador, donde el número de malla es de 0,063 mm. Ver fotografía II-9

**Fotografía II-9 Tamizado**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### **2.4.1.10 Almacenado**

Una vez que se haya realizado el tamizado de la etapa anterior, se procede a almacenar el almidón en bolsas plásticas. Ver fotografía II-10

**Fotografía II-10 Almacenado**

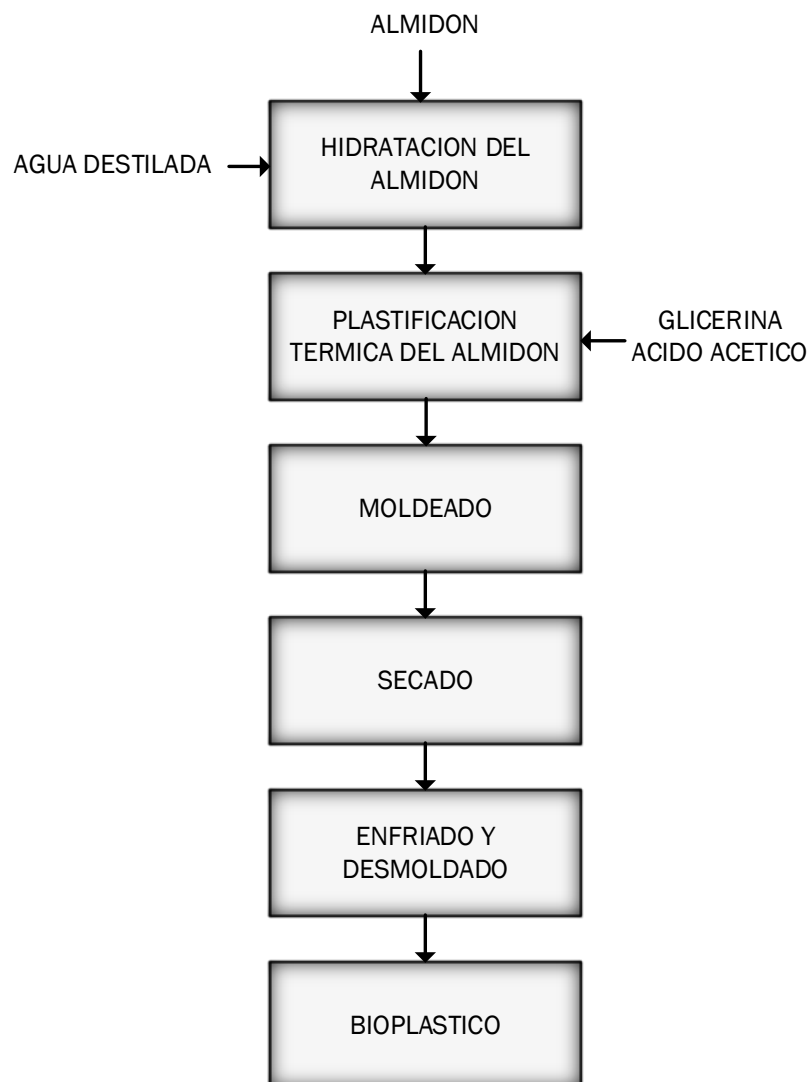


**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### 2.4.2 Proceso de obtención del plástico biodegradable

Obtenido el almidón de quinua blanca se procede a la elaboración del plástico biodegradable descrito en la Figura II-2

**Fig. II-2 Diagrama de flujo de elaboración de plástico biodegradable a partir del almidón de quinua blanca**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

La descripción del proceso por etapas, es descrita a continuación:



#### 2.4.2.1 Recepción y Pesado del Almidón de Quinua Blanca

En la recepción se pesó 40 g del almidón de quinua blanca. Ver fotografía II-11

**Fotografía II-11 Pesado del Almidón de Quinua Blanca**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### 2.4.2.2 Hidratación del almidón

Se mezcla los 40 g de almidón de quinua con 500 mL de agua destilada (hidratante y plastificante), en esta etapa se somete el almidón a una hidratación. Posteriormente se somete la mezcla a un agitador magnético por un periodo de 10 min y a temperatura ambiente 23 °C, esto con la finalidad de que se disuelva bien. Ver fotografía II-12

**Fotografía II-12 Mezcla de Insumos**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### 2.4.2.3 Plastificación térmica del almidón

Adicionar 10 mL de glicerina y 30 mL de ácido acético que tenía una concentración del 99,85%. Durante todo el procedimiento se hace uso de la agitación con calentamiento a 70 °C y 300 rpm durante 25 min para obtener una solución totalmente homogénea. Ver fotografía II-13

**Fotografía II-13 Agitación de la Mezcla**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### 2.4.2.4 Moldeado

Una vez terminada la plastificación térmica del almidón, se procede a verter la mezcla en placas de vidrio, tomando en cuenta que el nivel quede uniforme, el espesor que va tener la mezcla vertida tendrá un espesor de 1 mm, para así tener una buena lámina. Ver fotografía II-14

**Fotografía II-14 Moldeado**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### 2.4.2.5 Secado

Finalmente, se deja secar en estufa a 40° C por un periodo de 12 h, se lo retira y se deja enfriar hasta que la película se pueda desmoldar con facilidad. Ver fotografía II-15

**Fotografía II-15 Secado**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### 2.4.2.6 Enfriado y Desmoldeado

Se lo deja enfriar a temperatura ambiente, una vez que la muestra este totalmente fría se procede a desmoldar la lámina de plástico biodegradable, para su posterior caracterización. Ver fotografía II-16

**Fotografía II-16 Desmoldeado del Plastico Biodegradable**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

#### 2.4.2.7 Almacenado

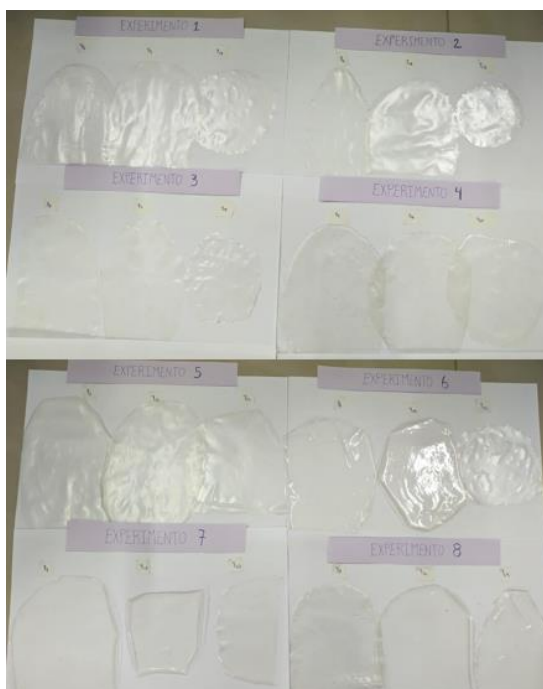
Posteriormente se procede a almacenar el plástico biodegradable obtenido, para su posterior caracterización. Ver fotografía II-17 y fotografía II-18

**Fotografía II-17 Plastico Biodegradable**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

**Fotografía II-18 Experimentos realizados**



**Fuente:** Elaboracion Propia, (2024)

## **2.5 Selección de variables del proceso experimental**

La elaboración del plástico biodegradable es un proceso altamente influenciado por la temperatura, glicerina y ácido acético. Estas variables son fundamentales para el éxito del proceso y deben ser cuidadosamente controladas y ajustadas para obtener un módulo tensil óptimo.

Estas variables están interrelacionadas y su selección y ajuste deben ser meticulosos para obtener los mejores resultados. Es crucial llevar a cabo un diseño experimental que permita explorar diferentes niveles de temperatura, volumen de glicerina y volumen de ácido acético, con el fin de determinar las condiciones óptimas para la elaboración del plástico biodegradable con las características deseadas.

El control y la comprensión de estas variables son fundamentales para garantizar su reproducibilidad y calidad del producto final en este proceso.

### **2.5.1 Desarrollo de las pruebas preliminares**

Se realizaron pruebas preliminares para determinar el nivel (0) recomendado y así identificar los límites superiores e inferiores de las variables de temperatura, volumen de glicerina y volumen de ácido acético.

Las variables de operación que se emplean en la elaboración de plástico biodegradable a partir de la quinua blanca son:

- Temperatura
- Glicerina
- Ácido acético

Para cada variable se identificó el punto más alto (nivel 0), para así identificar los límites tanto inferior como superior en los experimentos según el diseño factorial.

Para determinar el punto más alto que viene a ser el nivel (0) de las variables independientes se realizaron pruebas preliminares, donde se utilizó 40 g de almidón de la quinua blanca y 500 mL de agua destilada.

### 2.5.2 Variable temperatura

En este trabajo de investigación se hizo la revisión bibliográfica, donde se indica que el rango de temperatura para la obtención del plástico biodegradable ocurre entre los 60 - 72°C. En el laboratorio de operaciones unitarias de la carrera de Ingeniería Química, dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, Tarija-Bolivia. Se realizaron las pruebas preliminares para identificar el nivel (0) para así identificar el límite inferior y superior de la variable independiente temperatura, el cual se realizó manteniendo constante tanto la glicerina como el ácido acético, obteniendo los siguientes datos, Ver tabla II-6

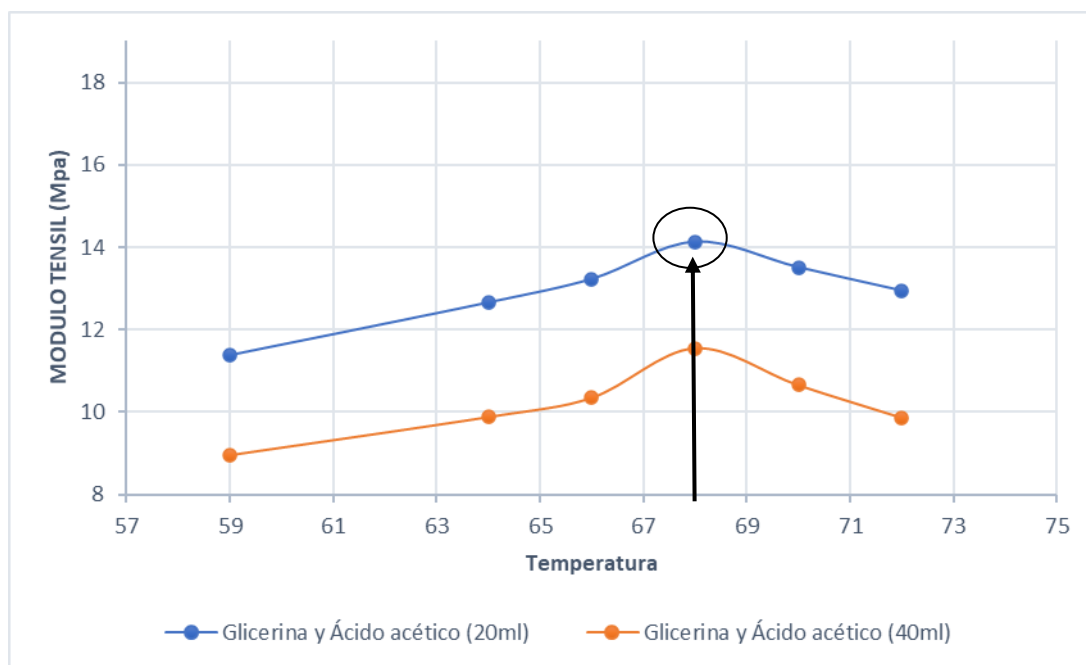
**Tabla II-6 Variable temperatura**

	<b>Glicerina y Ácido acético (20 mL)</b>	<b>Glicerina y Ácido acético (40 mL)</b>
<b>T(°C)</b>	<b>Modulo tensil (Mpa)</b>	<b>Modulo tensil (Mpa)</b>
59	11,378	8,956
64	12,656	9,882
66	13,225	10,347
68	14,128	11,551
70	13,512	10,656
72	12,946	9,866

**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

Se puede visualizar como varía el módulo tensil del plástico biodegradable a partir de la quinua blanca respecto a diferentes temperaturas. Como se puede observar a una temperatura de 59 °C se obtiene un bajo módulo tensil, debido que a bajas temperaturas el material se hace menos rígido. Además, se puede visualizar que a temperaturas elevadas 72°C puede provocar una reducción drástica de las propiedades físicas, una pérdida completa de rigidez o una degradación térmica severa, lo que impacta negativamente su módulo de tracción y vida útil. En la figura II-3 siguiente se observó con más claridad como varía el módulo tensil del plástico biodegradable a diferentes valores de temperatura.

**Fig. II-3 Variación del módulo tensil frente a la temperatura**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

En la figura II-3 se puede observar el punto más alto que fue de 14,128 Mpa que fue obtenido a una temperatura de 68°C, donde viene a ser el nivel (0) entonces se puede identificar que el límite inferior es de 66°C y límite superior de 70°C.

### 2.5.3 Variable Ácido acético

Es una variable independiente para la investigación por lo que, según bibliografía el ácido acético viene a ser un factor relevante para la obtención del plástico biodegradable, ya que le aporta resistencia al plástico biodegradable y a que no sea quebradiza dicho producto. Se realizaron pruebas preliminares para determinar el nivel (0) para así identificar el límite superior e inferior del ácido acético, en el cual se mantuvo constante las demás variables (Temperatura y glicerina), obteniendo los siguientes datos que se muestran en la siguiente tabla II-7

**Tabla II-7 Variable ácido acético**

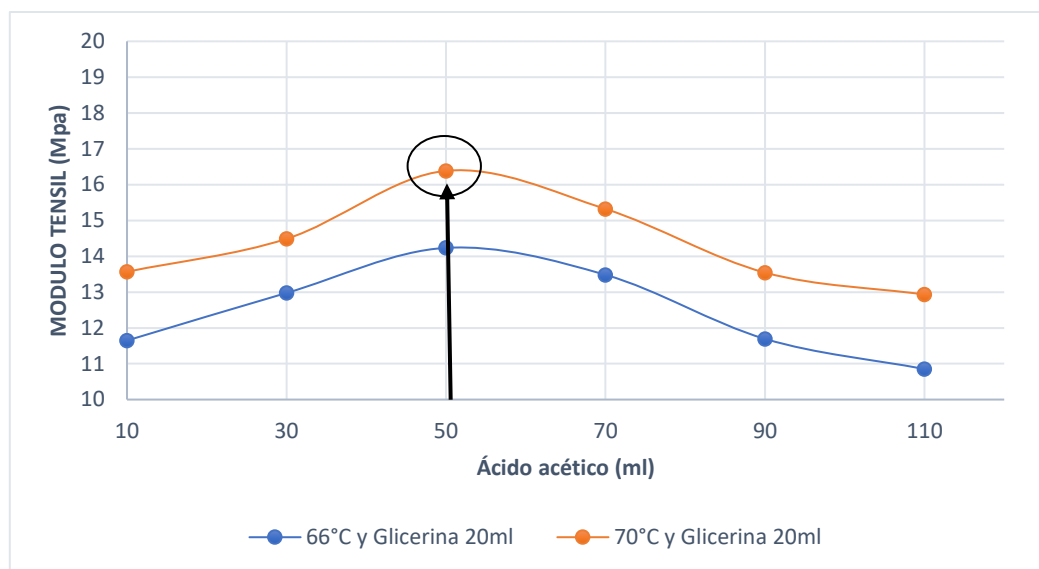
<b>Ácido acético (ml)</b>	<b>66°C y Glicerina 20mL</b>	<b>70°C y Glicerina 20mL</b>
	<b>Módulo tensil (Mpa)</b>	<b>Módulo tensil (Mpa)</b>
10	11,648	13,567
30	12,976	14,486
50	14,235	16,385
70	13,482	15,321
90	11,694	13,545
110	10,852	12,932

**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

Se puede observar cómo varía el módulo tensil del plástico biodegradable respecto a distintas cantidades de ácido acético. Como se puede observar que a cantidades muy bajas no logra modificar adecuadamente el material para alcanzar su máxima rigidez, mientras que un exceso de las cantidades de ácido acético puede ablandarlo o debilitarlo, resultando una disminución del módulo tensil. Según los valores obtenidos se pudo identificar el nivel (0) el punto más alto que fue de 16,385 Mpa que se obtuvo con una cantidad de 50 mL de ácido acético, entonces se puede identificar que el límite inferior es de 30 mL y límite superior de 70 mL.

Para observar con más claridad como varia el módulo tensil del plástico biodegradable a diferentes cantidades de ácido acético, el cual se muestra en la siguiente figura II-4.



**Fig. II-4 Variable ácido acético**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

#### 2.5.4 Variable Glicerina

Es una variable independiente para la investigación, según bibliografía consultada la glicerina le aporta suavidad y flexibilidad al plástico biodegradable. Por lo que, un aumento de las cantidades de glicerina, la flexibilidad aumenta y por ende el módulo tensil disminuye.

Para identificar el nivel (0) con el fin de establecer el límite inferior y superior del parámetro se realizaron pruebas preliminares de igual forma que las anteriores variables. A continuación, en la tabla se muestran los datos obtenidos en la tabla II-8

**Tabla II-8 Variable glicerina**

Glicerina (ml)	70°C y Ac. Acético 30mL	70°C y Ac. Acético 70mL
	Módulo tensil (Mpa)	Módulo tensil (Mpa)
10	14,651	12,861
15	14,984	12,770
20	14,461	12,424
25	13,673	11,752
30	13,245	11,443
35	12,870	10,960

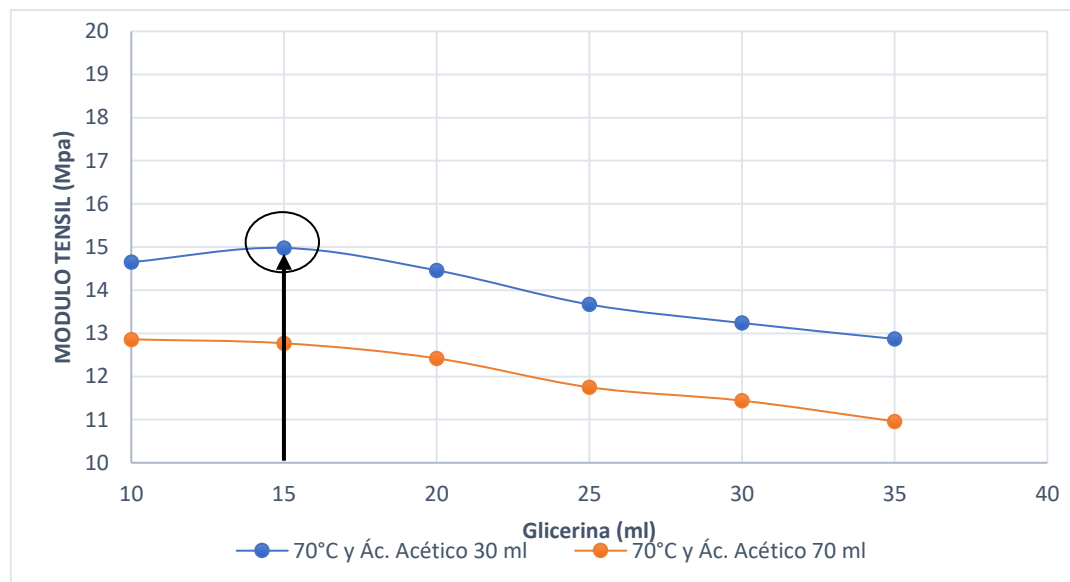
**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

Se puede observar cómo varía el módulo tensil del plástico biodegradable respecto a distintas cantidades de la glicerina. Como se puede observar que a cantidades bajas de la glicerina el módulo tensil es alto, mientras que el incremento en la cantidad de la glicerina disminuye las fuerzas intermoleculares entre las moléculas del almidón separando las cadenas, tales como los puentes de hidrogeno disminuyendo así el módulo tensil.

Según los valores obtenidos se pudo identificar el nivel (0) el punto más alto que fue de 14,984 Mpa que se obtuvo con una cantidad de 15 mL de glicerina, entonces se puede identificar que el límite inferior es de 10 mL y límite superior de 20 mL.

Para observar con más claridad como varia el módulo tensil del plástico biodegradable a diferentes cantidades de glicerina, el cual se muestra en la siguiente figura II-

**Figura II-5 Variable Glicerina**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

Por lo tanto, una vez culminadas las pruebas preliminares se determinaron los limites óptimos para el diseño experimental para la elaboración de plástico biodegradable a partir de la quinua blanca, los cuales son los siguientes:

- Variable temperatura (66 – 70°C)
- Variable glicerina (10 – 20 mL)
- Variable ácido acético (30 – 70 mL)

Un control preciso de esta variable permite optimizar el proceso de producción y garantizar la calidad del producto final

➤ **Variable dependiente**

- Modulo Tensil (Mpa)

➤ **Variables independientes**

- Glicerina (mL)
- Temperatura (°C)
- Ácido acético (mL)

## 2.6 Diseño Experimental

El diseño experimental es una técnica estadística, que tiene por objetivo definir el número de pruebas que se van a realizar en una investigación manipulando dos o más variables independientes del sujeto de estudio y según esto observar los cambios que se producen en la variable respuesta. El objetivo de un diseño experimental es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores.

Conocidas las variables manipulables, se procede a diseñar un modelo experimental que ayude a mejorar las condiciones de calidad de los plásticos biodegradables obtenidos, de tal forma que se emplea un diseño factorial  $2^k$ , K corresponde al número de factores significativos que intervienen en el proceso, con dos niveles a tomar en cuenta. Los factores se evalúan en dos niveles: Nivel o valor alto (+) y nivel o valor bajo (-). Se planteó un diseño factorial  $2^k$  que corresponde a un modelo  $2^3$  con 3 réplicas haciendo un total de 24 experimentos.

El modelo del experimento será:  $2^3$

El número de experiencias será:  $2^3 = 8$

El número de experimentos totales será:  $2^3 * 3 = 24$  experimentos.

Para la obtención de plástico biodegradable, se tomaron las siguientes variables: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), volumen de ácido acético (mL) y volumen de glicerina (mL).

Estas variables pueden condicionar a las variables respuesta del plástico biodegradable, que viene a ser el módulo tensil.

Los factores y dominio experimental se pueden apreciar en la tabla II-9 y la matriz de experimentos en la tabla II-10.

**Tabla II-9 Factores y dominio experimental**

Factores	Nivel (-)	Nivel (0)	Nivel (+)	Variable respuesta
Temperatura (°C)	66	68	70	Módulo Tensil (Mpa)
Glicerina (mL)	10	15	20	
Ácido Acético (mL)	30	50	70	

**Fuente:** Elaboración Propia, (2024)

**Tabla II-10 Matriz de Experimentos**

N°	Matriz de experimentos			Plan de experimentación		
	Factor A	Factor B	Factor C	Temperatura (°C)	Glicerina (mL)	Ac. Acético (mL)
1	-	-	-	66	10	30
2	+	-	-	70	10	30
3	-	+	-	66	20	30
4	+	+	-	70	20	30
5	-	-	+	66	10	70
6	+	-	+	70	10	70
7	-	+	+	66	20	70
8	+	+	+	70	20	70

**Fuente:** Elaboración Propia, (2024)

A partir de este punto se les da una codificación a las muestras para la obtención del plástico biodegradable a partir de la quinua blanca en la tabla II-11.

**Tabla II-11 Codificación de los experimentos de obtención del plástico biodegradable a partir de la quinua blanca**

Muestra	Plan de Experimentación		
	Temperatura (°C)	Glicerina (mL)	Ac. Acético (mL)
Y1	66	10	30
Y2	70	10	30
Y3	66	20	30
Y4	70	20	30
Y5	66	10	70
Y6	70	10	70
Y7	66	20	70
Y8	70	20	70
Y9	66	10	30
Y10	70	10	30
Y11	66	20	30
Y12	70	20	30
Y13	66	10	70
Y14	70	10	70
Y15	66	20	70
Y16	70	20	70
Y17	66	10	30
Y18	70	10	30
Y19	66	20	30
Y20	70	20	30
Y21	66	10	70
Y22	70	10	70
Y23	66	20	70
Y24	70	20	70

Réplica 1

Réplica 2

Réplica 3

**Fuente:** Elaboración propia, 2024

## 2.7 Recolección de datos

La recopilación de datos es una etapa clave en el desarrollo de la investigación, ya que permite obtener la información necesaria para analizar el efecto de las variables seleccionadas sobre el módulo tensil del plástico biodegradable. En esta sección, se

detalla el procedimiento para recopilar datos de los experimentos del diseño factorial, incluyendo las repeticiones correspondientes.

### 2.7.1 Recopilación de datos en la plastificación térmica del almidón

Se preparó la mezcla a partir de 40 g de almidón de quinua blanca con 500 mL de agua destilada, se realizó la agitación por 10 min a temperatura ambiente. Posteriormente se sometió a una agitación con calentamiento a 300 rpm por 25 min a distintos valores de temperatura y se adicionaron distintas cantidades de glicerina y ácido acético, tal como se detalla en el diseño experimental de la tabla II-11. A continuación, se muestra los datos de la plastificación térmica del almidón en la tabla II-12.

**Tabla II-12 Datos en la plastificación térmica del almidón**

Muestra	Almidon (g)	Agua dest. (mL)	Glicerina (mL)	Ac. Acetico (mL)	Mezcla Evaporada (g)	Mezcla plastica (g)	T(°C)
Y1	40,000	500,000	10,000	30,000	11,770	572,330	66
Y2	40,000	500,000	10,000	30,000	13,380	570,720	70
Y3	40,000	500,000	20,000	30,000	12,860	583,840	66
Y4	40,000	500,000	20,000	30,000	13,940	582,760	70
Y5	40,000	500,000	10,000	70,000	13,760	612,340	66
Y6	40,000	500,000	10,000	70,000	16,690	609,410	70
Y7	40,000	500,000	20,000	70,000	15,440	623,260	66
Y8	40,000	500,000	20,000	70,000	16,820	621,880	70
Y9	40,000	500,000	10,000	30,000	11,480	572,620	66
Y10	40,000	500,000	10,000	30,000	12,870	571,230	70
Y11	40,000	500,000	20,000	30,000	14,330	582,370	66
Y12	40,000	500,000	20,000	30,000	15,260	581,440	70
Y13	40,000	500,000	10,000	70,000	12,840	613,260	66
Y14	40,000	500,000	10,000	70,000	14,680	611,420	70
Y15	40,000	500,000	20,000	70,000	16,290	622,410	66
Y16	40,000	500,000	20,000	70,000	17,840	620,860	70
Y17	40,000	500,000	10,000	30,000	11,180	572,920	66
Y18	40,000	500,000	10,000	30,000	12,690	571,410	70
Y19	40,000	500,000	20,000	30,000	13,350	583,350	66
Y20	40,000	500,000	20,000	30,000	14,930	581,770	70
Y21	40,000	500,000	10,000	70,000	13,370	612,730	66
Y22	40,000	500,000	10,000	70,000	14,440	611,660	70
Y23	40,000	500,000	20,000	70,000	15,860	622,840	66
Y24	40,000	500,000	20,000	70,000	19,030	619,670	70

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

### 2.7.2 Recopilación de datos en el moldeo, secado, enfriado y desmoldado

La mezcla plástica se lo vertió sobre láminas de vidrio y los restos que quedaba en el vaso precipitado se registraron los datos de masa, donde mostraron valores consistentemente bajos, lo que sugiere un proceso de moldeo eficiente. Posteriormente, la mezcla plástica moldeada se secó en una estufa durante 12 horas a 40°C. Una vez finalizada la etapa de secado, el plástico biodegradable se enfrió para poder retirarlo de las láminas de vidrio. Los datos registrados en las pérdidas por desmoldeo reflejan la cantidad de material que se pierde al retirar el plástico del molde. Al igual que las pérdidas en el moldeo, estas son mínimas, lo que indica un desmoldeo limpio y eficiente. A continuación, se muestra la tabla II-13

**Tabla II-13 Datos de moldeo, secado, enfriado y desmoldado**

Muestra	Perdidas en el moldeo (g)	Plastico moldeado (g)	Plastico seco (g)	Perdidas en el desmoldado (g)	Plastico biodegradable (g)
Y1	18,100	554,230	72,110	1,090	71,020
Y2	20,370	550,350	70,650	0,910	69,740
Y3	22,200	561,640	73,690	0,940	72,750
Y4	20,390	562,370	73,590	1,170	72,420
Y5	18,720	593,620	77,200	0,990	76,210
Y6	14,930	594,480	75,880	0,940	74,940
Y7	18,710	604,550	78,250	0,530	77,720
Y8	18,340	603,540	77,990	0,960	77,030
Y9	18,990	553,630	71,310	1,060	70,250
Y10	19,760	551,470	70,900	0,970	69,930
Y11	22,560	559,810	74,280	1,020	73,260
Y12	17,960	563,480	72,850	1,010	71,840
Y13	18,970	594,290	76,290	0,980	75,310
Y14	14,750	596,670	77,490	0,930	76,560
Y15	20,790	601,620	77,630	0,880	76,750
Y16	17,000	603,860	78,240	0,910	77,330
Y17	10,800	562,120	70,780	1,010	69,770
Y18	20,860	550,550	70,160	0,950	69,210
Y19	23,720	559,630	74,030	1,050	72,980
Y20	18,410	563,360	73,400	1,080	72,320
Y21	17,589	595,141	76,600	0,950	75,650
Y22	15,917	595,743	74,920	0,970	73,950
Y23	18,670	604,170	77,470	0,640	76,830
Y24	17,110	602,560	76,910	0,840	76,070

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025



### 2.7.3 Recopilación de datos del módulo tensil del plástico biodegradable

El procedimiento constó, en cortar las muestras plásticas en forma de probeta, donde sus dimensiones eran de 10 mm de ancho por 20 mm de largo. Se midió el espesor de cada probeta con ayuda de un micrómetro digital y se calculó el área de la probeta, los datos obtenidos se observan en la tabla II-14. Se empleó el dilatómetro a una altura estable, se colocan las probetas, sujetándolas a un extremo de un gancho. El otro extremo del gancho se conecta a un balde. Se coloca una regla en el borde del balde para estabilizar el dilatómetro. Una vez que el equipo está estable, se comienza a agregar agua al balde para aplicar peso. La lectura se registra cuando la aguja del dilatómetro se estabiliza. Este proceso de añadir peso y registrar la lectura se repite hasta que el material de la probeta se rompe. Para ver los datos registrados, se detallan en la tabla II-15, tabla II-16, tabla II-17, tabla II-18, tabla II-19, tabla II-20, tabla II-21 y tabla II-22

**Tabla II-14 Datos de espesor y área**

Muestra	Espesor (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Area (m <sup>2</sup> )
Y1	0,163	1,628	1,63 x10 <sup>-6</sup>
Y9	0,172	1,722	1,72 x10 <sup>-6</sup>
17	0,113	1,128	1,13 x10 <sup>-6</sup>
Y2	0,171	1,712	1,71 x10 <sup>-6</sup>
Y10	0,122	1,224	1,22 x10 <sup>-6</sup>
Y18	0,167	1,67	1,67 x10 <sup>-6</sup>
Y3	0,143	1,43	1,43 x10 <sup>-6</sup>
Y11	0,204	2,042	2,04 x10 <sup>-6</sup>
Y19	0,075	0,752	7,52 x10 <sup>-7</sup>
Y4	0,197	1,966	1,97 x10 <sup>-6</sup>
Y12	0,210	2,104	2,10 x10 <sup>-6</sup>
Y20	0,193	1,932	1,93 x10 <sup>-6</sup>
Y5	0,156	1,56	1,56 x10 <sup>-6</sup>
Y13	0,170	1,702	1,70 x10 <sup>-6</sup>
Y21	0,157	1,574	1,57 x10 <sup>-6</sup>
Y6	0,159	1,588	1,59 x10 <sup>-6</sup>
Y14	0,192	1,918	1,92 x10 <sup>-6</sup>
Y22	0,139	1,392	1,39 x10 <sup>-6</sup>

<b>Y7</b>	0,210	2,102	$2,10 \times 10^{-6}$
<b>Y15</b>	0,238	2,378	$2,38 \times 10^{-6}$
<b>Y23</b>	0,196	1,962	$1,96 \times 10^{-6}$
<b>Y8</b>	0,188	1,876	$1,88 \times 10^{-6}$
<b>Y16</b>	0,268	2,678	$2,68 \times 10^{-6}$
<b>Y24</b>	0,287	2,866	$2,87 \times 10^{-6}$

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Tabla II-15 Datos del modulo tensil del plastico biodegradable**

<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>ΔL (mm)</b>	<b>Esfuerzo (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformacion</b>	<b>%Elong .</b>	<b>Modulo tensil (Mpa)</b>
<b>Y1</b>							
125	0,125	1,226	0,070	0,753	0,004	0,350	215,207
162	0,162	1,589	0,100	0,976	0,005	0,500	195,236
232	0,232	2,276	0,240	1,398	0,012	1,200	116,499
326	0,326	3,198	1,270	1,964	0,064	6,350	30,936
367	0,367	3,600	1,480	2,211	0,074	7,400	29,885
398	0,398	3,904	1,640	2,398	0,082	8,200	29,247
486	0,486	4,768	2,460	2,929	0,123	12,300	23,809
547	0,547	5,366	2,890	3,296	0,145	14,450	22,810
593	0,593	5,817	3,320	3,573	0,166	16,600	21,526
610	0,610	5,984	3,400	3,676	0,170	17,000	21,622
<b>Y9</b>							
125	0,125	1,226	0,070	0,712	0,004	0,350	203,459
185	0,185	1,815	0,100	1,054	0,005	0,500	210,784
238	0,238	2,335	0,350	1,356	0,018	1,750	77,477
310	0,310	3,041	1,120	1,766	0,056	5,600	31,536
355	0,355	3,483	1,380	2,022	0,069	6,900	29,310
435	0,435	4,267	1,750	2,478	0,088	8,750	28,322
512	0,512	5,023	2,400	2,917	0,120	12,000	24,307
565	0,565	5,543	2,900	3,219	0,145	14,500	22,198
631	0,631	6,190	3,320	3,595	0,166	16,600	21,655
658	0,658	6,455	3,500	3,749	0,175	17,500	21,420
<b>Y17</b>							
126	0,126	1,236	0,070	1,096	0,004	0,350	313,085
155	0,155	1,521	0,350	1,348	0,018	1,750	77,029
193	0,193	1,893	0,700	1,678	0,035	3,500	47,957
230	0,230	2,256	1,120	2,000	0,056	5,600	35,719
258	0,258	2,531	1,300	2,244	0,065	6,500	34,520
285	0,285	2,796	1,580	2,479	0,079	7,900	31,375
312	0,312	3,061	1,790	2,713	0,090	8,950	30,317
360	0,360	3,532	2,150	3,131	0,108	10,750	29,124
405	0,405	3,973	2,730	3,522	0,137	13,650	25,804
464	0,464	4,552	3,600	4,035	0,180	18,000	22,418

Fuente: Elaboracion propia, 2025

**Tabla II-16 Datos del módulo tensil del plástico biodegradable**

Peso (g)	Peso (kg)	Fuerza (N)	$\Delta L$ (mm)	Esfuerzo (N/mm <sup>2</sup> )	Deformacion	%Elong .	Modulo tensil (Mpa)
<b>Y2</b>							
150	0,150	1,472	0,050	0,860	0,003	0,250	343,808
243	0,243	2,384	0,876	1,392	0,044	4,380	31,791
318	0,318	3,120	1,240	1,822	0,062	6,200	29,390
387	0,387	3,796	1,850	2,218	0,093	9,250	23,974
486	0,486	4,768	2,250	2,785	0,113	11,250	24,754
567	0,567	5,562	2,610	3,249	0,131	13,050	24,896
633	0,633	6,210	2,945	3,627	0,147	14,725	24,633
682	0,682	6,690	3,162	3,908	0,158	15,810	24,718
768	0,768	7,534	3,433	4,401	0,172	17,165	25,638
815	0,815	7,995	3,880	4,670	0,194	19,400	24,072
<b>Y10</b>							
150	0,150	1,472	0,050	1,202	0,003	0,250	480,882
234	0,234	2,296	0,850	1,875	0,043	4,250	44,128
275	0,275	2,698	1,220	2,204	0,061	6,100	36,132
334	0,334	3,277	1,690	2,677	0,085	8,450	31,679
412	0,412	4,042	2,060	3,302	0,103	10,300	32,059
456	0,456	4,473	2,480	3,655	0,124	12,400	29,473
495	0,495	4,856	2,740	3,967	0,137	13,700	28,958
533	0,533	5,229	2,830	4,272	0,142	14,150	30,190
568	0,568	5,572	3,320	4,552	0,166	16,600	27,424
621	0,621	6,092	3,740	4,977	0,187	18,700	26,616
<b>Y18</b>							
150	0,150	1,472	0,050	0,883	0,003	0,250	353,301
245	0,245	2,403	0,755	1,443	0,038	3,775	38,216
315	0,315	3,090	1,200	1,855	0,060	6,000	30,914
395	0,395	3,875	1,770	2,326	0,089	8,850	26,281
478	0,478	4,689	2,100	2,815	0,105	10,500	26,806
566	0,566	5,552	2,450	3,333	0,123	12,250	27,207
620	0,620	6,082	2,720	3,651	0,136	13,600	26,844
695	0,695	6,818	3,100	4,092	0,155	15,500	26,403
772	0,772	7,573	3,450	4,546	0,173	17,250	26,353
846	0,846	8,299	3,800	4,982	0,190	19,000	26,219

Fuente: Elaboracion propia, 2025

**Tabla II-17 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable**

<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>ΔL (mm)</b>	<b>Esfuerzo (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformacion</b>	<b>%Elong.</b>	<b>Modulo tensil (Mpa)</b>
<b>Y3</b>							
135	0,135	1,324	0,040	0,926	0,002	0,200	463,059
182	0,182	1,785	1,000	1,249	0,050	5,000	24,971
241	0,241	2,364	1,500	1,653	0,075	7,500	22,044
283	0,283	2,776	1,700	1,941	0,085	8,500	22,840
342	0,342	3,355	2,200	2,346	0,110	11,000	21,329
393	0,393	3,855	2,620	2,696	0,131	13,100	20,580
431	0,431	4,228	3,000	2,957	0,150	15,000	19,711
473	0,473	4,640	3,530	3,245	0,177	17,650	18,384
502	0,502	4,925	3,890	3,444	0,195	19,450	17,706
545	0,545	4,920	4,250	3,441	0,213	21,250	16,191
<b>Y11</b>							
135	0,135	1,324	0,600	0,649	0,030	3,000	21,619
216	0,216	2,119	1,050	1,038	0,053	5,250	19,765
268	0,268	2,629	1,480	1,288	0,074	7,400	17,399
312	0,312	3,061	1,650	1,499	0,083	8,250	18,168
376	0,376	3,689	2,000	1,806	0,100	10,000	18,063
412	0,412	4,042	2,300	1,979	0,115	11,500	17,211
457	0,457	4,483	2,750	2,195	0,138	13,750	15,967
519	0,519	5,091	3,150	2,493	0,158	15,750	15,831
565	0,565	5,543	3,528	2,714	0,176	17,640	15,387
632	0,632	6,200	4,400	3,036	0,220	22,000	13,801
<b>Y19</b>							
135	0,135	1,324	0,100	1,761	0,005	0,500	352,221
196	0,196	1,923	1,100	2,557	0,055	5,500	46,488
235	0,235	2,305	1,750	3,066	0,088	8,750	35,036
248	0,248	2,433	2,100	3,235	0,105	10,500	30,812
256	0,256	2,511	2,300	3,340	0,115	11,500	29,040
267	0,267	2,619	2,450	3,483	0,123	12,250	28,433
286	0,286	2,806	3,100	3,731	0,155	15,500	24,071
312	0,312	3,061	3,500	4,070	0,175	17,500	23,258
346	0,346	3,394	4,200	4,514	0,210	21,000	21,494
367	0,367	3,600	4,650	4,788	0,233	23,250	20,592

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Tabla II-18 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable**

<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>ΔL (mm)</b>	<b>Esfuerzo (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformacion</b>	<b>%Elong.</b>	<b>Modulo tensil (Mpa)</b>
<b>Y4</b>							
140	0,140	1,373	0,400	0,699	0,020	2,000	34,929
205	0,205	2,011	0,880	1,023	0,044	4,400	23,248
262	0,262	2,570	1,150	1,307	0,058	5,750	22,736
337	0,337	3,306	1,740	1,682	0,087	8,700	19,328
394	0,394	3,865	2,220	1,966	0,111	11,100	17,712
467	0,467	4,581	2,740	2,330	0,137	13,700	17,009
566	0,566	5,552	3,310	2,824	0,166	16,550	17,065
645	0,645	6,327	3,730	3,218	0,187	18,650	17,257
726	0,726	7,122	4,120	3,623	0,206	20,600	17,586
793	0,793	7,779	4,560	3,957	0,228	22,800	17,355
<b>Y12</b>							
140	0,140	1,373	0,400	0,653	0,020	2,000	32,638
189	0,189	1,854	0,700	0,881	0,035	3,500	25,178
248	0,248	2,433	1,000	1,156	0,050	5,000	23,126
335	0,335	3,286	1,500	1,562	0,075	7,500	20,826
428	0,428	4,199	2,000	1,996	0,100	10,000	19,956
532	0,532	5,219	2,600	2,480	0,130	13,000	19,081
611	0,611	5,994	3,200	2,849	0,160	16,000	17,805
665	0,665	6,524	3,500	3,101	0,175	17,500	17,718
762	0,762	7,475	4,100	3,553	0,205	20,500	17,331
852	0,852	8,358	4,820	3,972	0,241	24,100	16,483
<b>Y20</b>							
140	0,140	1,373	0,400	0,711	0,020	2,000	35,543
232	0,232	2,276	1,100	1,178	0,055	5,500	21,418
345	0,345	3,384	1,820	1,752	0,091	9,100	19,250
422	0,422	4,140	2,450	2,143	0,123	12,250	17,492
496	0,496	4,866	2,860	2,519	0,143	14,300	17,612
574	0,574	5,631	3,270	2,915	0,164	16,350	17,826
633	0,633	6,210	3,800	3,214	0,190	19,000	16,917
695	0,695	6,818	4,210	3,529	0,211	21,050	16,765
757	0,757	7,426	4,460	3,844	0,223	22,300	17,237
822	0,822	8,064	4,720	4,174	0,236	23,600	17,686

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Tabla II-19 Datos del módulo del plástico biodegradable**

<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>ΔL (mm)</b>	<b>Esfuerzo (N/mm2)</b>	<b>Deformacion</b>	<b>%Elong .</b>	<b>Modulo tensil (Mpa)</b>
<b>Y5</b>							
150	0,150	1,472	0,060	0,943	0,003	0,300	314,423
192	0,192	1,884	0,600	1,207	0,030	3,000	40,246
223	0,223	2,188	0,800	1,402	0,040	4,000	35,058
238	0,238	2,335	0,900	1,497	0,045	4,500	33,259
247	0,247	2,423	1,000	1,553	0,050	5,000	31,065
261	0,261	2,560	1,100	1,641	0,055	5,500	29,842
288	0,288	2,825	1,280	1,811	0,064	6,400	28,298
322	0,322	3,159	1,870	2,025	0,094	9,350	21,657
368	0,368	3,610	2,450	2,314	0,123	12,250	18,891
415	0,415	4,071	2,700	2,610	0,135	13,500	19,331
<b>Y13</b>							
150	0,150	1,472	0,040	0,943	0,002	0,200	471,635
192	0,192	1,884	0,100	1,207	0,005	0,500	241,477
221	0,221	2,168	0,350	1,390	0,018	1,750	79,414
257	0,257	2,521	0,600	1,616	0,030	3,000	53,871
288	0,288	2,825	1,000	1,811	0,050	5,000	36,222
334	0,334	3,277	1,500	2,100	0,075	7,500	28,005
361	0,361	3,541	1,650	2,270	0,083	8,250	27,517
382	0,382	3,747	2,000	2,402	0,100	10,000	24,022
405	0,405	3,973	2,200	2,547	0,110	11,000	23,153
437	0,437	4,287	2,650	2,748	0,133	13,250	20,740
<b>Y21</b>							
155	0,155	1,521	0,050	0,966	0,003	0,250	386,417
176	0,176	1,727	0,100	1,097	0,005	0,500	219,385
192	0,192	1,884	0,140	1,197	0,007	0,700	170,949
212	0,212	2,080	0,380	1,321	0,019	1,900	69,542
237	0,237	2,325	0,730	1,477	0,037	3,650	40,469
252	0,252	2,472	0,940	1,571	0,047	4,700	33,417
268	0,268	2,629	1,120	1,670	0,056	5,600	29,827
313	0,313	3,071	1,460	1,951	0,073	7,300	26,723
343	0,343	3,365	1,850	2,138	0,093	9,250	23,111
364	0,364	4,500	2,850	2,859	0,143	14,250	20,063

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Tabla II-20 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable**

<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>ΔL (mm)</b>	<b>Esfuerzo (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformacion</b>	<b>%Elong.</b>	<b>Modulo tensil (Mpa)</b>
<b>Y6</b>							
140	0,140	1,373	0,050	0,865	0,003	0,250	345,945
186	0,186	1,825	0,100	1,149	0,005	0,500	229,806
253	0,253	2,482	0,600	1,563	0,030	3,000	52,098
294	0,294	2,884	0,800	1,816	0,040	4,000	45,405
322	0,322	3,159	1,000	1,989	0,050	5,000	39,784
364	0,364	3,571	1,450	2,249	0,073	7,250	31,016
418	0,418	4,101	1,940	2,582	0,097	9,700	26,621
442	0,442	4,336	2,100	2,730	0,105	10,500	26,005
508	0,508	4,983	2,400	3,138	0,120	12,000	26,152
543	0,543	5,327	2,900	3,354	0,145	14,500	23,134
<b>Y14</b>							
140	0,140	1,373	0,050	0,716	0,003	0,250	286,423
167	0,167	1,638	0,330	0,854	0,017	1,650	51,767
193	0,193	1,893	0,480	0,987	0,024	2,400	41,131
238	0,238	2,335	0,880	1,217	0,044	4,400	27,666
286	0,286	2,806	1,060	1,463	0,053	5,300	27,600
332	0,332	3,257	1,220	1,698	0,061	6,100	27,837
391	0,391	3,836	1,630	2,000	0,082	8,150	24,538
463	0,463	4,542	2,100	2,368	0,105	10,500	22,553
542	0,542	5,317	2,460	2,772	0,123	12,300	22,538
626	0,626	6,141	2,940	3,202	0,147	14,700	21,781
<b>Y22</b>							
140	0,140	1,373	0,050	0,987	0,003	0,250	394,655
189	0,189	1,854	0,200	1,332	0,010	1,000	133,196
223	0,223	2,188	0,450	1,572	0,023	2,250	69,848
267	0,267	2,619	0,860	1,882	0,043	4,300	43,760
312	0,312	3,061	1,120	2,199	0,056	5,600	39,264
343	0,343	3,365	1,430	2,417	0,072	7,150	33,808
386	0,386	3,787	1,880	2,720	0,094	9,400	28,939
411	0,411	4,032	2,120	2,896	0,106	10,600	27,325
482	0,482	4,728	2,830	3,397	0,142	14,150	24,006
533	0,533	5,229	3,100	3,756	0,155	15,500	24,234

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Tabla II-21 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable**

<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>ΔL (mm)</b>	<b>Esfuerzo (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformacion</b>	<b>%Elong.</b>	<b>Modulo tensil (Mpa)</b>
<b>Y7</b>							
130	0,130	1,275	0,040	0,607	0,002	0,200	303,354
172	0,172	1,687	0,500	0,803	0,025	2,500	32,109
226	0,226	2,217	0,950	1,055	0,048	4,750	22,205
262	0,262	2,570	1,300	1,223	0,065	6,500	18,812
311	0,311	3,051	1,750	1,451	0,088	8,750	16,588
378	0,378	3,708	2,280	1,764	0,114	11,400	15,475
451	0,451	4,424	2,720	2,105	0,136	13,600	15,477
517	0,517	5,072	3,150	2,413	0,158	15,750	15,320
574	0,574	5,631	3,750	2,679	0,188	18,750	14,287
665	0,665	6,524	4,600	3,104	0,230	23,000	13,494
<b>Y15</b>							
130	0,130	1,275	0,080	0,536	0,004	0,400	134,073
174	0,174	1,707	0,400	0,718	0,020	2,000	35,890
226	0,226	2,217	0,750	0,932	0,038	3,750	24,862
274	0,274	2,688	1,000	1,130	0,050	5,000	22,607
352	0,352	3,453	1,790	1,452	0,090	8,950	16,225
463	0,463	4,542	2,450	1,910	0,123	12,250	15,592
498	0,498	4,885	2,800	2,054	0,140	14,000	14,674
567	0,567	5,562	3,400	2,339	0,170	17,000	13,759
612	0,612	6,004	3,800	2,525	0,190	19,000	13,288
683	0,683	6,700	4,300	2,818	0,215	21,500	13,105
<b>Y23</b>							
130	0,130	1,275	0,050	0,803	0,003	0,250	321,234
177	0,177	1,736	0,300	1,093	0,015	1,500	72,895
196	0,196	1,923	0,800	1,211	0,040	4,000	30,270
223	0,223	2,188	1,000	1,378	0,050	5,000	27,552
255	0,255	2,502	1,420	1,575	0,071	7,100	22,187
297	0,297	2,914	2,100	1,835	0,105	10,500	17,474
383	0,383	3,757	3,100	2,366	0,155	15,500	15,265
447	0,447	4,385	3,600	2,761	0,180	18,000	15,341
521	0,521	5,111	4,500	3,219	0,225	22,500	14,305
566	0,566	5,552	4,700	3,497	0,235	23,500	14,879

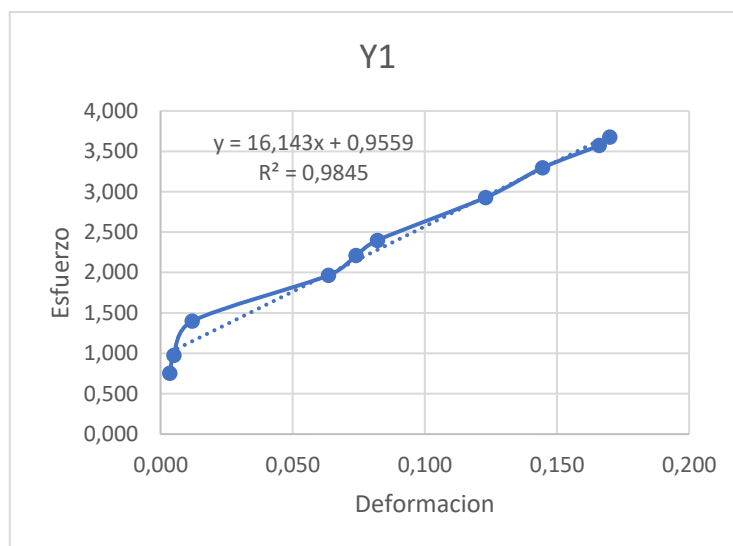
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025



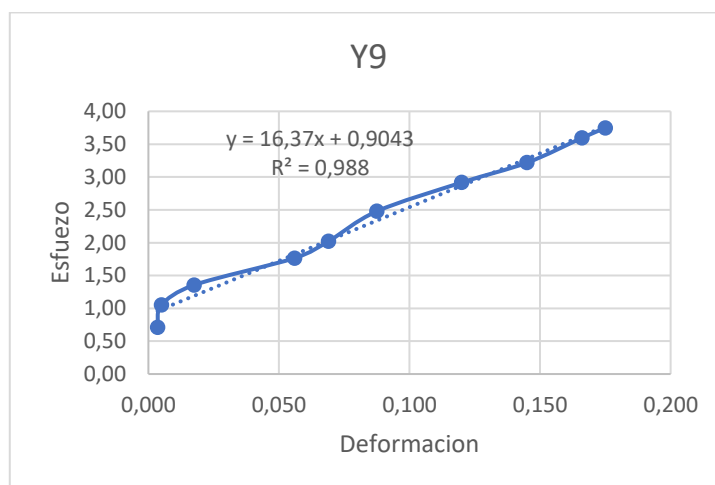
**Tabla II-22 Datos del modulo tensil del plástico biodegradable**

<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b><math>\Delta L</math> (mm)</b>	<b>Esfuerzo (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Deformacion</b>	<b>%Elong.</b>	<b>Modulo tensil (Mpa)</b>
<b>Y8</b>							
130	0,130	1,275	0,050	0,680	0,003	0,250	271,919
155	0,155	1,521	0,400	0,811	0,020	2,000	40,526
193	0,193	1,893	0,800	1,009	0,040	4,000	25,231
230	0,230	2,256	1,000	1,203	0,050	5,000	24,054
283	0,283	2,776	1,550	1,480	0,078	7,750	19,095
373	0,373	3,659	2,000	1,950	0,100	10,000	19,505
411	0,411	4,032	2,400	2,149	0,120	12,000	17,910
468	0,468	4,591	2,700	2,447	0,135	13,500	18,128
544	0,544	5,337	3,300	2,845	0,165	16,500	17,241
587	0,587	5,758	3,900	3,070	0,195	19,500	15,741
<b>Y16</b>							
130	0,130	1,275	0,050	0,476	0,003	0,250	190,485
285	0,285	2,796	0,400	1,044	0,020	2,000	52,200
347	0,347	3,404	0,500	1,271	0,025	2,500	50,845
423	0,423	4,150	0,900	1,550	0,045	4,500	34,434
488	0,488	4,787	1,100	1,788	0,055	5,500	32,502
586	0,586	5,749	1,700	2,147	0,085	8,500	25,254
662	0,662	6,494	2,250	2,425	0,113	11,250	21,556
736	0,736	7,220	2,570	2,696	0,129	12,850	20,981
824	0,824	8,083	3,400	3,018	0,170	17,000	17,756
877	0,877	8,603	3,700	3,213	0,185	18,500	17,365
<b>Y24</b>							
130	0,130	1,275	0,040	0,445	0,002	0,200	222,488
242	0,242	2,374	0,500	0,828	0,025	2,500	33,134
298	0,298	2,923	0,900	1,020	0,045	4,500	22,667
372	0,372	3,649	1,450	1,273	0,073	7,250	17,563
457	0,457	4,483	1,800	1,564	0,090	9,000	17,381
676	0,676	6,632	2,700	2,314	0,135	13,500	17,140
727	0,727	7,132	2,900	2,488	0,145	14,500	17,162
778	0,778	7,632	3,100	2,663	0,155	15,500	17,181
821	0,821	8,054	3,500	2,810	0,175	17,500	16,058
873	0,873	8,564	3,850	2,988	0,193	19,250	15,523

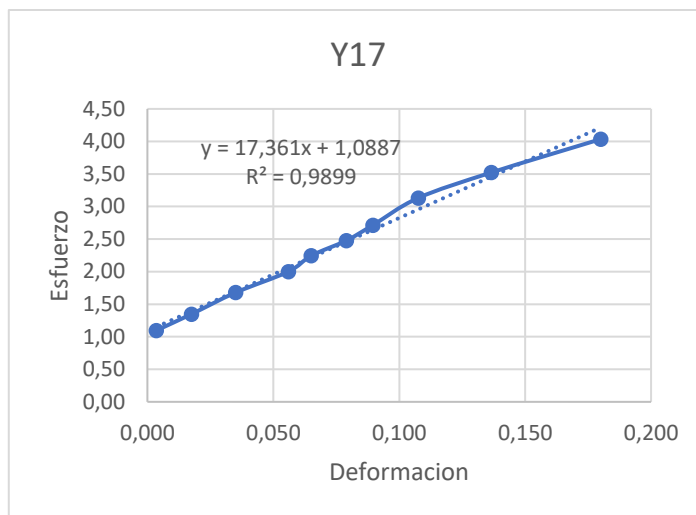
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-6 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y1**

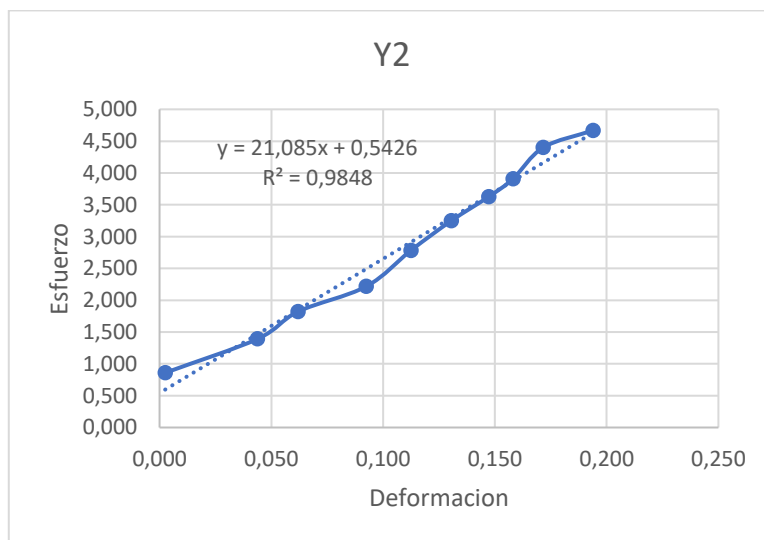
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-7 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y9**

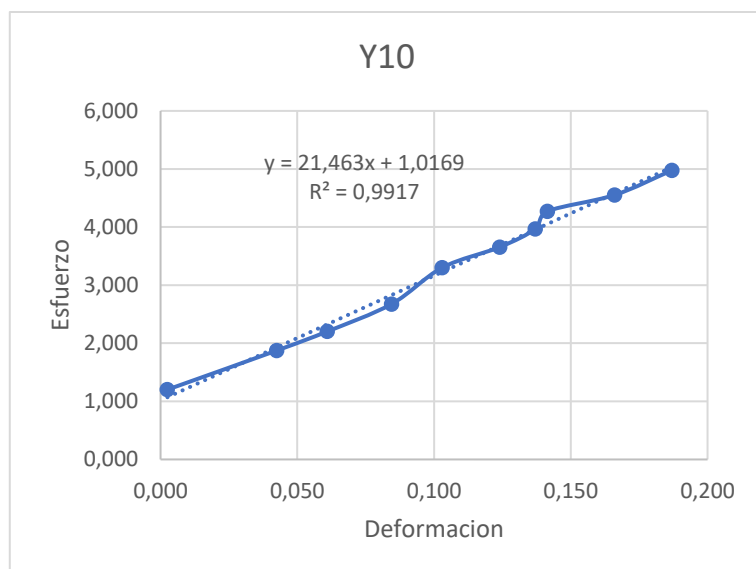
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig.II-8 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y17**

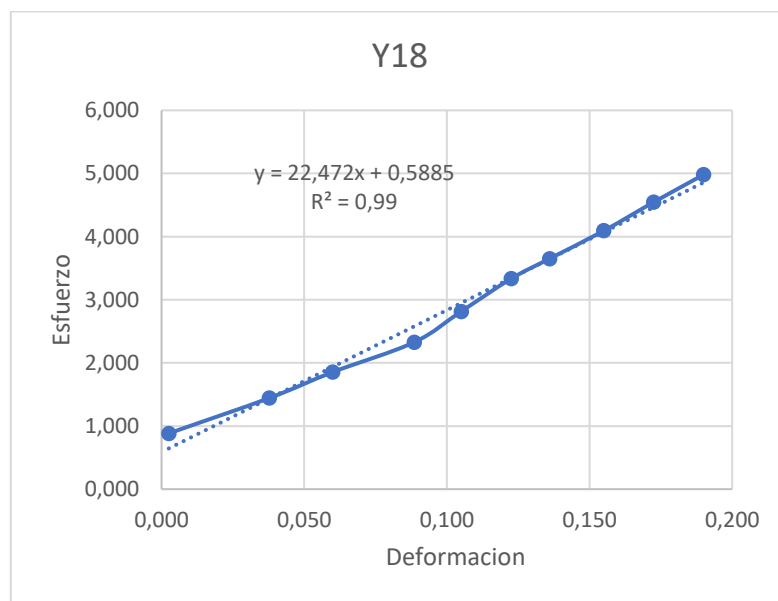
Fuente: Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-9 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y2**

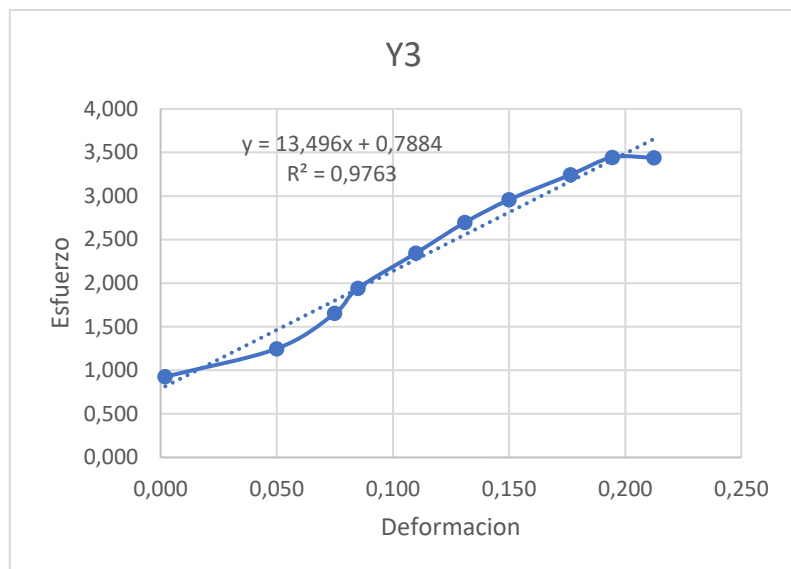
Fuente: Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-10 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y10**

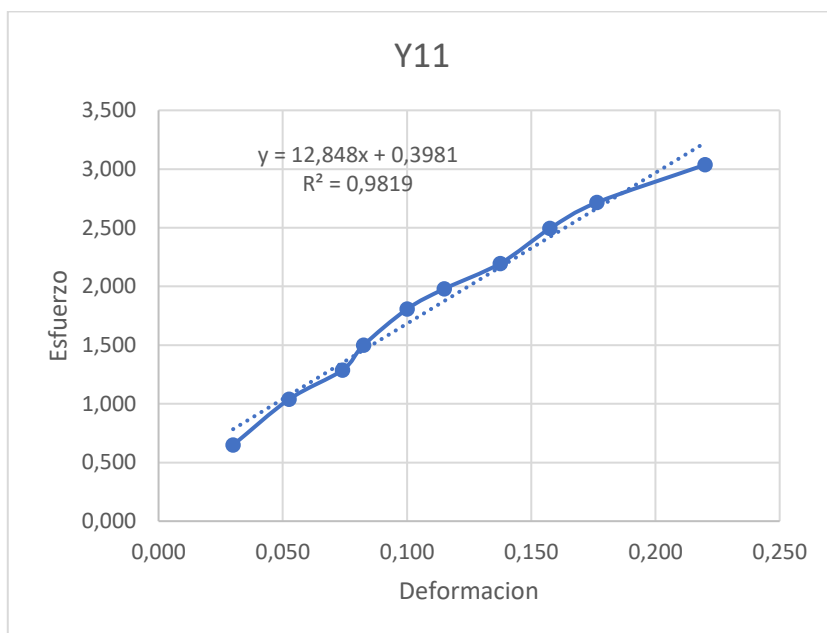
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-11 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y18**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-12 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y3**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-13 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y11**

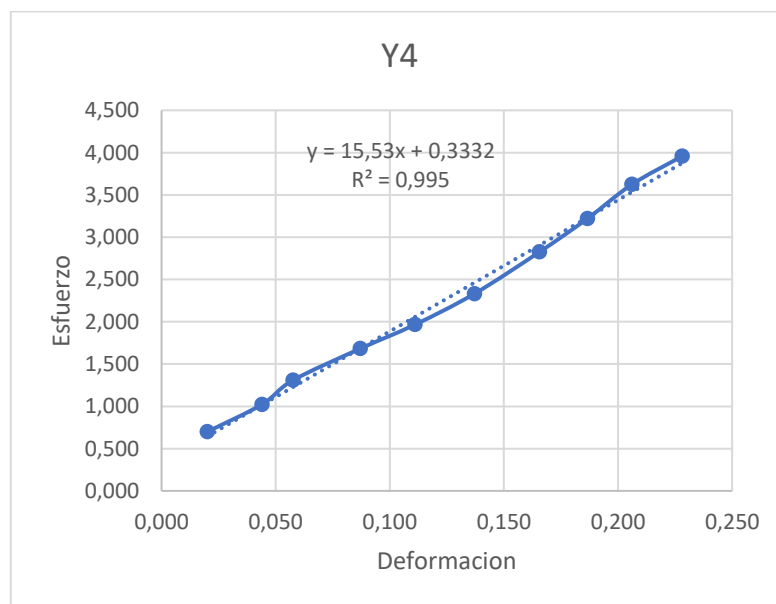
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-14 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y19**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

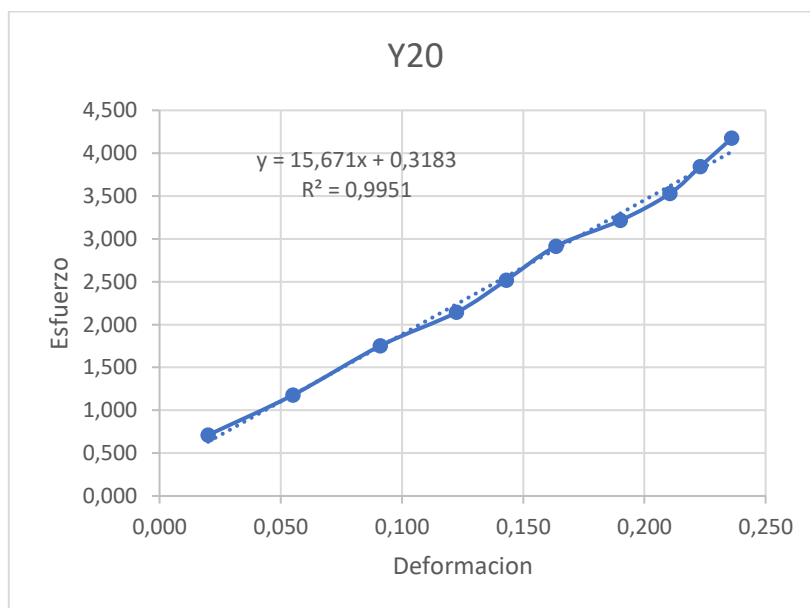
**Fig. II-15 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y4**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-16 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y12**

Fuente: Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-17 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y20**

Fuente: Elaboracion propia, 2025

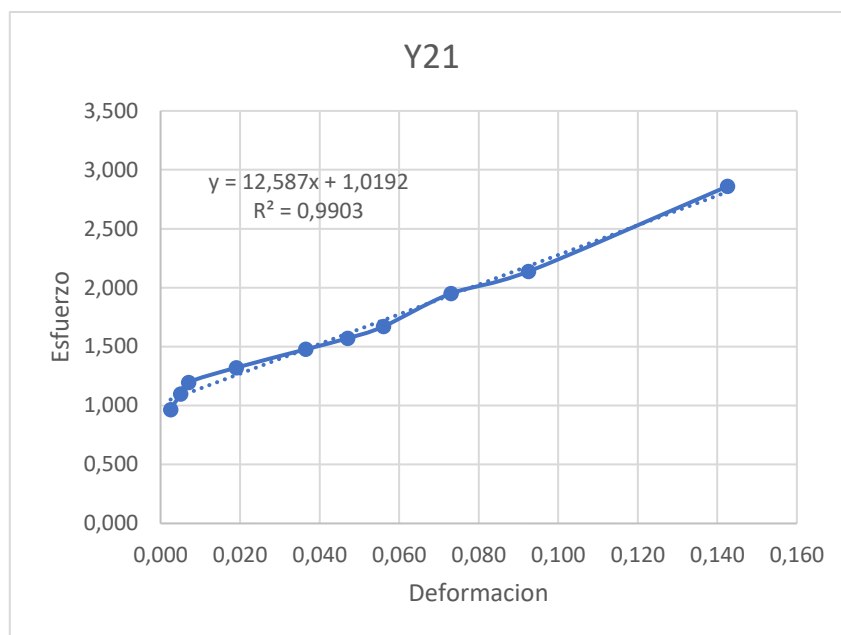
**Fig. II-18 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y5**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

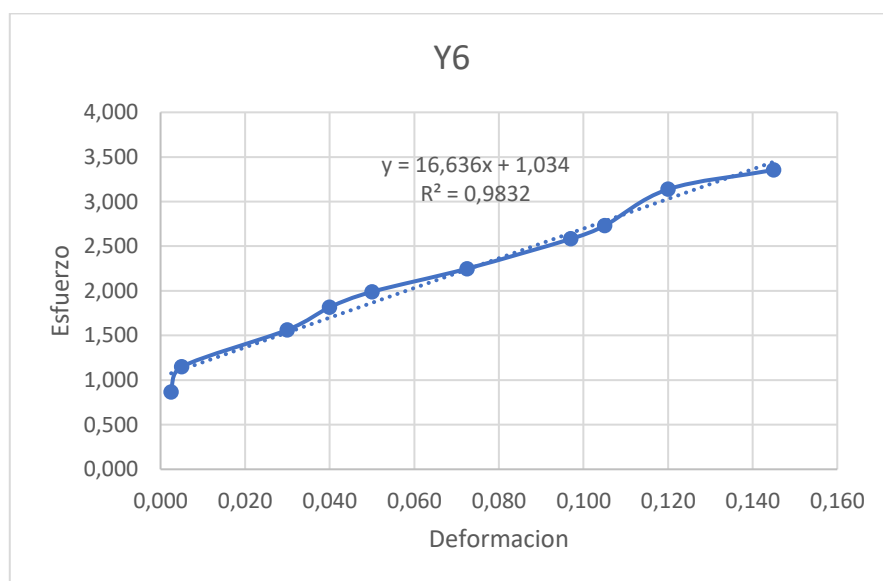
**Fig. II-19 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y13**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

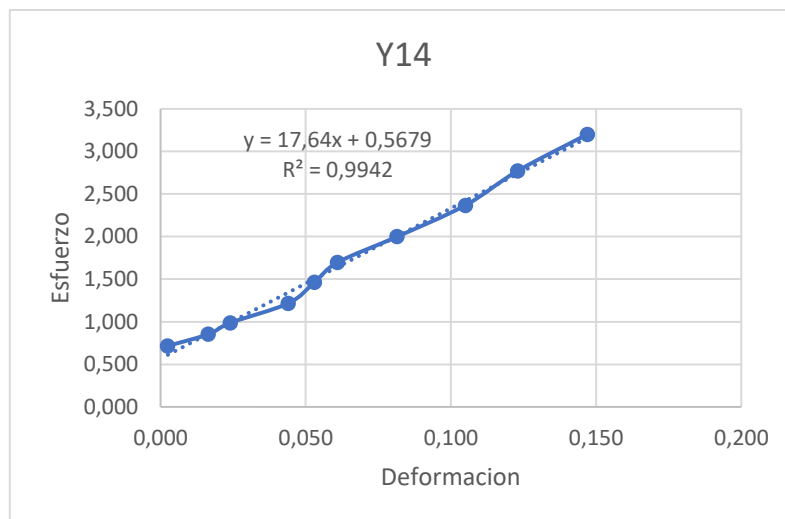


**Fig. II-20 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y21**

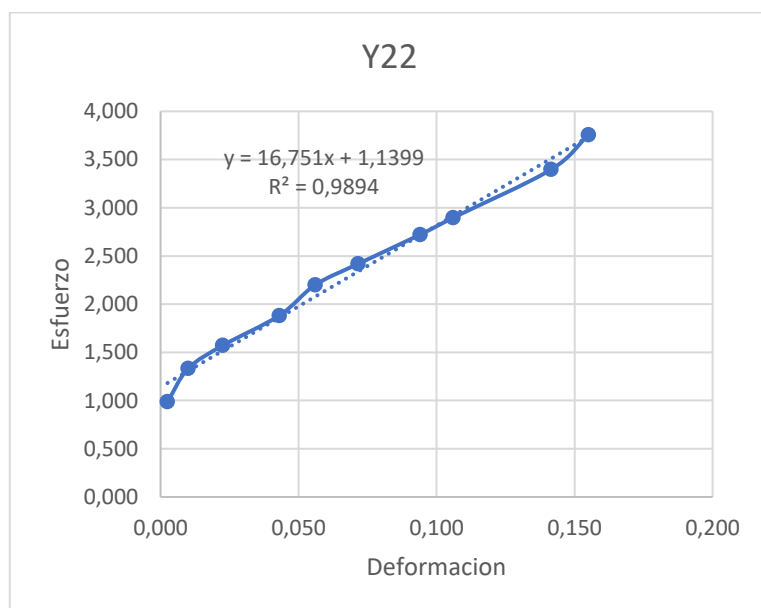
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-21 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y6**

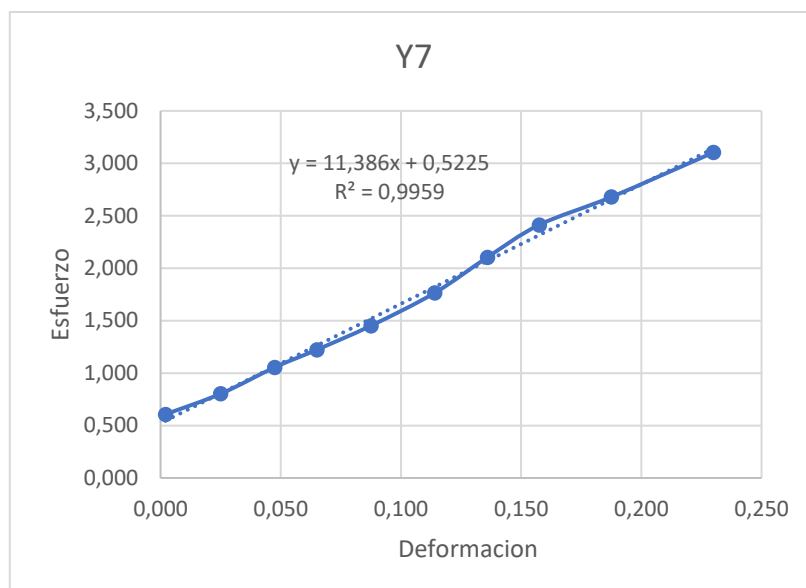
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-22 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y14**

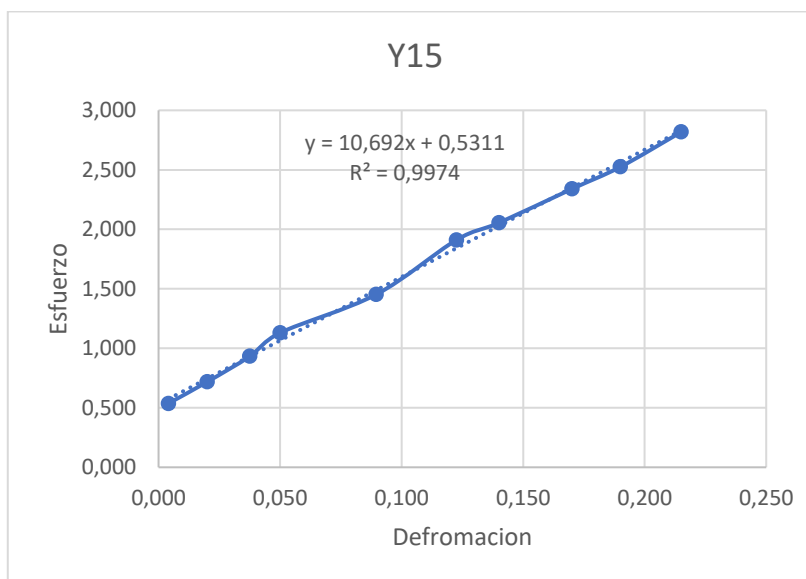
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-23 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y22**

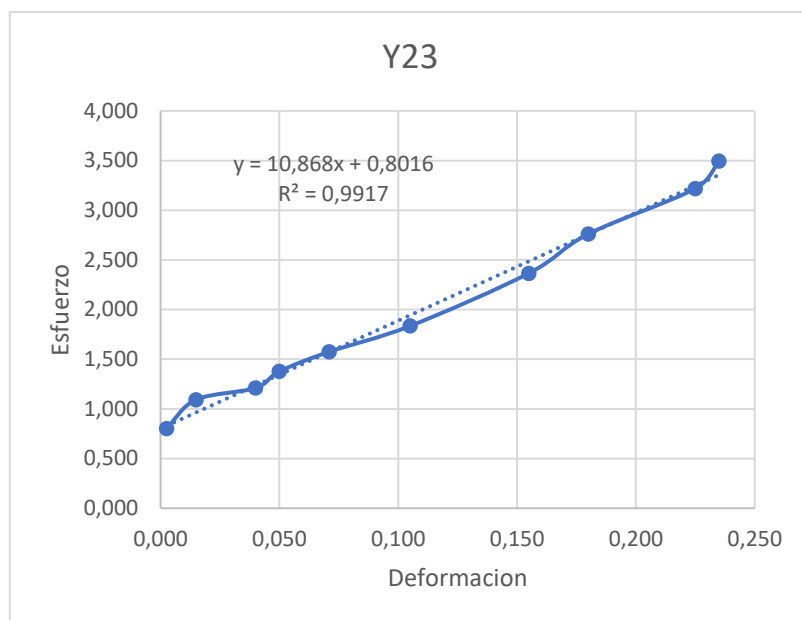
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-24 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y7**

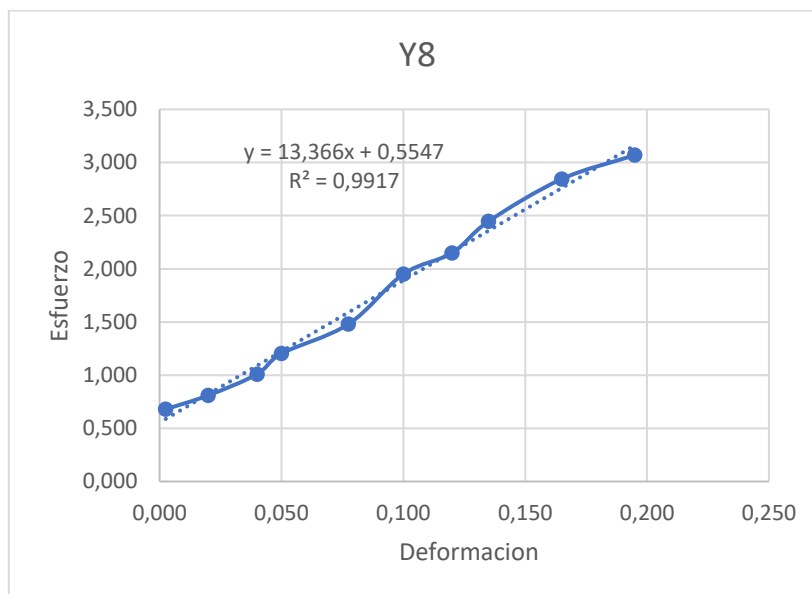
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-25 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y15**

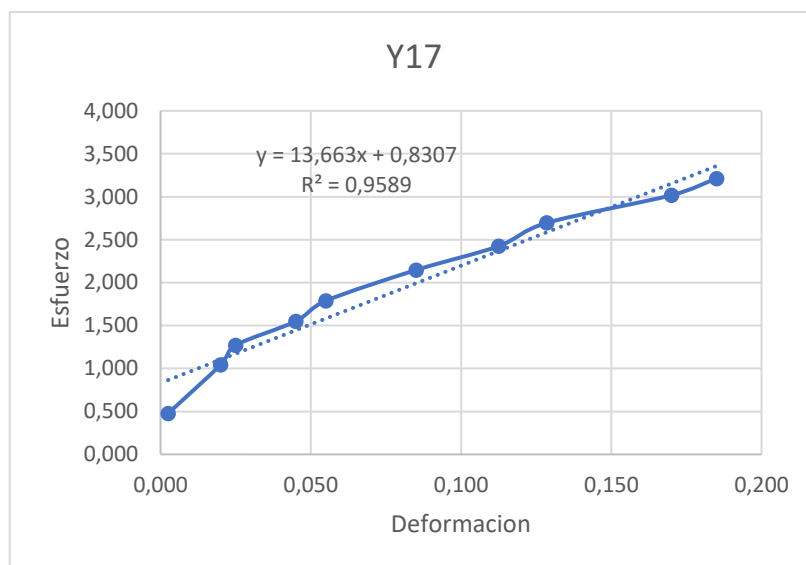
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-23 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y23**

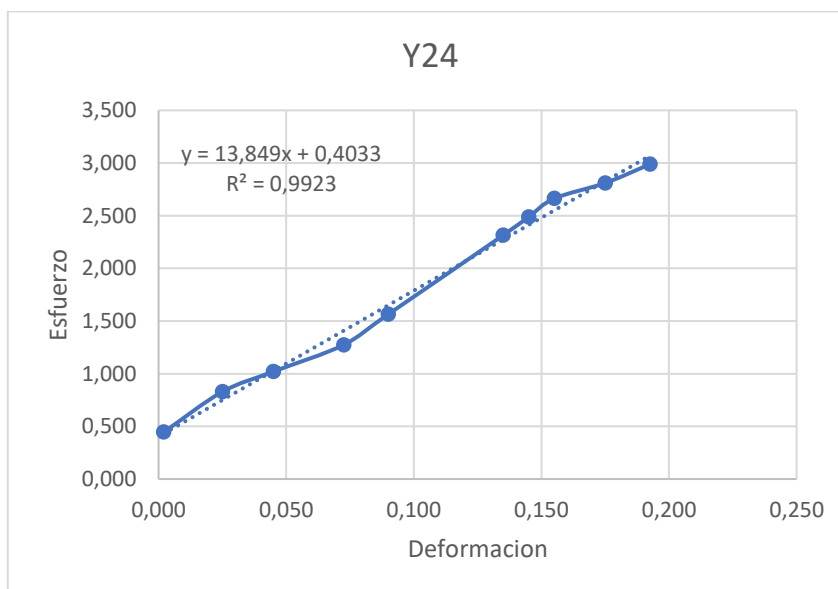
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-24 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y8**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-25 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y17**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. II-26 Esfuerzo vs deformación de la muestra Y24**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Tabla II-23 Datos del módulo tensil de cada replica**

<b>Modulo tensil (Mpa)</b>		
<b>Y1</b>	<b>Y9</b>	<b>Y17</b>
16,143	16,370	17,361
<b>Y2</b>	<b>Y10</b>	<b>Y18</b>
21,085	21,463	22,472
<b>Y3</b>	<b>Y11</b>	<b>Y19</b>
13,469	12,848	12,875
<b>Y4</b>	<b>Y12</b>	<b>Y20</b>
15,530	15,266	15,671
<b>Y5</b>	<b>Y13</b>	<b>Y21</b>
12,098	12,961	12,587
<b>Y6</b>	<b>Y14</b>	<b>Y22</b>
16,636	17,64	16,751
<b>Y7</b>	<b>Y15</b>	<b>Y23</b>
11,386	10,692	10,868
<b>Y8</b>	<b>Y16</b>	<b>Y24</b>
13,366	13,663	13,849

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

# **CAPÍTULO III**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 3.1 Introducción al análisis y discusión de resultados

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

### 3.2 Presentación de los resultados de la caracterización de la quinua blanca

El análisis de la materia prima para el desarrollo experimental del presente trabajo se realizó en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija - Bolivia. En la tabla III-1 se muestra los resultados obtenidos, (ver Anexo 1)

**Tabla III-1 Caracterización fisicoquímica de la quinua blanca**

Parámetro	Unidad	Resultado
<b>Ceniza</b>	g/100g	2,09
<b>Grasa</b>	g/100g	5,58
<b>Hidratos de carbono</b>	g/100g	67,66
<b>Humedad</b>	g/100g	11,88
<b>Proteína total (Nx6,25)</b>	g/100g	12,79
<b>Valor energético</b>	Kcal/100g	372

**Fuente:** CEANID,2024

Los resultados de la caracterización de la quinua blanca indican que esta variedad presenta una composición adecuada para la extracción de almidón, para así obtener el plástico biodegradable. El valor obtenido de ceniza representa el contenido de minerales y materia inorgánica. Un valor relativamente bajo 2,09%, ya que un alto contenido de cenizas podría introducir impurezas o materiales que no son polímeros, lo que podría afectar la pureza del almidón extraído y, consecuentemente, las propiedades mecánicas y la homogeneidad del plástico biodegradable final. El valor obtenido de grasas es moderado, lo que resulta beneficioso para que el plástico biodegradable no sea frágil y no cause problemas con la opacidad.



Con el valor obtenido de los hidratos de carbono, este es el parámetro más crítico y favorable. Los hidratos de carbono, particularmente el almidón, son el componente principal y deseado para la producción de bioplásticos a partir de la quinua. Un valor del 67,66% indica que la quinua blanca es una excelente fuente de carbohidratos, lo que se traduce en una buena disponibilidad de almidón para ser procesado y transformado en el polímero base del plástico biodegradable. La quinua es conocida por su alto contenido proteico. Un 12,79% es un valor significativo.

La información obtenida proporciona una base sólida para interpretar los resultados en las etapas posteriores del proceso de elaboración del plástico biodegradable y evaluar la calidad del mismo.

### **3.3 Presentación de los resultados del plástico biodegradable**

#### **3.3.1 Análisis sensorial del plástico Biodegradable**

Se valora a continuación los atributos de las láminas de plástico biodegradable mediante una tabla de valoración porcentual dando un total del 100 %, según la apreciación del tacto y la vista ante los parámetros organolépticos. Esto se realiza con el objetivo de obtener una gráfica (representativa) que refleje la importancia de cada atributo. El análisis sensorial se realizó para los 8 experimentos obtenidos. Para ver el test del análisis sensorial (Ver Anexo 2)

**Fotografía III-1 Análisis sensorial del plástico biodegradable**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

Estos atributos son valorados según la escala de calificación en la tabla III-2

**Tabla III-2 Escala de calificación**

Atributo	Valor porcentual (%)
Aspecto	20
Textura	20
Flexibilidad	25
Resistencia	35

**Fuente:** Elaboración Propia, 2024

La evaluación de las formulaciones se aprecia en la tabla III-3

**Tabla III-3 Evaluación de las formulaciones**

N° de experimento	Aspecto	Textura	Flexibilidad	Resistencia
1	Traslucido	Aspera	Flexible	Fuerte
2	Traslucido	Lisa	Flexible	Fuerte
3	Traslucido	Lisa	Flexible	Débil
4	Opaco	Aspera	Flexible	Fuerte
5	Opaco	Lisa	Poco flexible	Fuerte
6	Traslucido	Aspera	Flexible	Fuerte
7	Traslucido	Lisa	Flexible	Débil
8	Traslucido	Aspera	Flexible	Débil

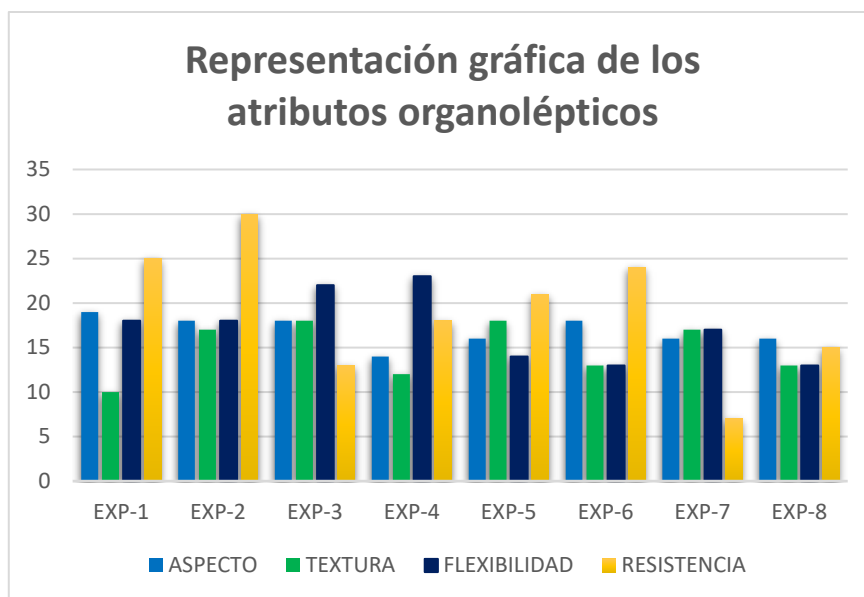
**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

La puntuación de los atributos organolépticos se aprecia en la tabla III-4

**Tabla III-4 Puntuación de los atributos organolépticos**

N° de experimento	Valor Porcentual (%)				Puntuación
	Aspecto	Textura	Flexibilidad	Resistencia	Total (%)
<b>1</b>	19	10	18	25	72
<b>2</b>	18	17	18	30	83
<b>3</b>	18	18	22	13	71
<b>4</b>	14	12	23	18	67
<b>5</b>	16	18	14	21	69
<b>6</b>	18	13	19	24	74
<b>7</b>	16	17	21	7	61
<b>8</b>	16	13	20	15	64

**Fuente:** Elaboración Propia, 2024

**Fig. III-1 Representación gráfica del análisis sensorial**

**Fuente:** Elaboración Propia, 2024

En la tabla III-4 cuantifica las evaluaciones cualitativas de la Tabla III-3, asignando una puntuación a cada muestra en cada atributo. Se destaca que la formulación 2 obtiene la puntuación total más alta 83%, lo que indica que presenta el perfil sensorial más favorable. Por el contrario, las formulaciones 4, 5, 7 y 8 obtienen las puntuaciones más bajas entre 61% y 69%, lo que sugiere que estas formulaciones requieran mejoras en sus propiedades organolépticas.

En la figura III-1 complementa la Tabla III-4 al proporcionar una representación visual de las puntuaciones de cada muestra en los diferentes atributos. Esta representación gráfica facilita la identificación rápida de las fortalezas y debilidades de cada formulación.

Se puede observar que la muestra 2 tiene una formulación óptima y que también se destaca por su alta puntuación en resistencia, mientras que la formulación 7 presenta una baja puntuación en este atributo.

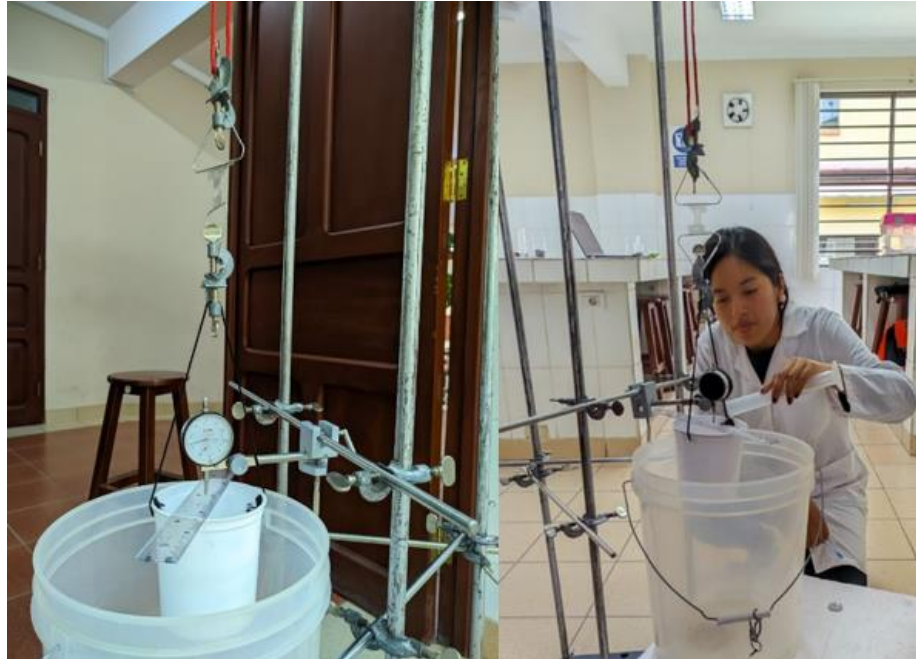
### **3.3.2 Resultados del Módulo Tensil del plástico biodegradable**

Se determinó basado en la norma ASTM D882. Las probetas fueron sometidas a fuerzas de tracción tiradas de ambos bordes de estas con ayuda del dilatómetro, equipo que se encuentra en el laboratorio de física de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija – Bolivia.

El procedimiento se basó de la siguiente manera: Se instaló el dilatómetro a una altura necesaria y estable. Luego se posiciona una cuerda con un gancho metálico en el extremo y un balde con su propio gancho, para que estos sean sujetos a las probetas desde las argollas, se estabiliza el dilatómetro con una regla posesionada en el borde del balde que se agregara peso.

Una vez tenido todo el equipo estable se procede a colocar las probetas ya cortadas, donde tienen una dimensión de 10 mm de ancho y 20 mm de largo. Estas probetas están sujetadas a un extremo del gancho y el otro extremo del gancho con el balde y se comenzó a agregar peso con agua, se comienza a lecturar una vez que la aguja del dilatómetro se encuentre estable, una vez estable se registra el valor. Se vuelve a agregar peso, este paso se repite hasta observar un cambio en el material tratado, (ruptura del plástico biodegradable). Para ver el montaje para la determinación de las propiedades mecánicas del plástico biodegradable, se observa en la siguiente fotografía III-2.

**Fotografía III-2 Determinación de las propiedades mecánicas del plástico biodegradable**



**Fuente:** Elaboración propia, 2024

El módulo tensil se expresa como la relación entre fuerza ejercida sobre la muestra y el grado de deformación:

$$\text{Módulo tensil} = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad (\text{Ecuación III-1})$$

**Donde:**

F = fuerza

$L_0$  = longitud inicial

$\Delta L$  = Cambio de longitud

A = Área de la sección transversal

A partir de los datos obtenidos se calculó el módulo tensil, mostrándose en la tabla III-5 y se establecieron los parámetros óptimos para la obtención de plástico biodegradable.

**Tabla III-5 Resultados del Módulo Tensil del Plástico Biodegradable**

N° de experimento	Parámetros de obtención			Modulo Tensil (Mpa)			
	T(°C)	Glicerina (mL)	Acido acetico (mL)	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Promedio
1	66	10	30	16,143	16,370	17,361	16,625
2	70	10	30	21,085	21,463	22,472	21,673
3	66	20	30	13,469	12,848	12,875	13,064
4	70	20	30	15,530	15,266	15,671	15,489
5	66	10	70	12,098	12,961	12,587	12,549
6	70	10	70	16,636	17,64	16,751	17,009
7	66	20	70	11,386	10,692	10,868	10,982
8	70	20	70	13,366	13,663	13,849	13,626

**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

Según los resultados obtenidos de la tabla III-5, los parámetros óptimos para la elaboración del plástico biodegradable son del experimento 2, el cual se realizó a una temperatura 70 °C, con un volumen de 10 mL de glicerina y un volumen de 30 mL de ácido acético, el cual presentó un mayor módulo tensil cuyo promedio es de 21,673 Mpa.

Dado a que la mejor muestra es el experimento número 2, por presentar un mayor módulo tensil, se procede a determinar el esfuerzo máximo que sufre el plástico biodegradable y su elongación máxima.

Para determinar el esfuerzo máximo, se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (\text{Ecuación III-2})$$

**Donde:**

$\sigma_{\max}$  = Esfuerzo máximo

$F_{\max}$  = Fuerza máxima registrada antes de la rotura

A = Área de la sección transversal

$$\sigma_{\max} = \frac{7,462 \text{ N}}{1,534 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 4864406,780 \text{ Pa} = 4,864 \text{ Mpa}$$

Para determinar el porcentaje de la elongación máxima, se calcula de la siguiente manera:

$$E_{\max} (\%) = \frac{\Delta L}{L_o} \times 100\% \quad (\text{Ecuación III-3})$$

**Donde:**

$E_{\max} (\%)$  = Elongación máxima

$L_o$  = Longitud inicial

$\Delta L$  = Cambio de longitud

$$E_{\max} (\%) = \frac{3,807 \text{ mm}}{20,000 \text{ mm}} \times 100\% = 19,035 \%$$

A continuación, se presenta la tabla III-6 de las propiedades mecánicas del plástico biodegradable.

**Tabla III-6 Propiedades mecánicas del plástico biodegradable del experimento 2 en base a los rangos establecidos**

Parámetros	Bioplástico a partir de la quinua blanca	Rango estándar
<b>Módulo tensil (Mpa)</b>	21,673	0,171 - 211,638
<b>Esfuerzo máximo (Mpa)</b>	4,876	2,660 - 12,360
<b>Elongación máxima (%)</b>	19,035	16,410 - 65,640

**Fuente:** Elaboracion propia, 2024

De acuerdo a los resultados observados en la tabla III- 6 podemos concluir que el plástico biodegradable obtenido cumple con los límites de referencias de investigaciones ejecutadas por (Trujillo, 2014) y por (Arroyo y Alarcón, 2014). Estos



valores demuestran que el plástico biodegradable a partir de la quinua blanca desarrollado posee propiedades mecánicas comparables y dentro de los rangos establecidos para este tipo de materiales, lo que sugiere su potencial viabilidad para diversas aplicaciones.

### 3.3.3 Resultados del espesor del plástico biodegradable

Con los parámetros que se indican el número de experimento 2, con los cuales se obtiene un mayor módulo tensil. Este análisis se basó en la norma internacional ISO 4593:1993. Se midió con un micrómetro digital, entre 0 y 25 mm con una exactitud de 0,001 mm. El proceso inició con la recepción de las láminas de plástico biodegradable acondicionadas para este ensayo, se realizaron 5 mediciones a cada replica en puntos uniformemente espaciados a lo largo de la lámina seleccionada. Finalmente, el resultado del ensayo se expresó como el promedio de las mediciones como se muestra en la tabla III-7. Para ver fotografías de la medición del espesor (Ver Anexo 3)

**Tabla III-7 Resultados de la medición del espesor**

N° Experimento 2			
Replica	Espesor (mm)	Promedio espesor (mm)	Rango estándar
Y2	0,171	0,153	0,010-0,200mm (INEN 2542)
Y10	0,122		
Y18	0,167		

**Fuente:** Elaboracion Propia, 2024

En la Tabla III-7 presenta los resultados de la medición del espesor del plástico biodegradable. Al comparar estos valores con el límite de referencia de 0,010 a 0,200 mm establecido por la norma INEN 2542, se observa que el experimento 2 cumple con el límite de referencia establecido.

### 3.3.4 Resultados de la solubilidad del plástico biodegradable

Con los parámetros que se indican el número de experimento 2, con los cuales se obtiene un mayor módulo tensil. Para la obtención de este parámetro se cortó las láminas de plástico biodegradable en las medidas de 2,500 x 2,500 cm y se secaron hasta peso constante en la estufa a 105°C durante 2 h. Luego la muestra de bioplástico se colocó en 50 mL de agua con agitación constante durante 2 h. Se retiraron las

muestras y se llevaron a estufa a 40 °C hasta que esté seca y seguidamente a 105 °C hasta peso constante.

Para ver fotografías de la determinación de solubilidad del plástico biodegradable. (Ver Anexo 4).

**Tabla III-8 Resultados de la solubilidad**

N° Experimento 2				
Replica	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Solubilidad (%)	Limite referencia
Y2	0,158	0,107	32,638	14,840% a 60,960% (Trujillo, 2014)
Y10	0,111	0,071	35,907	
Y18	0,113	0,077	32,187	
<b>Promedio</b>			33,577	

**Fuente:** Elaboración Propia, 2025

En la tabla III-8 se muestra los valores de solubilidad para el experimento 2 que presentó una solubilidad promedio del 33,577%. Este hallazgo sugiere que, a pesar de poseer una mayor rigidez y resistencia a la deformación (evidenciado por un módulo tensil elevado), las láminas de este experimento mantienen una solubilidad en el rango esperado.

Este comportamiento es crucial, ya que un material con alta resistencia mecánica que a su vez es soluble en agua puede ofrecer ventajas significativas en ciertas aplicaciones, donde se requiere integridad estructural durante su uso. La solubilidad observada del experimento 2 que se encuentra dentro del límite de referencia, indica que el plastificante o la formulación utilizada no comprometió excesivamente la capacidad de interacción con el agua.

### **3.3.5 Resultados de la permeabilidad de vapor de agua del plástico biodegradable**

Con los parámetros que se indican el número de experimento 2, con los cuales se obtiene un mayor módulo tensil. La permeabilidad de vapor de agua se determinó gravimétricamente de acuerdo a la norma ASTM E96. Se cortaron láminas de plástico biodegradable en forma de discos circulares con un diámetro de 3 cm. Esta medida fue

seleccionada para que las muestras cubrieran por completo el área transversal de la boca de los vasos de precipitado utilizado, posteriormente se agrega una cierta cantidad de agua destilada al vaso precipitado y las láminas cortadas se lo colocaron encima del vaso precipitado, asegurando con cinta adhesiva a los bordes.

Los vasos precipitados se colocaron en un desecador con sílica. El peso del vaso precipitado se determinó cada 24 horas durante 10 días a través de una balanza analítica. Para ver fotografías (Ver Anexo 5).

### **Cálculo de la diferencia de presión de vapor de agua**

La temperatura promedio de ensayo registrado por los 10 días fue de 25°C por lo tanto, hallando de tablas termodinámicas (Ver Anexo 6).

La presión de vapor de agua saturada es de  $P_{\text{sat}} = 3,166 \text{ Kpa} = 3,166 \times 10^{-3} \text{ Mpa}$ . Los datos registrados de la humedad relativa son: Humedad relativa que contenía el agua destilada  $H_{R1} = 100\%$  y la humedad relativa que contenía en el desecador  $H_{R2} = 47\%$ .

**Donde:**

$R_{HR1}$  y  $R_{HR2}$  viene a ser la humedad relativa (expresado como fracción)

$$\Delta P = P_{\text{sat}} \times (R_{HR1} - R_{HR2}) \quad (\text{Ecuación III-4})$$

$$\Delta P = 3,166 \times 10^{-3} \times (1 - 0,47)$$

$$\Delta P = 1,679 \times 10^{-3} \text{ Mpa}$$

Los datos de la determinación de la permeabilidad de vapor de agua, se registra en la tabla III-9

**Tabla III-9 Datos para la determinación de la permeabilidad de vapor de agua**

N° Experimento 2			
Tiempo (h)	Replica Y2	Replica Y10	Replica Y18
	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)
24	28,182	27,573	28,329
48	27,941	27,335	28,112
72	27,777	26,996	27,983
96	27,625	26,829	27,805
120	27,438	26,608	27,662
144	27,255	26,424	27,527
168	27,085	26,288	27,396
192	26,895	26,016	27,222
216	26,716	25,814	27,090
240	26,523	25,458	26,916

**Fuente:** Elaboración propia, 2025

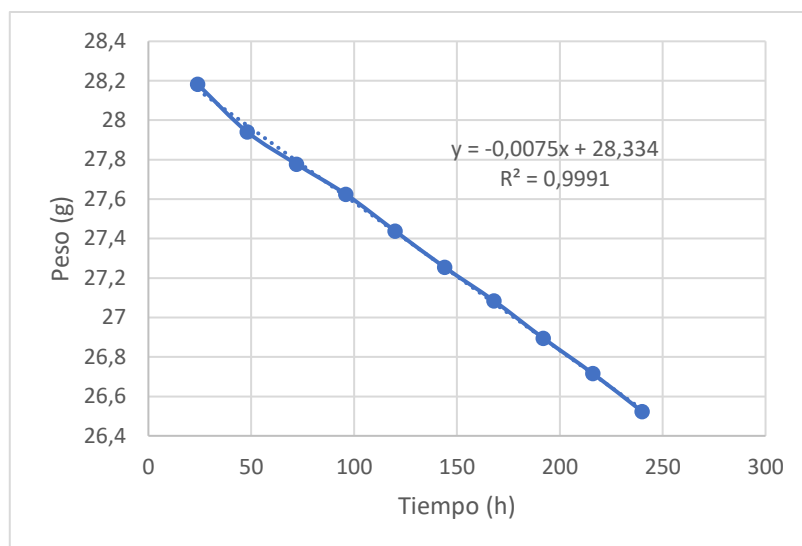
### **Cálculo del flujo de vapor de agua**

$$\text{Flujo de vapor de agua} = \frac{\Delta m}{\Delta t * A_{\text{Bioplastico}}} \quad (\text{Ecuación III-5})$$

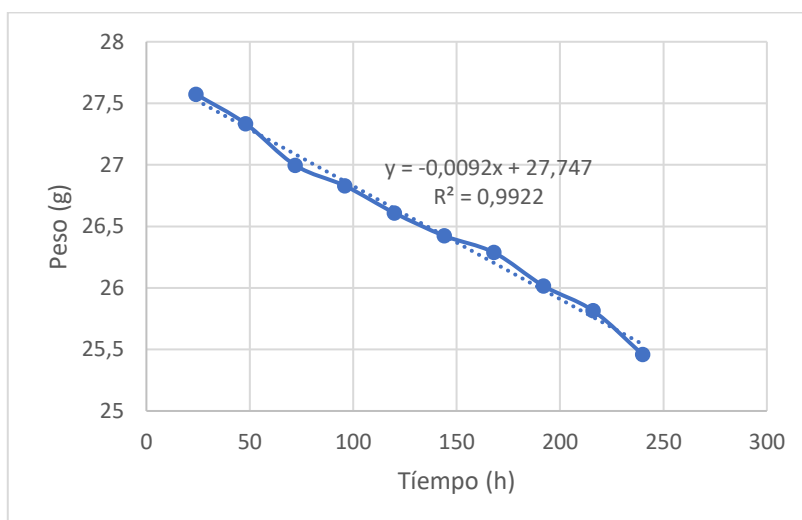
Se prepararon muestras de bioplástico cortándolas en forma de discos circulares con un diámetro de 3 cm. Esta dimensión se seleccionó para que las muestras cubrieran completamente la abertura del vaso de precipitado. Con base en este diámetro, el área de cada muestra de bioplástico se calculó:  $A_{\text{Bioplastico}} = 7,07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

La variación de masa y la variación de tiempo ( $\Delta m / \Delta t$ ) se determina mediante la obtención de la pendiente de la gráfica pérdida de peso vs tiempo, a partir de los datos obtenidos de la tabla III-9.

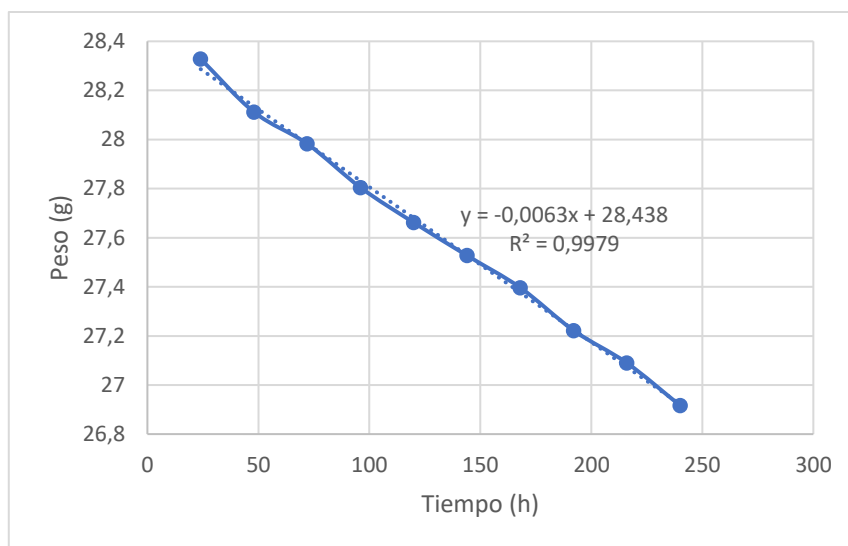
Para ver la gráfica de pérdida de peso vs tiempo, se muestra en la figura III-2, figura III-3 y figura III-4

**Fig. III-2 Peso vs tiempo de la muestra Y2**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. III-3 Peso vs tiempo de la muestra Y10**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. III-4 Peso vs tiempo de la muestra Y18**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

Los resultados del flujo de vapor de agua se observan en la tabla III-10

**Tabla III-10 Resultados del flujo de vapor de agua**

N° Experimento 2			
Replica	Abioplastico (m <sup>2</sup> )	Pendiente (g/h)	Flujo de vapor de agua (g/h*m <sup>2</sup> )
Y2	7,07x10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup>	7,50 x10 <sup>-3</sup>	10,610
Y10		9,20 x10 <sup>-3</sup>	13,015
Y18		6,30 x10 <sup>-3</sup>	8,913

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

### Cálculo de la permeabilidad de vapor de agua

$$PVA = \text{Flujo de vapor de agua} \times \frac{\text{espesor}}{\Delta P} \quad (\text{Ecuación III-6})$$

Los resultados de la permeabilidad de vapor de agua se observan en la tabla III-11

**Tabla III-11 Resultados de la permeabilidad de vapor de agua**

N° Experimento 2			
Replica	Espesor (m)	PVA (g/m <sup>2</sup> *h*Mpa)	PVA promedio (g/m <sup>2</sup> *h*Mpa)
Y2	1,71x10 <sup>-4</sup>	1,08 x10 <sup>-2</sup>	9,71 x10 <sup>-3</sup>
Y10	1,22 x10 <sup>-4</sup>	9,46 x10 <sup>-3</sup>	
Y18	1,67 x10 <sup>-4</sup>	8,85 x10 <sup>-3</sup>	

**Fuente:** Elaboración propia, 2025

Al comparar estos resultados con investigaciones ejecutadas por Trujillo (2014) obtuvo una permeabilidad de 0,030 g/h\*m\*Mpa para un material similar. Los valores de PVA obtenidos en esta investigación son menores a 0,030 g/h\*m\*Mpa lo que sugiere que el plástico biodegradable evaluado presenta características de barrera al vapor de agua adecuadas. Otros autores como Gontard (1992) indicaron que la permeabilidad al vapor de agua debe ser lo más baja posible para asegurar la eficiencia del material como barrera, lo cual le hace idóneo la presente investigación.

### 3.3.6 Resultados de la biodegradación del plástico biodegradable

El proceso de biodegradación del plástico biodegradable se centró en la determinación de los criterios de pérdida de masa y de la apariencia que adquirieron las muestras ensayadas.

#### 3.3.6.1 Biodegradación en tierra

Las muestras de láminas de bioplástico fueron cortadas en cuadrados de 2,5 cm x 2,5 cm y enterradas en recipientes a una cierta profundidad desde la superficie, con el fin de asegurar las condiciones de la temperatura y por un tiempo de exposición de 35 días, la biodegradación en tierra se realizó en la época de verano, donde el rango de temperaturas oscilaba entre 20 - 32°C y el promedio de la temperatura reportada fue de 28°C. Se evaluó la pérdida de peso cada 5 días y se determinó el porcentaje de pérdida de peso.

**Tabla III-12 Resultados de la pérdida de peso de la biodegradación en tierra**

<b>N° Experimento 2</b>									
<b>Replica</b>	<b>Peso (g) ini Dia 0</b>	<b>Peso (g) Dia 5</b>	<b>Peso (g) Dia 10</b>	<b>Peso (g) Dia 15</b>	<b>Peso (g) Dia 20</b>	<b>Peso (g) Dia 25</b>	<b>Peso (g) Dia 30</b>	<b>Peso (g) Dia 35</b>	<b>%Bio</b>
<b>Y2</b>	0,160	0,153	0,147	0,129	0,111	0,106	0,086	0,071	55,625
<b>Y10</b>	0,090	0,087	0,083	0,079	0,072	0,069	0,057	0,048	46,667
<b>Y18</b>	0,141	0,136	0,130	0,122	0,118	0,010	0,082	0,065	53,901
<b>Promedio</b>									52,064

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El análisis de los datos de la tabla III-12 se puede observar los valores de los porcentajes de biodegradación en tierra, donde el promedio es del 52,064%, lo que indica una alta actividad de degradación en el medio terrestre. Estas variaciones indican que la composición de las láminas de plástico biodegradable, se debe a los aditivos utilizados que influyen en la tasa de descomposición en el suelo. La eficiencia de la biodegradación en tierra es un indicador crítico de la sostenibilidad ambiental de estos plásticos biodegradables, confirmando su potencial para ser reincorporados al ciclo natural al final de su vida útil.

### **3.3.6.2 Biodegradación en aire**

Las muestras de láminas de bioplástico fueron cortadas en cuadrados de 2,500 cm x 2,500 cm, se pesó las muestras en una balanza analítica, posteriormente se coloca las muestras en recipientes sin tapa, colocar los recipientes al aire libre por un tiempo de exposición de 35 días, la biodegradación en aire se realizó en la época de verano, donde el rango de temperaturas oscilaba entre 20 - 32°C y el promedio de la temperatura reportada fue de 28°C. Se evaluó la pérdida de peso cada 5 días y se determinó el porcentaje de pérdida de peso.



**Tabla III-13 Resultados de la pérdida de peso de la biodegradación en aire**

<b>N° Experimento 2</b>									
<b>Replica</b>	<b>Peso (g) ini Dia 0</b>	<b>Peso (g) Dia 5</b>	<b>Peso (g) Dia 10</b>	<b>Peso (g) Dia 15</b>	<b>Peso (g) Dia 20</b>	<b>Peso (g) Dia 25</b>	<b>Peso (g) Dia 30</b>	<b>Peso (g) Dia 35</b>	<b>%Bio</b>
<b>Y2</b>	0,136	0,135	0,133	0,130	0,130	0,128	0,126	0,124	8,622
<b>Y10</b>	0,106	0,105	0,103	0,102	0,100	0,098	0,096	0,096	9,091
<b>Y18</b>	0,165	0,164	0,162	0,160	0,158	0,157	0,155	0,154	6,836
<b>Promedio</b>									<b>8,183</b>

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

En la tabla III-13 nos muestra que el experimento 2 demuestra que el plástico biodegradable en estudio sufre una degradación medible. La pérdida de peso constante a lo largo de 35 días, culminando en un promedio de aproximadamente 8,183% de biodegradación, indica que el material está siendo descompuesto. Estos resultados son prometedores para la aplicación de este plástico en entornos donde la biodegradación es deseable.

La baja degradabilidad en aire nos indica que el plástico biodegradable elaborado en esta investigación se puede dejar bajo la luz solar al menos por 35 días sin que ocurra su degradación completa, lo cual es importante en la elaboración de materiales plásticos para empaques.

### **3.3.6.3 Biodegradación en agua**

Las muestras de láminas de bioplástico fueron cortadas en cuadrados de 2,500 cm x 2,500 cm, luego se pesó las muestras en una balanza analítica, posteriormente se colocó las muestras en recipientes apropiados, se llenó los recipientes con agua hasta superar la superficie de las muestras.

Tapar los recipientes y dejar en reposo absoluto (sin moverse) por 35 días, después de transcurrido este tiempo, se secó las láminas en una estufa a 105°C por 2 h y se pesó las muestras con una balanza analítica, para así determinar el porcentaje de degradabilidad.

**Tabla III-14 Resultados de la biodegradación en agua**

<b>N° Experimento 2</b>			
<b>Replica</b>	<b>Peso ini (g)</b>	<b>Peso fin (g)</b>	<b>%Bio</b>
<b>Y2</b>	0,146	0,038	74,008
<b>Y10</b>	0,104	0,041	60,097
<b>Y18</b>	0,159	0,043	72,956
<b>Promedio</b>			69,020

**Fuente:** Elaboración propia, 2025

Los resultados obtenidos en el experimento 2 de la biodegradación en agua, en la tabla III-14 demuestran una significativa degradación del plástico biodegradable en el medio acuoso durante el período de 35 días.

La obtención de porcentajes de biodegradación es superior al 50% lo que resalta el potencial de estos bioplásticos como alternativas sostenibles a los plásticos convencionales, cuyo tiempo de degradación en el medio acuoso es considerablemente mayor. Lo que indica una alta susceptibilidad del material a la descomposición en el agua.

Este alto nivel de biodegradación sugiere que los microorganismos presentes en el agua fueron capaces de metabolizar eficientemente la estructura del plástico biodegradable.

A continuación, se muestra la fotografía III-3 de la biodegradación en tierra-aire-agua del plástico biodegradable.

**Fotografía III-3 Biodegradación en tierra-aire-agua del plástico biodegradable**



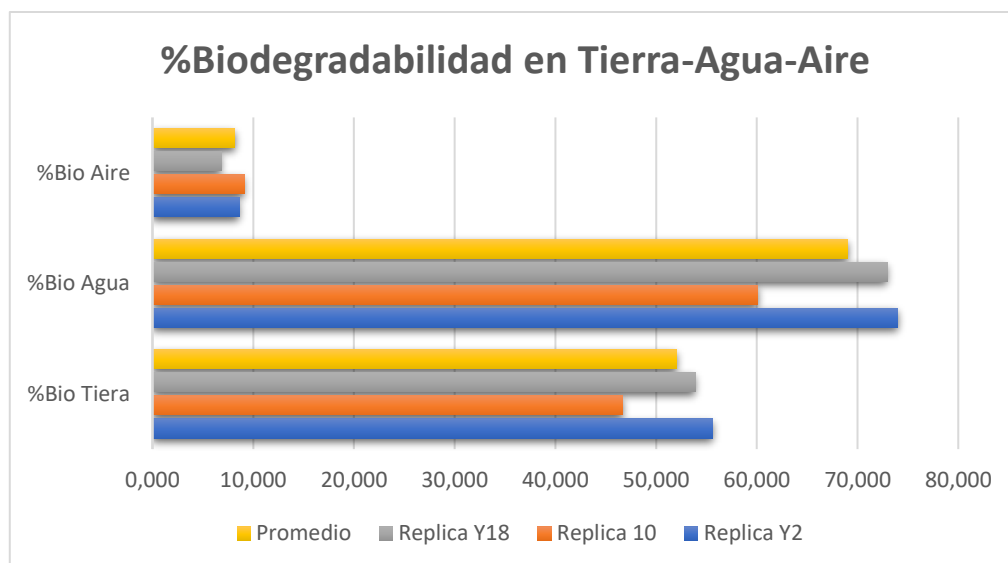
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

La comparación del porcentaje de biodegradación en tierra-agua-aire se muestra en la tabla III-15

**Tabla III-15 Comparación del porcentaje de biodegradación Tierra-Agua-Aire**

N° Experimento 2			
Replica	% Bio Tierra	% Bio Agua	% Bio Aire
<b>Y2</b>	55,625	74,008	8,622
<b>Y10</b>	46,667	60,097	9,091
<b>Y18</b>	53,901	72,956	6,836
<b>Promedio</b>	52,064	69,020	8,183

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. III-5 Comparación biodegradación Tierra-Agua-Aire**

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

Los resultados presentados en la Tabla III-15 y la Figura III-5 ilustran la comparación de la biodegradación de un plástico biodegradable bajo tres condiciones distintas: tierra, agua y aire. Los resultados sugieren que en el medio acuoso favorece significativamente la biodegradación del plástico estudiado.

El experimento 2 en la tabla III-15 muestra una tasa de biodegradación en tierra promedio 52,064 %. En el medio acuoso, su porcentaje de biodegradación promedio 69,020 %, Sin embargo, en el aire, su biodegradación promedio fue de 8,183%.

### 3.4 Análisis comparativo con estándares comerciales

En términos generales, los bioplásticos estudiados demuestran un rendimiento variable en comparación con los estándares comerciales. Algunas propiedades, como la elongación máxima y la biodegradación, se encuentran dentro o cerca de los rangos aceptados, lo que indica un potencial prometedor.

A continuación, se muestra la comparación con estándares comerciales en la tabla III-16

**Tabla III-16 Comparación con estándares comerciales**

<b>Parámetro</b>	<b>Bioplástico a partir de Almidón de quinua</b>	<b>Estándares comerciales</b>	<b>Bioplástico a partir de Almidón de maíz</b>	<b>Bioplástico a partir de Almidón de Papa</b>	<b>Bioplástico a partir de Almidón de Arveja</b>	<b>Bioplástico a partir de Almidón de Lenteja</b>
Módulo tensil (Mpa)	21,67	0,171 – 211,638	7,275	7,626	11,522	0,100
Esfuerzo máximo (Mpa)	4,876	2,660 – 12,360	1,010	3,093	4,454	2,600
Elongación máxima (%)	19,033	16,410 – 65,640	15,870	10,621	17,657	13,846
Espesor (mm)	0,153	0,010 – 0,200	0,200	0,118	0,180	0,108
Solubilidad (%)	33,577	14,840 – 60,960	36,510	45,107	50,455	57,512
Permeabilidad de vapor de agua (g/m <sup>2</sup> *h*Mpa)	9,71 x10 <sup>-3</sup>	0,001 - 0,030	0,037	2,40 x10 <sup>-3</sup>	4,00 x10 <sup>-3</sup>	2,11 x10 <sup>-3</sup>
Biodegradacion en tierra (%)	52,06	30,000 – 60,000	48,223	51,537	53,381	45,571
Biodegradacion en agua (%)	69,020	20,000 – 70,000	54,801	64,568	57,316	49,467
Biodegradacion en aire (%)	8,183	5,000 – 20,000	12,345	9,11	17,482	10,344

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

Con el módulo tensil se tiene un valor de de 21,67 Mpa, del bioplástico a partir del almidón de quinua tiene una rigidez superior a la de los bioplásticos a partir de almidón de maíz 7,275 Mpa y almidón de papa 7,626 Mpa, aunque es menor que el de almidón de arveja 11,522 Mpa.

Con el esfuerzo máximo se tiene un valor de 4,876 Mpa a partir del almidón de quinua blanca lo que ubica dentro del rango de los estándares comerciales 2,660 - 12,360 Mpa. Esta propiedad, al ser superior a la de los bioplásticos a partir de almidón de maíz 1,010 Mpa y de almidón de papa 3,093 Mpa, indica una mayor capacidad de carga antes de la fractura en comparación con estos otros bioplásticos.

La elongación máxima un 19,033% perteneciente al bioplástico a partir del almidón de quinua blanca, este bioplástico cae dentro del rango de estándares comerciales 16,410 - 65,640%, lo que denota una buena flexibilidad y ductilidad.

La baja permeabilidad de  $9,71 \times 10^{-3} \text{ g/m}^2\text{h}^*\text{Mpa}$  lo hace especialmente notable. Este valor es significativamente inferior a los de los otros bioplásticos a partir de almidón de maíz  $0,037 \text{ g/m}^2\text{h}^*\text{Mpa}$ ; almidón de papa:  $2,40 \times 10^{-3} \text{ g/m}^2\text{h}^*\text{Mpa}$ ; almidón de arveja:  $4,00 \times 10^{-3} \text{ g/m}^2\text{h}^*\text{Mpa}$  y se encuentra dentro del rango comercial ( $0,001 - 0,030 \text{ g/m}^2\text{h}^*\text{Mpa}$ ), lo que sugiere que podría ser útil en aplicaciones de empaques de alimentos donde se busca una barrera contra la humedad para mantener la frescura.

En cuanto a la biodegradación, el bioplástico de quinua muestra porcentajes de biodegradación en tierra 52,064 %, agua 69,020% y aire 8,183% que lo ubican dentro o por encima de los rangos comerciales. Esto lo convierte en una opción ambientalmente viable en comparación con los plásticos convencionales, que tienen tasas de degradación extremadamente lentas.

El bioplástico de almidón de quinua destaca por su equilibrio entre resistencia mecánica y flexibilidad, superando a otros bioplásticos vegetales en algunas métricas clave, como el esfuerzo máximo y la permeabilidad al vapor de agua. Su rendimiento está dentro de los rangos aceptados por el mercado en la mayoría de los parámetros evaluados, lo que lo posiciona como un material con un alto potencial para su uso en aplicaciones comerciales, especialmente en el área de empaques biodegradables.

### **3.5 Análisis estadístico**

Para la realización de análisis estadístico para la elaboración de plástico biodegradable a partir de la quinua blanca se utilizó el programa Minitab Versión 20. El Análisis de la Varianza (ANOVA) es una técnica estadística que se utiliza para comparar la media de tres o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellas.

#### **3.5.1 Influencia de la temperatura, volumen de glicerina y volumen de ácido acético en el módulo tensil**

Los factores que más influyen en el módulo tensil del plástico biodegradable son el volumen de glicerina (a menor cantidad de glicerina, mayor es el módulo tensil), volumen de ácido acético (a menor cantidad de ácido acético, mayor es el módulo tensil) y la temperatura (a mayor temperatura, mayor es el módulo tensil).

En este apartado se analizó la influencia de estas tres variables independientes: la temperatura, volumen de glicerina y volumen de ácido acético.

### 3.5.2 Análisis estadístico de la variable respuesta módulo tensil

Para la realización del análisis estadístico para la variable respuesta módulo tensil del plástico biodegradable a partir de la quinua blanca, se tomaron los valores de la tabla III-5.

A continuación, se muestra la tabla III-16 y tabla III-17

**Tabla III-16 Resumen del diseño**

Factores:	3	Diseño de la base:	3; 8
Corridas:	24	Réplicas:	3
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

**Fuente:** Minitab 20, 2025

**Tabla III-17 Diseño factorial variable respuesta rendimiento**

Orden Corrida	PtCentra l	Bloques	Temperatura	Volumen Glicerina	Volumen Ac. Acético	Módulo tensil
1	1	1	66	10	30	16,143
2	1	1	70	10	30	21,085
3	1	1	66	20	30	13,469
4	1	1	70	20	30	15,53
5	1	1	66	10	70	12,098
6	1	1	70	10	70	16,636
7	1	1	66	20	70	11,386
8	1	1	70	20	70	13,366
9	1	1	66	10	30	16,37
10	1	1	70	10	30	21,463
11	1	1	66	20	30	12,848
12	1	1	70	20	30	15,266
13	1	1	66	10	70	12,961
14	1	1	70	10	70	17,64
15	1	1	66	20	70	10,692
16	1	1	70	20	70	13,663
17	1	1	66	10	30	17,361
18	1	1	70	10	30	22,472

19	1	1	66	20	30	12,875
20	1	1	70	20	30	15,671
21	1	1	66	10	70	12,587
22	1	1	70	10	70	16,751
23	1	1	66	20	70	10,868
24	1	1	70	20	70	13,849

**Fuente:** Minitab 20, 2025

### 3.5.3 Análisis de varianza (ANOVA)

**Tabla III-18 Coeficientes codificados variable respuesta modulo tensil**

<b>Término</b>	<b>Efecto</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
Constante		15,1271	0,0962	157,2	0	
Temperatura	3,6445	1,8222	0,0962	18,94	0	1
Volumen Glicerina	-3,6737	-1,8368	0,0962	-19,09	0	1
Volumen Ac. Acetico	-3,1713	-1,5857	0,0962	-16,48	0	1
Temperatura*Volumen Glicerina	-1,11	-0,555	0,0962	-5,77	0	1
Temperatura*Volumen Ac. Acetico	-0,0923	-0,0462	0,0962	-0,48	0,638	1
Volumen Glicerina*Volumen Ac. Acetico	1,1988	0,5994	0,0962	6,23	0	1
Temperatura*Volumen Glicerina*Volumen Ac. Acetico	0,2018	0,1009	0,0962	1,05	0,301	1

**Fuente:** Minitab 20, 2025

En la tabla III-18 el modelo estadístico contiene 3 efectos principales, 3 interacciones de dos factores y 1 de tres factores como puede observarse algunos de esos términos no son significativos estadísticamente. Con la idea de aclarar mejor cuales fuentes de variación son significativas y obtener un modelo final en el que solo se incluyan términos significativos, es usual construir un mejor ANOVA, en el que los efectos que claramente no son significativos se eliminan del análisis en la primera ronda y se mandan al error. A partir de los resultados de la tabla III-18, se realizó un nuevo análisis de varianza se obtuvieron los siguientes resultados:



**Tabla III-19 Coeficientes codificados variable respuesta modulo tensil 2**

<b>Término</b>	<b>Efecto</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
Constante		15,1271	0,0944	160,21	0	
Temperatura	3,6445	1,8222	0,0944	19,3	0	1
Volumen Glicerina	-3,6737	-1,8368	0,0944	-19,45	0	1
Volumen Ac. Acetico	-3,1713	-1,5857	0,0944	-16,79	0	1
Temperatura*Volumen Glicerina	-1,11	-0,555	0,0944	-5,88	0	1
Volumen Glicerina*Volumen Ac. Acetico	1,1988	0,5994	0,0944	6,35	0	1

**Fuente:** Minitab 20, 2025

En la tabla III-19 el FIV (Factor de Varianza Inflada) dio el valor de 1 esto nos informa acerca de la no presencia de multicolinealidad. La multicolinealidad se produce cuando las variables independientes (predictores) de un modelo de regresión presentan una alta correlación. Esta relación puede generar problemas significativos en el análisis de los datos, ya que dificulta determinar los efectos individuales de cada variable sobre la variable dependiente (respuesta).

**Tabla III-20 Resumen del modelo**

<b>S</b>	<b>R-cuadr</b>	<b>R-cuad (ajustado)</b>	<b>R-cuad</b>
0,462556	98,40%	97,96%	97,16%

**Fuente:** Minitab 20, 2025

La tabla III-20 nos muestra que el error estándar de la estimación muestra que la desviación estándar de los residuales es de 0,462556, esto indica que en relación con la magnitud de la variable de respuesta (módulo tensil), indica que las predicciones del modelo están muy cerca de los valores observados. El R-cuadrado indica que el modelo explica el 98,40 % de la variabilidad en el módulo tensil del plástico biodegradable esto nos indica que el modelo se ajusta extremadamente bien a los datos experimentales. El estadístico R-cuadrado ajustado explica que el 97,96% es muy cercano al R-cuadrado normal, lo cual es excelente y refuerza la idea de que los términos incluidos en el modelo son relevantes y no son redundantes.

**Tabla III-21 Análisis de varianza (ANOVA) para el módulo tensil con un nivel de significancia de 5 %**

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Modelo	5	237,029	47,4058	221,57	0
Lineal	3	221,013	73,6711	344,32	0
Temperatura	1	79,694	79,6943	372,48	0
Volumen Glicerina	1	80,975	80,975	378,46	0
Volumen Ac. Acetico	1	60,344	60,3441	282,04	0
Interacciones de 2 términos	2	16,016	8,0079	37,43	0
Temperatura*Volumen Glicerina	1	7,393	7,3926	34,55	0
Volumen Glicerina*Volumen Ac. Acetico	1	8,623	8,6232	40,3	0
Error	18	3,851	0,214		
Falta de ajuste	2	0,296	0,1478	0,67	0,528
Error puro	16	3,556	0,2222		
Total	23	240,88			

**Fuente:** Minitab 20, 2025

La tabla III-21 del análisis de varianza muestra la variabilidad de la respuesta modulo tensil en segmentos separados para cada uno de los efectos, luego nos muestra la significancia estadística de cada efecto por comparación de la media cuadrada contra una estimación del error experimental. Para el presente proyecto, los efectos principales tienen valores  $p < 0,05$ , indicando que son iguales a cero para un nivel de confianza de 95 %.

#### **3.5.4 Ecuación de la regresión lineal de la variable respuesta modulo tensil**

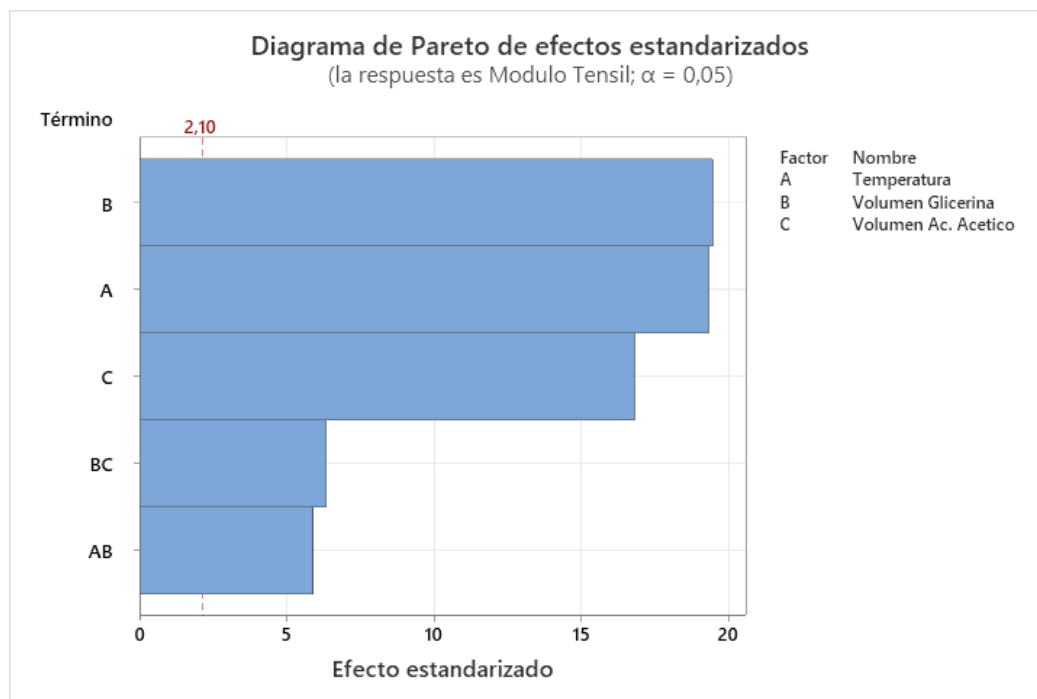
Esta ecuación relaciona específicamente los niveles de los factores temperatura, volumen de glicerina y volumen del ácido acético del diseño experimental planteado. De manera que la respuesta modulo tensil sea representativa de los resultados obtenidos en la experiencia.

**Modulo tensil** =  $-89,5 + 1,744 \text{ Temperatura} + 31,07 \text{ Volumen Glicerina} - 1,692 \text{ Volumen Ácido acético} - 0,5550 \text{ Temperatura*Volumen Glicerina} + 0,5994 \text{ Volumen Glicerina*Volumen Ácido acético}$

### 3.5.5 Diagrama Pareto

El diagrama de Pareto nos permite identificar visualmente los efectos importantes y comparar la magnitud relativa de los diversos efectos. Ver figura III-3

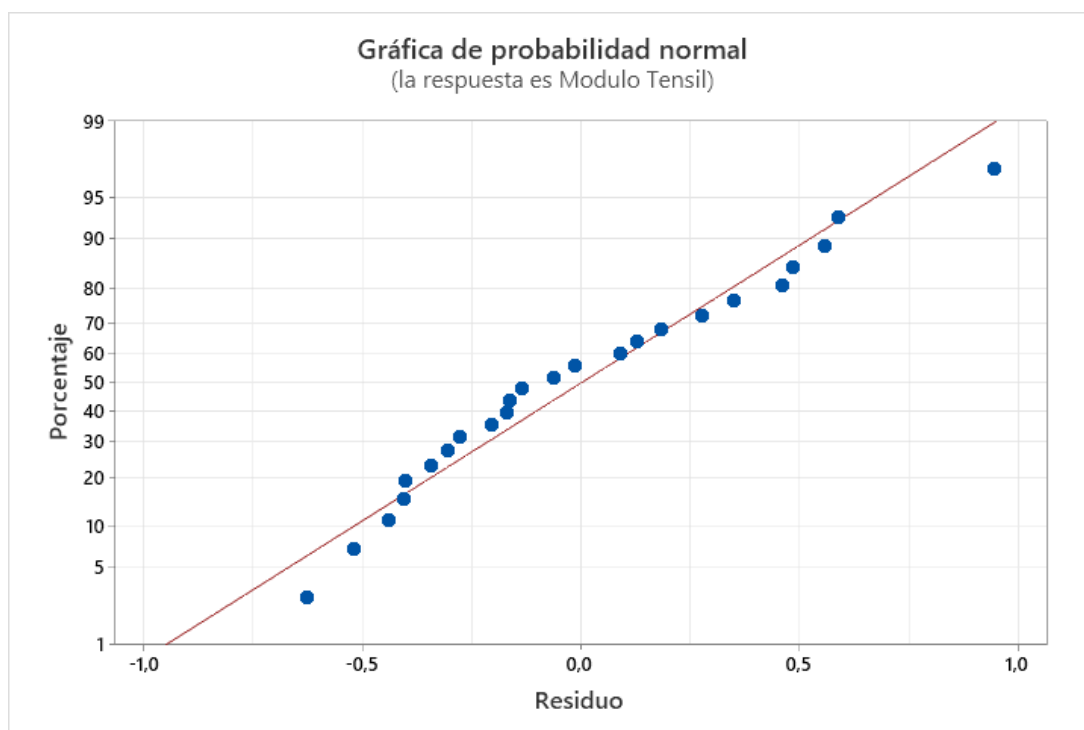
**Fig. III-3 Diagrama de Pareto del proceso de elaboración de plástico biodegradable**



**Fuente:** Minitab 20, 2025

Se puede observar en la figura III-3 a cada uno de los efectos estimados en orden decreciente, teniendo que el efecto más grande es el volumen de glicerina (B) porque es el que más se extiende, seguido por el factor (A) el cual es la temperatura. La línea vertical crítica de 2,10 se utiliza para juzgar cuales efectos son significativos. Cualquier barra que se prolonga más allá de esa línea corresponde a efectos que son estadísticamente significativos al nivel de confianza de 95 %.

**Fig. III-4 Gráfica de probabilidad normal**



**Fuente:** Minitab 20, 2025

En la figura III-4, nos permite verificar el supuesto de que los residuos están distribuidos de forma normal. En este caso los residuos se mantienen describiendo una línea recta y no se muestran patrones de distribución que indican que no están distribuidos normalmente, por lo tanto, no hay evidencia de no normalidad.

Cabe recalcar que cuando se emplea un diseño factorial  $2^k$ , se supone que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango de variación de cada uno de los factores estudiados. No es necesario suponer una linealidad perfecta, pero no debe existir una curvatura muy grande.

A continuación, se muestra los resultados de la variable respuesta modulo tensil en la tabla III-22

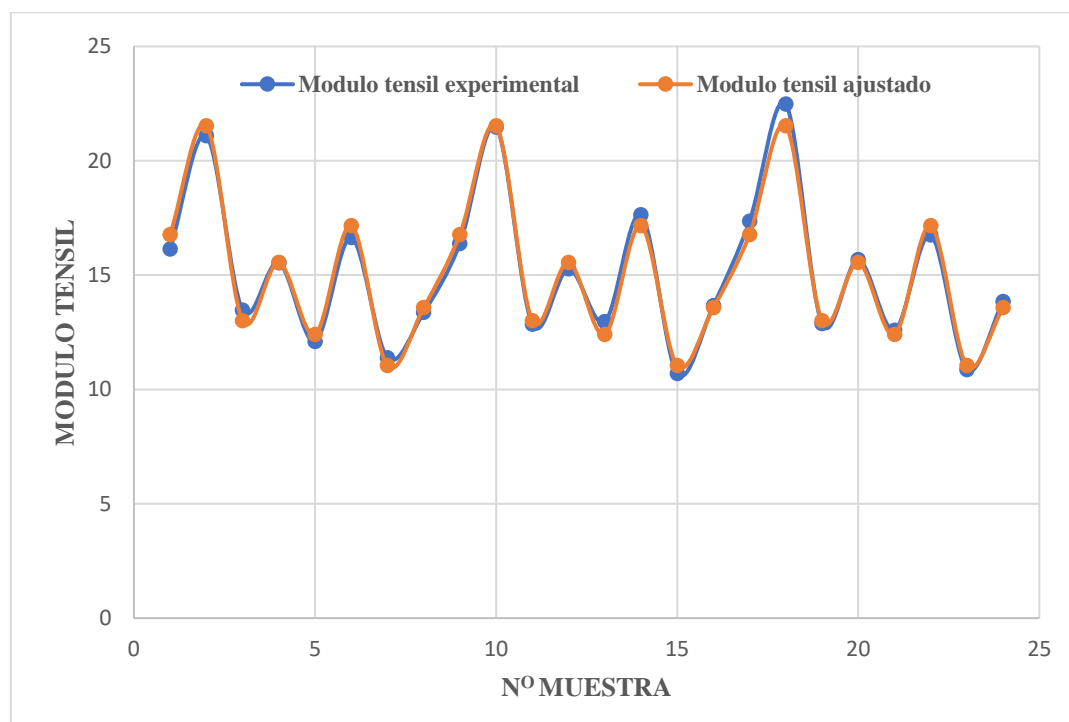
**Tabla III-22 Resultados de la variable respuesta modulo tensil**

<b>Muestra</b>	<b>Modulo tensil experimental</b>	<b>Modulo tensil ajustado</b>	<b>Residuos</b>
1	16,143	16,772	-0,629
2	21,085	21,526	-0,441
3	13,469	13,009	0,460
4	15,53	15,544	-0,014
5	12,098	12,402	-0,304
6	16,636	17,156	-0,520
7	11,386	11,037	0,349
8	13,366	13,571	-0,205
9	16,37	16,772	-0,402
10	21,463	21,526	-0,063
11	12,848	13,009	-0,161
12	15,266	15,544	-0,278
13	12,961	12,402	0,559
14	17,64	17,156	0,484
15	10,692	11,037	-0,345
16	13,663	13,571	0,092
17	17,361	16,772	0,589
18	22,472	21,526	0,946
19	12,875	13,009	-0,134
20	15,671	15,544	0,127
21	12,587	12,402	0,185
22	16,751	17,156	-0,405
23	10,868	11,037	-0,169
24	13,849	13,571	0,278

**Fuente:** Minitab 20, 2025

En la tabla III-22 el módulo tensil ajustado se refiere a la capacidad del modelo de regresión para explicar la variabilidad observada en la variable respuesta. El residuo es la diferencia entre un valor observado de la variable respuesta y su valor ajustado correspondiente.

**Fig. III-5 Comparación gráfica del módulo tensil experimental y el módulo tensil ajustado**



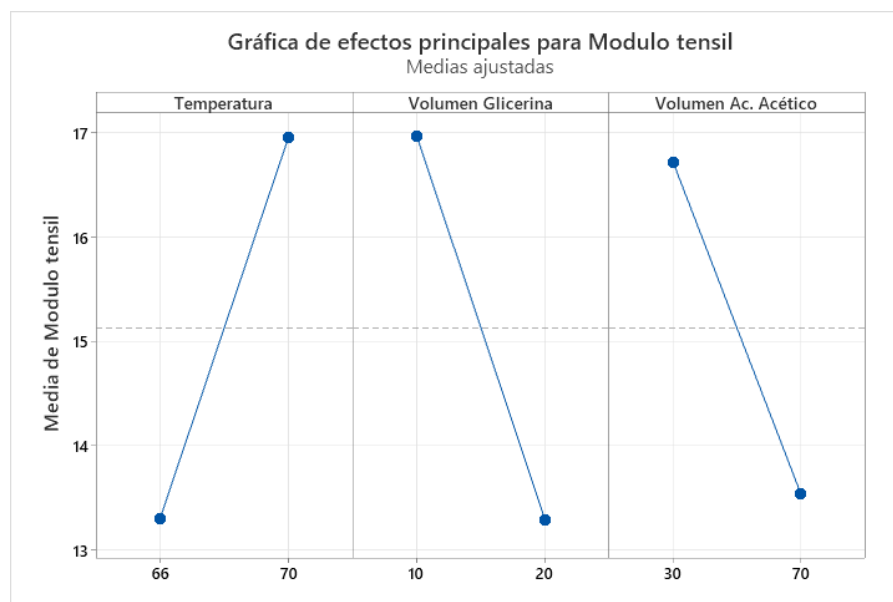
**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

En la figura III-5 permite visualizar la tendencia y la dispersión de los datos, facilitando la identificación de patrones o desviaciones significativas. En general el modelo muestra una capacidad razonable para predecir el módulo tensil. Estos resultados son fundamentales para evaluar la efectividad del modelo y para identificar posibles ajustes que podrían incrementar en futuras iteraciones.

### 3.5.6 Graficas factoriales para el módulo tensil

A continuación, se muestra la figura III-6

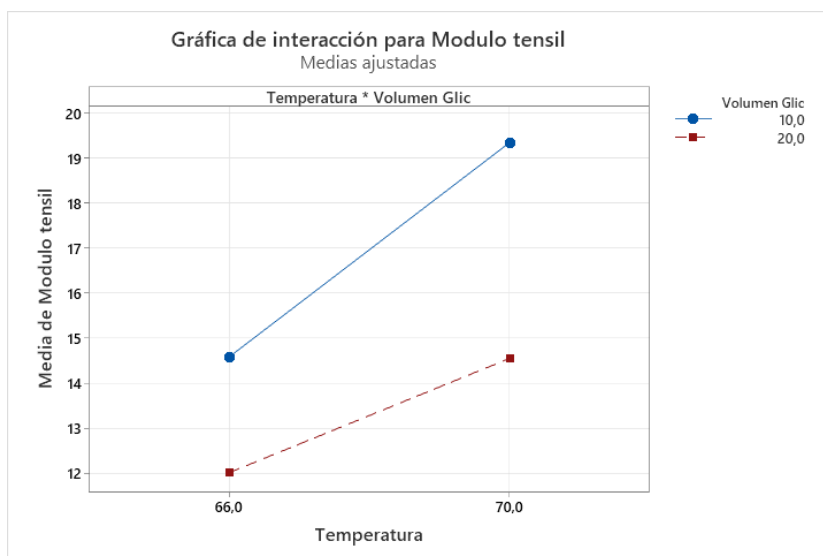
**Fig. III-6 Efectos principales para el módulo tensil**



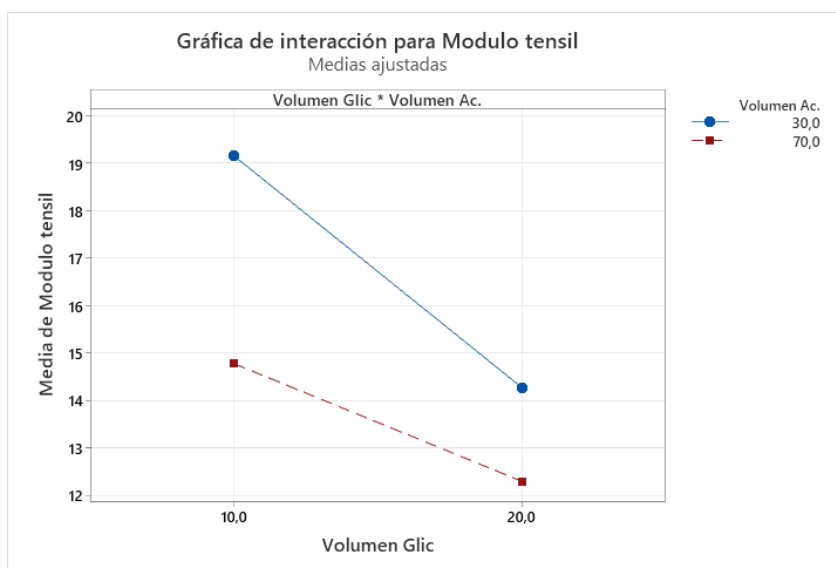
**Fuente:** Minitab 20, 2025

En la figura III-6 se observa los efectos principales, sabiendo que diferentes niveles del factor afectan la respuesta de manera diferente y mientras más inclinada sea la pendiente de la línea, mayor será la magnitud del efecto principal. Observando que una temperatura de 70°C, así como el volumen de glicerina con 10 ml tienen una alta tasa del módulo tensil y al respecto con el volumen de ácido acético, se observa que a la vez que se va incrementando dicho volumen de ácido acético, el módulo tensil disminuye, es por ello que se observa que con 30 ml de ácido acético el módulo tensil es elevado.

A continuación, se muestra la figura III-7 y figura III-8

**Fig. III-7 gráfica de interacción AB**

Fuente: Minitab 20, 2025

**Fig. III-8 gráfica de interacción BC**

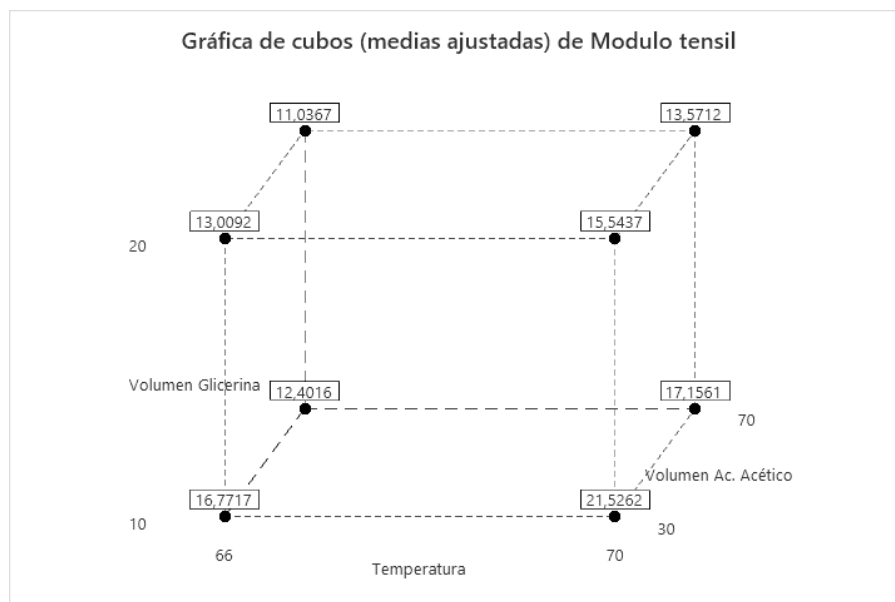
Fuente: Minitab 20, 2025

En la parte superior de la figura III-7 se muestra la interacción AB donde el factor A se encuentra en el eje horizontal, mientras que en la figura III-8 representa la interacción BC, pero ahora con el factor B está en el eje horizontal.



En la interacción AB se aprecia que, si A cambia de nivel bajo a alto, la variable respuesta (modulo tensil) se incrementa para ambos niveles del factor B. En la interacción BC se aprecia que, si se cambia el factor B de un nivel alto a bajo el módulo tensil aumenta para ambos niveles del factor C.

**Fig. III-9 Gráfica de cubos (medias ajustadas) del módulo tensil**



La figura III-9, nos permite visualizar y comprender fácilmente los efectos de múltiples factores sobre una respuesta, facilitando la identificación de las condiciones óptimas y la interpretación de las interacciones entre los factores. En consecuencia, observamos que el mejor modulo tensil obtenido es a una temperatura de 70 °C, volumen de glicerina 10 mL y un volumen de ácido acético 30 mL. Mientras que es el peor modulo tensil es a una temperatura de 66 °C, volumen de glicerina 20 mL y un volumen de ácido acético 70 mL.

### 3.6 Discusión preliminar

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que el plástico biodegradable elaborado a partir de la quinua blanca posee propiedades físicas, mecánicas y de biodegradabilidad que lo posicionan como un material prometedor para aplicaciones

comerciales, especialmente en el sector de empaques. A continuación, se discuten los hallazgos más relevantes:

Con la caracterización de la materia prima (quinua blanca) mostró una composición adecuada para la extracción de almidón, es rica en proteínas 12,79%, con un contenido moderado de grasas 5,58% y con un alto contenido de hidratos de carbono 67,66 %, un bajo porcentaje de cenizas 2,09 %. Estos resultados indican que la materia prima es rica en almidón, componente clave para la producción de bioplásticos, y presenta bajos niveles de impurezas que podrían afectar la calidad del producto final.

Con la caracterización del producto (plástico biodegradable), los resultados indican que la formulación del experimento 2 (70 °C, 10 mL de glicerina y 30 mL de ácido acético) es la óptima, ya que consistentemente arrojó las mejores características tanto en evaluaciones sensoriales como en pruebas mecánicas, presentó un módulo tensil de 21,673 MPa obtenido en la formulación óptima. Este valor no solo fue el más alto entre todas las formulaciones probadas, sino que también posiciona al bioplástico a partir de la quinua blanca como un material considerablemente más rígido en comparación con otros bioplásticos comerciales a base de almidón de maíz o papa. Esta alta rigidez, combinada con un esfuerzo máximo de 4,876 MPa, sugiere que el material posee una notable integridad estructural y puede soportar cargas significativas antes de fallar, también posee un alargamiento máximo del 19,035%, el bioplástico se mantiene dentro de los rangos estándar.

El espesor obtenido fue de 0,153 mm y solubilidad de 33,577%, valores que también se encuentran dentro de los límites esperados y referenciados, lo que valida la metodología de producción y asegura la consistencia del material.

Un hallazgo de gran relevancia es la baja permeabilidad al vapor de agua 0,00971 g/m<sup>2</sup>h\*Mpa. Este valor es significativamente bajo y competitivo, incluso superando a otros bioplásticos como el de almidón de maíz. Una barrera eficaz contra la humedad es una característica crucial para el empaque de alimentos, ya que ayuda a extender la vida útil de los productos al evitar su deterioro por la humedad. Este resultado posiciona

al bioplástico a partir de la quinua blanca como un candidato especialmente prometedor para esta aplicación.

La biodegradación en tierra el bioplástico mostró una biodegradación promedio del 52,064% en 35 días, lo que indica una alta susceptibilidad a la descomposición por microorganismos del suelo. La biodegradación en agua fue aún más notable 69,020%, destacando su potencial para reducir la contaminación en entornos acuáticos. Por otro lado, la baja biodegradación en aire 8,183% sugiere que el material mantiene su integridad cuando se expone a condiciones atmosféricas, lo que es ventajoso para su uso en empaques que requieren estabilidad durante su vida útil.

En conjunto, los resultados indican que el plástico biodegradable desarrollado a partir de la quinua blanca es un material multifacético y de alto rendimiento. Presenta una combinación favorable de rigidez, resistencia mecánica, una excelente barrera a la humedad y un perfil de biodegradación ideal. Estos resultados sugieren que no solo es una alternativa viable a los plásticos derivados del petróleo, sino también un competidor fuerte dentro del propio mercado de bioplásticos, con un potencial significativo para aplicaciones comerciales. Sin embargo, se recomienda continuar con estudios de escalamiento y pruebas en condiciones reales para validar su aplicabilidad a mayor escala.

### **3.7 Resumen de los resultados**

#### **3.7.1 Caracterización de la materia prima**

La quinua blanca se confirma como una materia prima excelente debido a su alto contenido de hidratos de carbono (67,66 %), lo que asegura un buen rendimiento de almidón. Su contenido es de proteínas (12,79 %), grasas (5,58 %), cenizas (2,09 %), humedad (11,88 %) y valor energético de 372 Kcal.

#### **3.7.2 Caracterización del plástico biodegradable**

La formulación optima fue del experimento 2, plástico biodegradable elaborado a 70°C, 10 mL de glicerina y 30 mL de ácido acético, resultado obtenido a partir del diseño factorial. Esta formulación no solo obtuvo la puntuación más alta en el análisis

sensorial 83%, sino que también presentó las mejores propiedades mecánicas, destacando un módulo tensil de 21,673 Mpa, esfuerzo máximo de 4,876 Mpa, elongación máxima de 19,035% y espesor de 0,153 mm. Con respecto a la permeabilidad de vapor de agua arrojó un valor de 0,00971 g/m·h·MPa, solubilidad del 33,577 % y finalmente el material exhibió un perfil de biodegradación ideal para un producto de empaque. En un período de 35 días, mostró una alta tasa de degradación en agua 69,020 % y en tierra 52,064 %. Por el contrario, su degradación en aire fue mínimo 8,183 %, lo que indica que es estable durante su vida útil, pero se descompone eficientemente una vez desechado.

**CAPITULO IV**  
**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA**

#### 4.1 Balance de materia para el proceso de obtención de plástico biodegradable

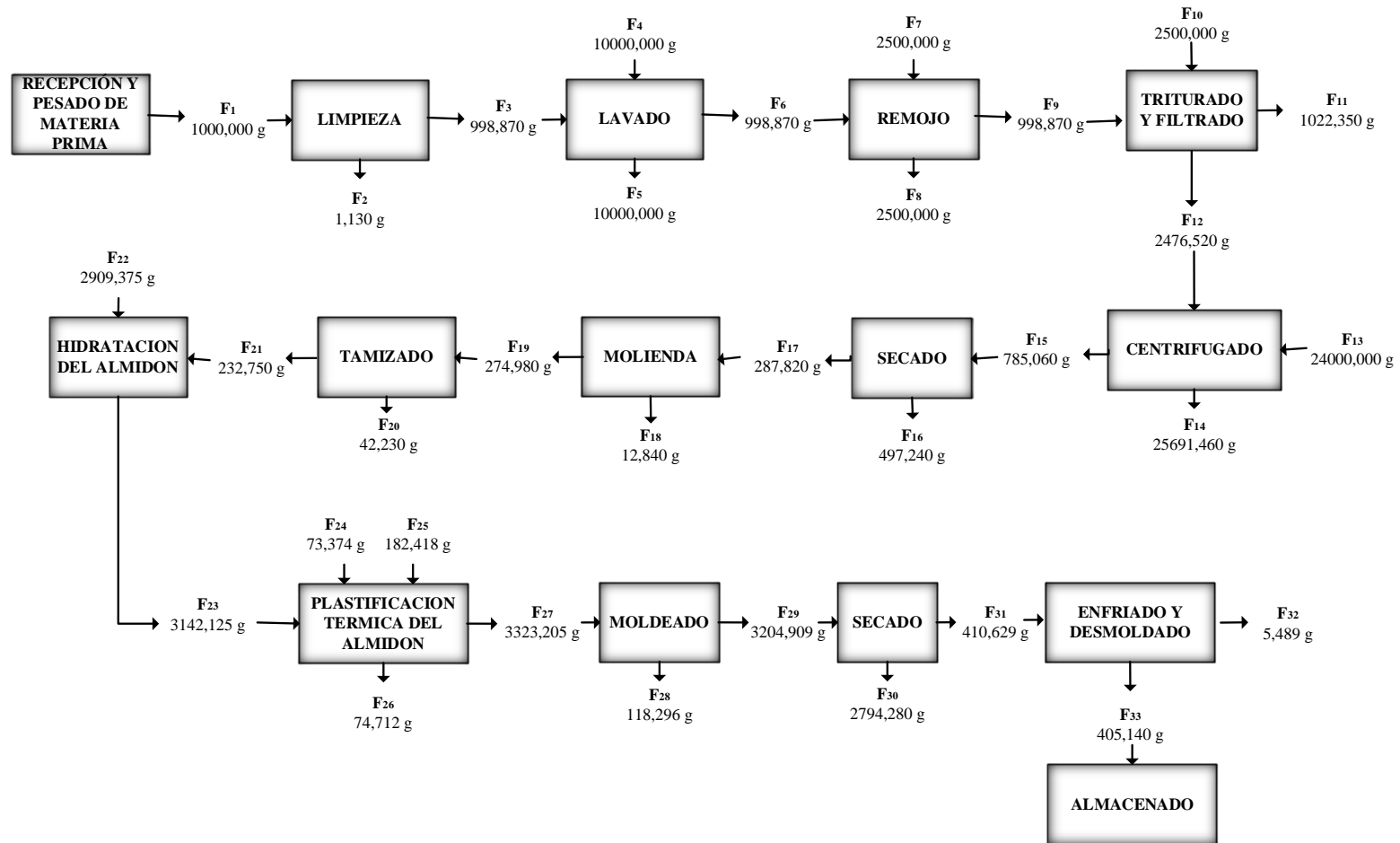
El balance de materia se realizó según los resultados obtenidos durante la parte experimental del proyecto además de la discusión de los mismos. A continuación, se muestra la nomenclatura utilizada en el balance de materia, ver tabla IV-1

**Tabla IV-1 Nomenclatura utilizada en el balance de materia**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripcion</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
<b>F1</b>	Masa de la quinua blanca	1000,000	g
<b>F2</b>	Masa de las pérdidas de la quinua blanca	1,130	g
<b>F3</b>	Masa de quinua blanca limpia	998,870	g
<b>F4</b>	Masa de agua de lavado	10000,000	g
<b>F5</b>	Masa de agua residual	10000,000	g
<b>F6</b>	Masa de quinua blanca lavada	998,870	g
<b>F7</b>	Masa de agua de lavado	2500,000	g
<b>F8</b>	Masa de agua residual	2500,000	g
<b>F9</b>	Masa de quinua blanca remojada	998,870	g
<b>F10</b>	Masade agua de lavado	2500,000	g
<b>F11</b>	Masa de sólidos y fibras	1022,350	g
<b>F12</b>	Masa de almidon diluido	2476,520	g
<b>F13</b>	Masa de agua de grifo	24000,000	g
<b>F14</b>	Masa de agua residual	25691,460	g
<b>F15</b>	Masa de almidon humedo	785,060	g
<b>F16</b>	Masa de agua evaporada	497,240	g
<b>F17</b>	Masa de almidon seco	287,820	g
<b>F18</b>	Masa de pérdidas de almidon molido	12,840	g
<b>F19</b>	Masa de almidon molido	274,980	g
<b>F20</b>	Masa de perdidas en el tamizado	42,230	g
<b>F21</b>	Masa de almidon tamizado	232,750	g
<b>F22</b>	Masa de agua destilada	2909,375	g
<b>F23</b>	Masa de la mezcla de almidon con agua destilada	3142,125	g
<b>F24</b>	Masa de la glicerina	73,374	g
<b>F25</b>	Masa del acido acetico	182,418	g
<b>F26</b>	Masa de agua evaporada	74,712	g
<b>F27</b>	Masa de la mezcla del plastico biodegradable	3323,205	g
<b>F28</b>	Masa de las pérdidas de moldeado	118,296	g
<b>F29</b>	Masa del plastico biodegradable moldeado	3204,909	g
<b>F30</b>	Masa de agua evaporada	2794,280	g
<b>F31</b>	Masa de plastico biodegradable seco	410,629	g
<b>F32</b>	Masa de las perdidas	5,489	g
<b>F33</b>	Masa del plastico biodegradable	405,140	g

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. IV-1 Diagrama del balance de materia del proceso de obtención del plástico biodegradable**

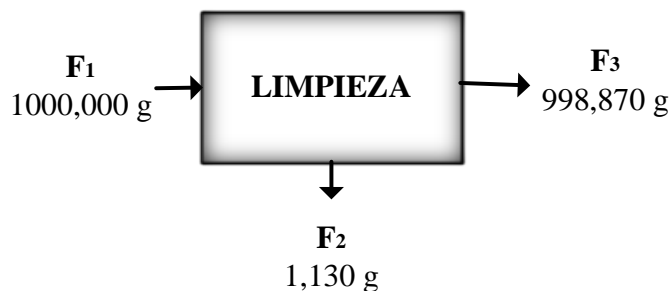


**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

#### 4.1.1 Balance de materia en la etapa de limpieza

En esta etapa se empleó 1000,000 g de quinua blanca. Posteriormente se hizo la limpieza de la quinua blanca, quitando los palitos, piedritas, etc. Ver figura IV-2

**Fig. IV-2 Diagrama de flujo en la etapa de limpieza**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de limpieza es:

$$F_1 = F_2 + F_3 \quad (\text{Ecuación IV-1})$$

**Donde:**

$F_1$  = Masa de la quinua blanca

$F_2$  = Masa de las pérdidas de la quinua blanca (piedritas, palitos, etc.)

$F_3$  = Masa de la quinua blanca limpia

El valor de la corriente  $F_1$  y  $F_2$  se conoce, mientras que la corriente  $F_3$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-1 se despeja la corriente  $F_3$  y se calcula este.

$$F_3 = F_1 - F_2$$

$$F_3 = 1000,000 \text{ g} - 1,130 \text{ g}$$

$$F_3 = 998,870 \text{ g}$$

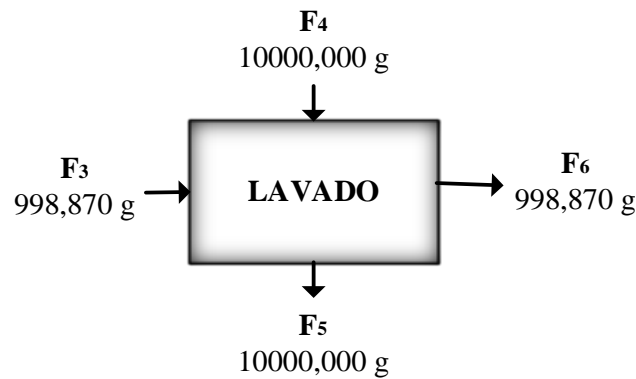
#### 4.1.2 Balance de materia en la etapa de lavado

En esta etapa se enjuagó completamente la quinua blanca con agua de grifo, con el fin de que estén totalmente limpias para evitar daños adversos. Para calcular la masa de



agua, se utilizó una densidad aproximada de 1 g/mL, asumiendo que un mililitro de agua equivale a un gramo. Ver figura IV-3

**Fig. IV-3 Diagrama de flujo en la etapa de lavado**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de lavado es:

$$F_3 + F_4 = F_5 + F_6 \quad (\text{Ecuación IV-2})$$

**Donde:**

$F_3$  = Masa de la quinua blanca limpia

$F_4$  = Masa de agua de lavado

$F_5$  = Masa de agua residual

$F_6$  = Masa de quinua blanca lavada

El valor de la corriente  $F_3$ ,  $F_4$  y  $F_5$  se conoce, mientras que la corriente  $F_6$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-2 se despeja la corriente  $F_6$  y se calcula este.

$$F_6 = F_3 + F_4 - F_5$$

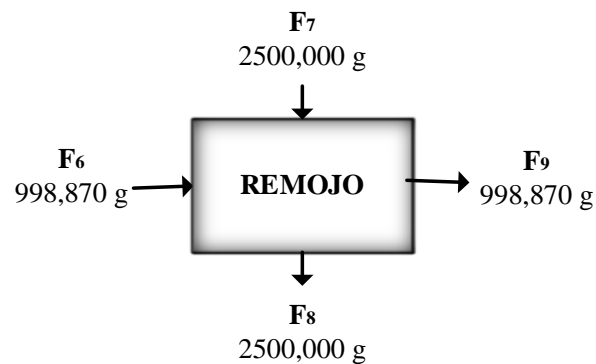
$$F_6 = 998,870 \text{ g} + 10000,000 \text{ g} - 10000,000 \text{ g}$$

$$F_6 = 998,870 \text{ g}$$

#### 4.1.3 Balance de materia en la etapa de remojo

En esta etapa se realiza el ablandamiento de la semilla (quinua blanca) por un periodo de 2 h en agua de grifo, tomando en cuenta que el agua cubra totalmente a la muestra de quinua, facilitando así un mejor ablandamiento de la semilla. Para calcular la masa de agua, se utilizó una densidad aproximada de 1 g/mL. Ver figura IV-4

**Fig. IV-4 Diagrama de flujo en la etapa de remojo**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de remojo es:

$$F_6 + F_7 = F_8 + F_9 \quad (\text{Ecuación IV-3})$$

**Donde:**

$F_6$  = Masa de la quinua blanca lavada

$F_7$  = Masa de agua de lavado

$F_8$  = Masa de agua residual

$F_9$  = Masa de quinua blanca remojada

El valor de la corriente  $F_6$ ,  $F_7$  y  $F_8$  se conoce, mientras que la corriente  $F_9$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-3 se despeja la corriente  $F_9$  y se calcula este.

$$F_9 = F_6 + F_7 - F_8$$

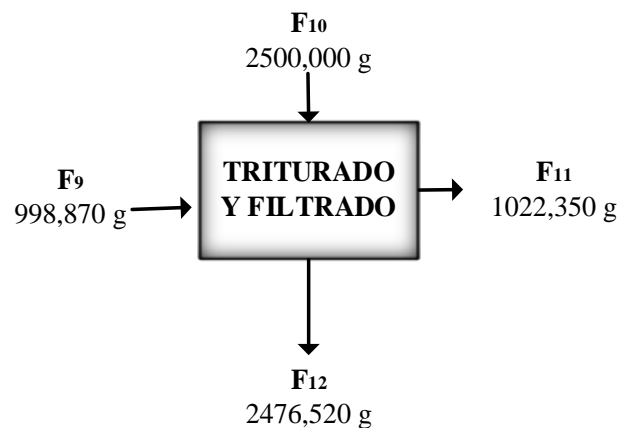
$$F_9 = 998,870 \text{ g} + 2500,000 \text{ g} - 2500,000 \text{ g}$$

$$F_9 = 998,870 \text{ g}$$

#### 4.1.4 Balance de materia en la etapa de triturado y filtrado

En esta etapa se trituro la quinua blanca con ayuda de una licuadora, se adicionó agua de grifo para poder triturar mejor. Posteriormente se procedió a filtrar la mezcla triturada, a través de un colador cubierto con una tela porosa con el fin de separar el resto de sólidos y fibras de la materia prima. Ver figura IV-5

**Fig. IV-5 Diagrama de flujo en la etapa de triturado y filtrado**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de triturado y filtrado es:

$$F_9 + F_{10} = F_{11} + F_{12} \quad (\text{Ecuación IV-4})$$

**Donde:**

$F_9$  = Masa de quinua blanca remojada

$F_{10}$  = Masa de agua de lavado

$F_{11}$  = Masa de sólidos

$F_{12}$  = Masa de almidón diluido

El valor de la corriente  $F_9$ ,  $F_{10}$  y  $F_{11}$  se conoce, mientras que la corriente  $F_{12}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-4 se despeja la corriente  $F_{12}$  y se calcula este.

$$F_{12} = F_9 + F_{10} - F_{11}$$

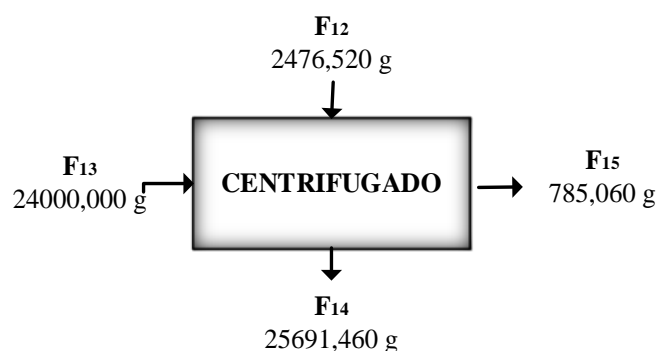
$$F_{12} = 998,870 \text{ g} + 2500,000 \text{ g} - 1022,350 \text{ g}$$

$$F_{12} = 2476,520 \text{ g}$$

#### 4.1.5 Balance de materia en la etapa de centrifugación

El objetivo de esta fase del proceso es la separación y purificación del almidón de quinua blanca. Para ello, se utiliza la centrifugación como método para separar la fracción sólida (almidón) de la suspensión acuosa. De manera subsecuente, se realizan lavados para purificar el producto. Este ciclo de lavado y centrifugación se efectuó por cuadruplicado, garantizando así la eliminación eficaz de impurezas solubles y otros componentes no deseados. Ver figura IV-6

**Fig. IV-6 Diagrama de flujo en la etapa de centrifugado**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de centrifugado es:

$$F_{12} + F_{13} = F_{15} + F_{14} \quad (\text{Ecuación IV-5})$$

**Donde:**

$F_{12}$  = Masa de almidón diluido

$F_{13}$  = Masa de agua de grifo

$F_{14}$  = Masa de agua residual

$F_{15}$  = Masa de almidón húmedo

El valor de la corriente  $F_{12}$ ,  $F_{13}$  y  $F_{14}$  se conoce, mientras que la corriente  $F_{15}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-5 se despeja la corriente  $F_{15}$  y se calcula este.

$$F_{15} = F_{12} + F_{13} - F_{14}$$

$$F_{15} = 2476,520 \text{ g} + 24000,000 \text{ g} - 25691,460 \text{ g}$$

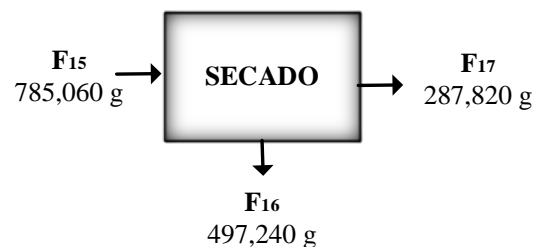
$$F_{15} = 785,060 \text{ g}$$

#### 4.1.6 Balance de materia en la etapa de secado

El almidón húmedo obtenido se somete a calor para eliminar una gran parte del agua.

Ver Figura IV-7

**Fig. IV-7 Diagrama de flujo en la etapa de secado**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de centrifugado es:

$$F_{15} = F_{16} + F_{17} \quad \text{(Ecuación IV-6)}$$

**Donde:**

$F_{15}$  = Masa de almidón húmedo

$F_{16}$  = Masa de agua evaporada

$F_{17}$  = Masa de almidón seco

El valor de la corriente  $F_{15}$  y  $F_{17}$  se conoce, mientras que la corriente  $F_{16}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-6 se despeja la corriente  $F_{16}$  y se calcula este.

$$F_{16} = F_{15} - F_{17}$$

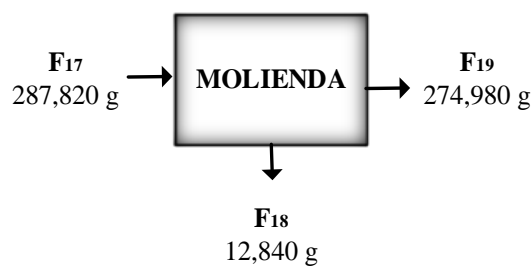
$$F_{16} = 785,060 \text{ g} - 287,820 \text{ g}$$

$$F_{16} = 497,240 \text{ g}$$

#### 4.1.7 Balance de materia en la etapa de molienda

En esta etapa el almidón seco, se muele con ayuda de un mortero de porcelana hasta convertirlo en un polvo fino y homogéneo. Ver figura IV-8

**Fig. IV-8 Diagrama de flujo en la etapa de molienda**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de centrifugado es:

$$F_{17} = F_{18} + F_{19} \quad \text{(Ecuación IV-7)}$$

**Donde:**

$F_{17}$  = Masa de almidón seco

$F_{18}$  = Masa de pérdidas del almidón molido

$F_{19}$  = Masa de almidón molido

El valor de la corriente  $F_{18}$  y  $F_{17}$  se conoce, mientras que la corriente  $F_{19}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-7 se despeja la corriente  $F_{19}$  y se calcula este.

$$F_{19} = F_{17} - F_{18}$$

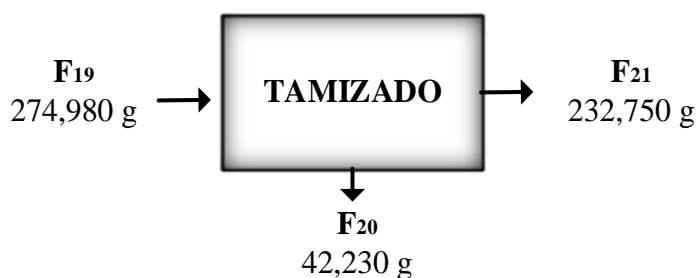
$$F_{19} = 287,820 \text{ g} - 12,840 \text{ g}$$

$$F_{19} = 274,980 \text{ g}$$

#### 4.1.8 Balance de materia en la etapa de tamizado

En esta etapa el almidón molido se hace pasar por mallas desde 0,5 mm hasta la última malla que es de 0,063 mm, para asegurar que todas las partículas tengan una granulometría uniforme. Ver figura IV-9

**Fig. IV-9 Diagrama de flujo en la etapa de tamizado**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de centrifugado es:

$$F_{19} = F_{20} + F_{21} \quad \text{(Ecuación IV-8)}$$

**Donde:**

$F_{19}$  = Masa de almidón molido

$F_{20}$  = Masa de perdidas en el tamizado

$F_{21}$  = Masa de almidón tamizado

El valor de la corriente  $F_{19}$  y  $F_{20}$  se conoce, mientras que la corriente  $F_{21}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación 3-4 se despeja la corriente  $F_{21}$  y se calcula este.

$$F_{21} = F_{19} - F_{20}$$

$$F_{21} = 274,980 \text{ g} - 42,230 \text{ g}$$

$$F_{21} = 232,750 \text{ g}$$

A continuación, se presenta la tabla IV-1 y tabla IV-2, donde se puede observar todas las corrientes de todas la etapas o procesos en la obtención experimental del plástico biodegradable.

**Tabla IV-2 Corrientes del balance de materia para cada experimento y replica**

Muestra	F21 (g)	F22 (g)	F23 (g)	F24 (g)	F25 (g)	F26 (g)	F27 (g)	
Y1	232,750	2909,375	3142,125	73,374	182,418	67,672	3330,245	Réplica 1
Y2	232,750	2909,375	3142,125	73,374	182,418	77,040	3320,877	
Y3	232,750	2909,375	3142,125	146,749	182,418	74,073	3397,219	
Y4	232,750	2909,375	3142,125	146,749	182,418	80,357	3390,935	
Y5	232,750	2909,375	3142,125	73,374	425,642	78,088	3563,053	
Y6	232,750	2909,375	3142,125	73,374	425,642	95,137	3546,004	
Y7	232,750	2909,375	3142,125	146,749	425,642	87,921	3626,594	
Y8	232,750	2909,375	3142,125	146,749	425,642	95,951	3618,564	
Y9	232,750	2909,375	3142,125	73,374	182,418	65,985	3331,933	Réplica 2
Y10	232,750	2909,375	3142,125	73,374	182,418	74,073	3323,845	
Y11	232,750	2909,375	3142,125	146,749	182,418	82,626	3388,665	
Y12	232,750	2909,375	3142,125	146,749	182,418	88,038	3383,254	
Y13	232,750	2909,375	3142,125	73,374	425,642	72,734	3568,407	
Y14	232,750	2909,375	3142,125	73,374	425,642	83,441	3557,700	
Y15	232,750	2909,375	3142,125	146,749	425,642	92,867	3621,648	
Y16	232,750	2909,375	3142,125	146,749	425,642	101,886	3612,629	
Y17	232,750	2909,375	3142,125	73,374	182,418	64,239	3333,678	Réplica 3
Y18	232,750	2909,375	3142,125	73,374	182,418	73,025	3324,892	
Y19	232,750	2909,375	3142,125	146,749	182,418	76,924	3394,368	
Y20	232,750	2909,375	3142,125	146,749	182,418	86,118	3385,174	
Y21	232,750	2909,375	3142,125	73,374	425,642	75,818	3565,323	
Y22	232,750	2909,375	3142,125	73,374	425,642	82,044	3559,097	
Y23	232,750	2909,375	3142,125	146,749	425,642	90,365	3624,150	
Y24	232,750	2909,375	3142,125	146,749	425,642	108,811	3605,705	

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025



**Tabla IV-3 Corrientes del balance de materia para cada experimento y replica**

Muestra	F28 (g)	F29 (g)	F30 (g)	F31 (g)	F32 (g)	F33 (g)	
Y1	105,319	3224,926	2805,336	419,590	6,342	413,248	Réplica 1
Y2	118,528	3202,349	2791,254	411,095	5,295	405,800	
Y3	129,176	3268,043	2839,259	428,784	5,470	423,314	
Y4	118,644	3272,290	2844,089	428,202	6,808	421,394	
Y5	108,927	3454,126	3004,919	449,208	5,761	443,447	
Y6	86,874	3459,131	3017,604	441,527	5,470	436,057	
Y7	108,869	3517,725	3062,408	455,317	3,084	452,233	
Y8	106,716	3511,848	3058,044	453,804	5,586	448,218	Réplica 2
Y9	110,498	3221,435	2806,500	414,935	6,168	408,767	
Y10	114,979	3208,866	2796,317	412,549	5,644	406,905	
Y11	131,271	3257,394	2825,178	432,217	5,935	426,282	
Y12	104,505	3278,749	2854,853	423,896	5,877	418,019	
Y13	110,382	3458,025	3014,113	443,912	5,702	438,210	
Y14	85,827	3471,874	3020,979	450,895	5,411	445,484	
Y15	120,972	3500,676	3048,967	451,710	5,121	446,589	Réplica 3
Y16	98,919	3513,710	3058,451	455,259	5,295	449,964	
Y17	62,842	3270,836	2858,985	411,851	5,877	405,974	
Y18	121,379	3203,513	2795,269	408,244	5,528	402,716	
Y19	138,021	3256,347	2825,585	430,762	6,110	424,652	
Y20	107,123	3278,051	2850,955	427,096	6,284	420,812	
Y21	102,346	3462,977	3017,260	445,716	5,528	440,188	
Y22	92,617	3466,480	3030,539	435,941	5,644	430,297	
Y23	108,636	3515,514	3064,736	450,779	3,724	447,055	
Y24	99,559	3506,146	3058,626	447,520	4,888	442,632	

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

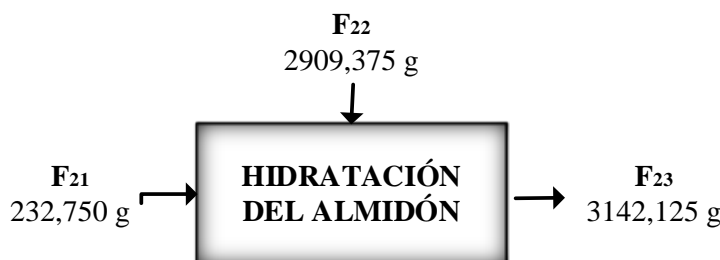
Debido a que la mejor muestra obtenida es del experimento 2 se tomara sus réplicas Y2, Y19 y Y18 correspondientes, se tomara el promedio de las réplicas para el balance de materia del plástico biodegradable, donde dicha muestra fue obtenida a 70°C, 10 mL de glicerina y 30 mL de ácido cetico.

Nota: Los datos en el balance de materia se encuentran escalados a partir de 232,750 g de almidón de quinua blanca para todas las etapas del proceso de elaboración de plástico biodegradable. El factor de escala es de 5,819.

#### 4.1.9 Balance de materia en la etapa de hidratación del almidón

En esta etapa se empleó 40,000 g de almidón de la quinua blanca. Considerando la densidad del agua destilada igual a 1 g/mL, por lo que se utilizó 500 mL de agua destilada para la mezcla de agua con almidón de la quinua blanca. Empleando el factor de escala se tiene los siguientes resultados, Ver figura IV-10

**Fig. IV-10 Diagrama de flujo en la etapa de hidratación del almidón**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de agitación previa es:

$$F_{21} + F_{22} = F_{23} \quad (\text{Ecuación IV-9})$$

**Donde:**

$F_{21}$  = Masa del almidón

$F_{22}$  = Masa del agua destilada

$F_{23}$  = Masa de la mezcla del almidón con agua destilada

El valor de la corriente  $F_{21}$  y la corriente  $F_{22}$  se conoce, mientras que la corriente  $F_{23}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-9 se despeja la corriente  $F_{23}$  y se calcula este.

$$F_{23} = F_{21} + F_{22}$$

$$F_{23} = 232,750 \text{ g} + 2909,375 \text{ g}$$

$$F_{23} = 3142,125 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de agitación previa se detallan en la tabla IV-2.

#### 4.1.10 Balance de materia en la plastificación térmica del almidón

La agitación con calentamiento se realizó en un agitador magnético a una temperatura de 70°C y tiempo de 20 min. Se adicionó 10 mL de glicerina y 30 mL de ácido acético. En esta etapa se registró una masa de solución evaporada durante la agitación con calentamiento. Para el balance se tomó el valor promedio de la masa de la mezcla del plástico biodegradable obtenido de la tabla IV-1 del experimento 2 con sus 3 réplicas Y2, Y10 y Y18.

**Tabla IV-4 Masa promedio de la mezcla de plástico biodegradable obtenido**

Replica	F <sub>27</sub> (g)
<b>Y2</b>	570,720
<b>Y10</b>	571,230
<b>Y18</b>	571,410
<b>Promedio</b>	571,120

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

De acuerdo al factor de escala, la cantidad de mezcla obtenida del plástico biodegradable es  $F_{27} = 3323,205 \text{ g}$

Se consideró la densidad de la glicerina de 1,261 g/mL (Proint,2025)

$$\rho_{\text{glicerina}} = \frac{F_{24}}{V_{\text{glicerina}}} \quad (\text{Ecuación IV-10})$$

Se calcula la masa de la glicerina de la siguiente manera

$$F_{24} = V_{\text{glicerina}} * \rho_{\text{glicerina}}$$

$$F_{24} = 10 \text{ mL} * 1,261 \text{ g/mL}$$

$$F_{24} = 12,610 \text{ g}$$

De acuerdo al factor de escala, la cantidad de glicerina viene a ser:  $F_{24} = 73,374 \text{ g}$

Se consideró la densidad del ácido acético de  $1,045 \text{ g/mL}$  (Transchem,2020)

$$\rho_{\text{Ac.acetico}} = \frac{F_{25}}{V_{\text{Ac.acetico}}} \quad (\text{Ecuación IV-11})$$

Se calcula la masa del ácido acético de la siguiente manera

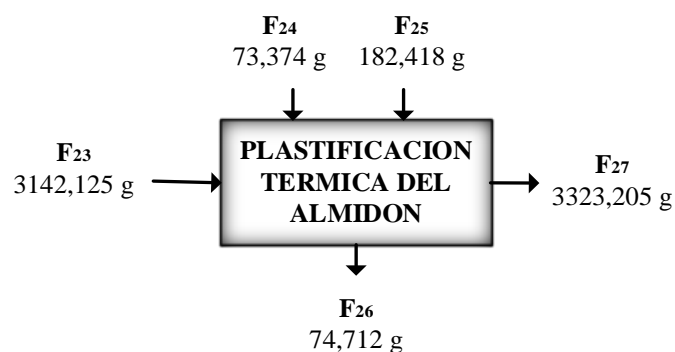
$$F_{25} = V_{\text{Ac. acetico}} * \rho_{\text{Ac.acetico}}$$

$$F_{25} = 30 \text{ mL} * 1,045 \text{ g/mL}$$

$$F_{25} = 31,350 \text{ g}$$

De acuerdo al factor de escala, la cantidad de ácido acético es:  $F_{25} = 182,418 \text{ g}$

**Fig. IV-11 Diagrama de flujo en la etapa de plastificación térmica del almidón**



**Fuente** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de plastificación térmica del almidón es:

$$F_{23} + F_{24} + F_{25} = F_{26} + F_{27} \quad (\text{Ecuación IV-12})$$

**Donde:**

$F_{23}$  = Masa de la mezcla del almidón con agua destilada

$F_{24}$  = Masa de la glicerina

$F_{25}$  = Masa del ácido acético

$F_{26}$  = Masa de agua evaporada

$F_{27}$  = Masa de la mezcla del plástico biodegradable

El valor de la corriente  $F_{23}$ , la corriente  $F_{24}$ , la corriente  $F_{25}$  y la corriente  $F_{27}$ , mientras que la corriente  $F_{26}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-12 se despeja la corriente  $F_{26}$  y se calcula este.

$$F_{26} = F_{23} + F_{24} + F_{25} - F_{27}$$

$$F_{26} = 3142,125 \text{ g} + 73,374 \text{ g} + 182,418 \text{ g} - 3323,205 \text{ g}$$

$$F_{26} = 74,712 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de agitación con calentamiento se detallan en la tabla IV-2.

#### 4.1.11 Balance de materia en la etapa de moldeado

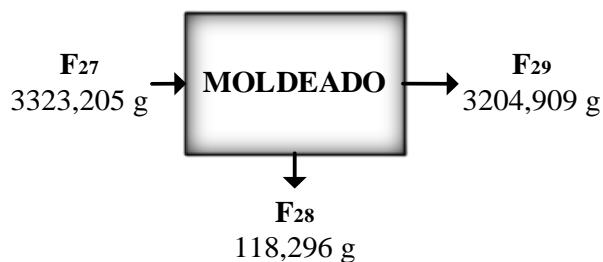
En esta etapa se registró una masa de pérdidas durante el moldeado del plástico biodegradable. Para el balance se tomó el valor promedio de la masa de la mezcla del plástico biodegradable obtenido de la tabla IV-3 del experimento 2 con sus 3 réplicas Y2, Y10 y Y18

**Tabla IV-5 Masa promedio de la mezcla de plástico biodegradable**

<b>Replica</b>	<b><math>F_{29}</math> (g)</b>
<b>Y2</b>	3202,349
<b>Y10</b>	3208,866
<b>Y18</b>	3203,513
<b>Promedio</b>	3204,909

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. IV-12 Diagrama de flujo en la etapa de moldeado**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de moldeado es:

$$F_{27} = F_{29} + F_{28} \quad (\text{Ecuación IV-13})$$

**Donde:**

$F_{27}$  = Masa de la mezcla del plástico biodegradable

$F_{28}$  = Masa de las pérdidas de moldeado

$F_{29}$  = Masa del plástico biodegradable moldeado

El valor de la corriente  $F_{27}$  y la corriente  $F_{29}$  se conocen, mientras que la corriente  $F_{28}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-13 se despeja la corriente  $F_{28}$  y se calcula este.

$$F_{28} = F_{27} - F_{29}$$

$$F_{28} = 3323,205 \text{ g} - 3204,909 \text{ g}$$

$$F_{28} = 118,296 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de agitación con calentamiento se detallan en la tabla IV-3.

#### **4.1.12 Balance de materia en el secado**

El secado del plástico biodegradable se realizó en una estufa a una temperatura de 40 °C por 12 h. En esta etapa se registró una masa de agua evaporada durante el secado

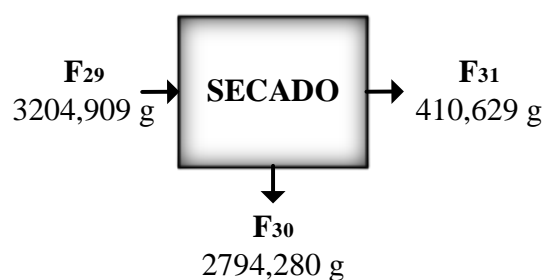
del plástico biodegradable. Para el balance se tomó el valor promedio de la masa del plástico biodegradable luego del secado, obtenido del experimento 2 con sus 3 réplicas Y2, Y10 y Y18. Ver tabla IV-3

**Tabla IV-6 Masa promedio del plástico biodegradable luego del secado**

Replica	F <sub>31</sub> (g)
Y2	411,095
Y10	412,549
Y18	408,244
Promedio	410,629

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. IV-13 Diagrama de flujo en la etapa de secado**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de secado es:

$$F_{29} = F_{31} + F_{30} \quad (\text{Ecuación IV-14})$$

**Donde:**

$F_{29}$  = Masa del plástico biodegradable moldeado

$F_{30}$  = Masa de agua evaporada

$F_{31}$  = Masa del plástico biodegradable luego del secado

El valor de la corriente  $F_{29}$  y la corriente  $F_{31}$  se conocen, mientras que la corriente  $F_{30}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-14 se despeja la corriente  $F_{30}$  y se calcula este.

$$F_{30} = F_{29} - F_{31}$$

$$F_{30} = 3204,909 \text{ g} - 410,629 \text{ g}$$

$$F_{30} = 2794,280 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de agitación con calentamiento se detallan en la tabla IV-3.

#### 4.1.13 Balance de materia en la etapa de enfriado y desmoldado

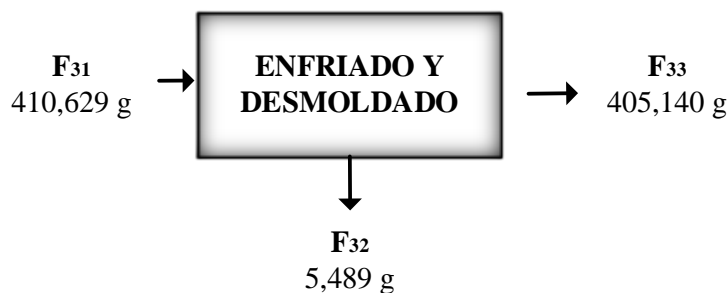
Una vez enfriado el plástico biodegradable se procede a desmoldar. En esta etapa se registró una masa de las perdidas al desmoldar el plástico biodegradable. Para el balance se tomó el valor promedio de la masa del plástico biodegradable final, obtenido del experimento 2 con sus 3 réplicas Y2, Y10 y Y18. Ver tabla IV-3

**Tabla IV-7 Masa promedio del plástico biodegradable final**

Replica	F <sub>33</sub> (g)
Y2	405,800
Y10	406,905
Y18	402,716
Promedio	405,140

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Fig. IV-14 Diagrama de flujo en la etapa de enfriado y desmoldado**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El balance global en la etapa de enfriado y desmoldado es:

$$F_{31} = F_{32} + F_{33} \quad \text{(Ecuación IV-15)}$$



**Donde:**

$F_{31}$  = Masa del plástico biodegradable luego del secado

$F_{32}$  = Masa de las pérdidas

$F_{33}$  = Masa del plástico biodegradable final

El valor de la corriente  $F_{31}$  y la corriente  $F_{33}$  se conocen, mientras que la corriente  $F_{32}$  no se conoce, para lo cual con la ayuda de la ecuación IV-15 se despeja la corriente  $F_{32}$  y se calcula este.

$$F_{30} = F_{31} - F_{33}$$

$$F_{30} = 410,629 \text{ g} - 405,140 \text{ g}$$

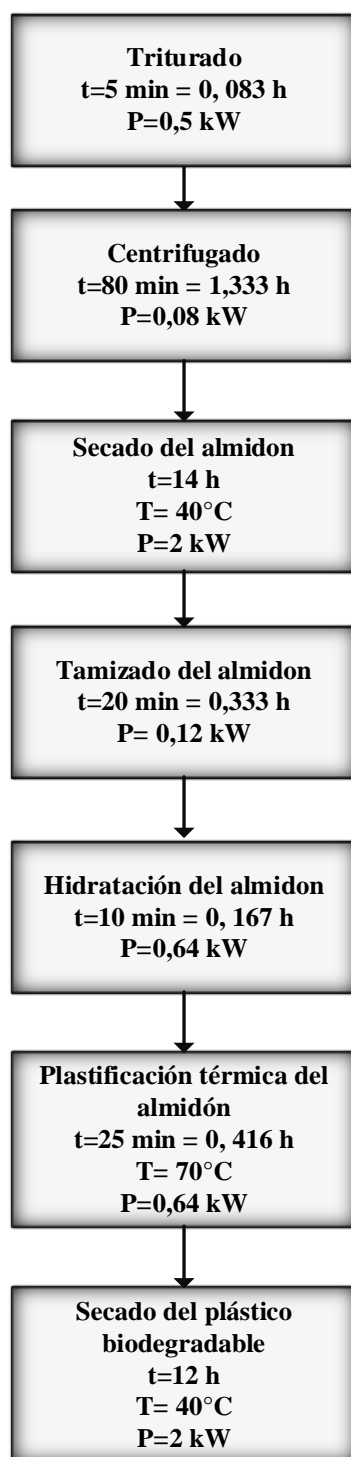
$$F_{30} = 5,489 \text{ g}$$

Los valores obtenidos de cada experimento y réplica de las corrientes de la etapa de agitación con calentamiento se detallan en la tabla IV-3.

**4.2 Balance de energía**

Para realizar el balance de energía, es necesario considerar los procesos que implican un intercambio de energía dentro del sistema. Para la determinación de los costos energéticos, se toma en cuenta la potencia consumida por cada equipo en función del tiempo. A continuación, se muestra la figura IV-15 resumen de los datos con los que se trabajó el balance.

**Fig. IV-15 Diagrama del balance de energía del proceso de obtención del plástico biodegradable a partir de la quinua blanca**



**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

#### 4.2.1 Balance de energía en la etapa de triturado

##### Datos

Tiempo =  $t = 0,083$  h

Potencia de la licuadora =  $P_{\text{licuadora}} = 1$  kW

Energía consumida por la licuadora =  $E_{\text{licuadora}}$

Para calcular la energía consumida en la etapa de triturado se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{licuadora}} = P_{\text{licuadora}} \times t \quad (\text{Ecuación IV-16})$$

$$E_{\text{licuadora}} = 1 \text{ kW} \times 0,083 \text{ h}$$

$$E_{\text{licuadora}} = 0,083 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{licuadora}} = 0,083 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 298,800 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de triturado es 298,800 kJ.

#### 4.2.2 Balance de energía en la etapa de centrifugado

##### Datos

Tiempo =  $t = 1,333$  h

Potencia centrifuga =  $P_{\text{centrifuga}} = 0,080$  kW

Energía consumida por la centrifuga =  $E_{\text{centrifuga}}$

Para calcular la energía consumida en la etapa de centrifugado se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{centrifuga}} = P_{\text{centrifuga}} \times t \quad (\text{Ecuación IV-17})$$

$$E_{\text{centrifuga}} = 0,080 \text{ kW} \times 1,333 \text{ h}$$

$$E_{\text{centrifuga}} = 0,107 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{centrifuga}} = 0,107 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 385,200 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de centrifugado es 385,000 kJ.

### 4.2.3 Balance de energía en la etapa de secado del almidón

#### Datos

$$\text{Tiempo} = t = 14 \text{ h}$$

$$\text{Potencia de la estufa} = P_{\text{estufa}} = 2 \text{ kW}$$

$$\text{Energía consumida por la estufa} = E_{\text{estufa}}$$

Para calcular la energía consumida en la etapa de secado del almidón se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{estufa}} = P_{\text{estufa}} \times t \quad (\text{Ecuación IV-18})$$

$$E_{\text{estufa}} = 2 \text{ kW} \times 14 \text{ h}$$

$$E_{\text{centrifuga}} = 28,000 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{estufa}} = 28,000 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 100800,000 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de secado del almidón es 100800,000 kJ.

### 4.2.4 Balance de energía en la etapa del tamizador

#### Datos

$$\text{Tiempo} = t = 0,333 \text{ h}$$

$$\text{Potencia del tamizador} = P_{\text{tamizador}} = 0,12 \text{ kW}$$

$$\text{Energía consumida por el tamizador} = E_{\text{tamizador}}$$

Para calcular la energía consumida en la etapa de tamizado del almidón se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{tamizador}} = P_{\text{tamizador}} \times t \quad (\text{Ecuación IV-18})$$

$$E_{\text{tamizador}} = 0,12 \text{ kW} \times 0,333 \text{ h}$$

$$E_{\text{tamizador}} = 0,040 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{estufa}} = 0,040 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 144,000 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de tamizado del almidón es 3,6 kJ.

#### 4.2.5 Balance en la etapa de hidratación del almidón

##### Datos

$$\text{Tiempo} = t = 0,167 \text{ h}$$

$$\text{Potencia de la estufa} = P_{\text{agitador}} = 0,640 \text{ kW}$$

$$\text{Energía consumida por el agitador} = E_{\text{agitador}}$$

Para calcular la energía consumida en la etapa de hidratación del almidón se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{agitador}} = P_{\text{agitador}} \times t \quad (\text{Ecuación IV-19})$$

$$E_{\text{agitador}} = 0,640 \text{ kW} \times 0,167 \text{ h}$$

$$E_{\text{agitador}} = 0,107 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{agitador}} = 0,107 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 385,200 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de hidratación del almidón es 385,200 kJ.

#### 4.2.6 Balance de energía en la etapa de plastificación térmica del almidón

##### Datos

$$\text{Tiempo} = t = 0,416 \text{ h}$$

$$\text{Temperatura} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Potencia del calentador – agitador magnético =  $P_{\text{calentador}} = 0,640 \text{ Kw}$

Energía consumida por el calentador – agitador magnético =  $E_{\text{calentador}}$

Para calcular la energía consumida en la etapa de plastificación térmica del almidón se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{calentador}} = P_{\text{calentador}} \times t \quad (\text{Ecuación IV-20})$$

$$E_{\text{calentador}} = 0,640 \text{ kW} \times 0,416 \text{ h}$$

$$E_{\text{calentador}} = 0,266 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{estufa}} = 0,266 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} = 957,600 \text{ kJ}$$

La energía consumida en la etapa de plastificación térmica del almidón es 957,600 kJ.

#### 4.2.7 Balance de energía en la etapa de secado

##### Datos

Tiempo =  $t = 12 \text{ h}$

Temperatura =  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Potencia de la estufa =  $P_{\text{estufa}} = 2 \text{ Kw}$

Energía consumida por la estufa =  $E_{\text{estufa}}$

Para calcular la energía consumida en la etapa de secado se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{\text{estufa}} = P_{\text{estufa}} \times t \quad (\text{Ecuación IV-21})$$

$$E_{\text{estufa}} = 2 \text{ Kw} \times 12 \text{ h}$$

$$E_{\text{estufa}} = 24,000 \text{ kWh}$$

$$E_{\text{estufa}} = 24,000 \text{ kWh} \times 3600 \frac{\text{Kj}}{\text{kWh}} = 86400 \text{ Kj}$$

La energía consumida en la etapa de secado es 86400 Kj.

### 4.3 Determinación del rendimiento

Se calculó el rendimiento del proceso de obtención de plástico biodegradable a partir de la quinua blanca

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{m_{\text{plastico biodegradable}}}{m_{\text{quinua blanca}}} * 100 \quad (\text{Ecuación IV-22})$$

Donde:

$$m_{\text{plastico biodegradable}} = 405,140 \text{ g}$$

$$m_{\text{quinua blanca}} = 1000 \text{ g}$$

de la ecuación (IV-22):

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{405,140 \text{ g}}{1000 \text{ g}} * 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = 40,514 \%$$

Entonces el rendimiento del proceso de obtención de plástico biodegradable con los parámetros óptimos es 40,514 %

### 4.4 Evaluación de costos

Para determinar el costo de la investigación se realizó la evaluación de los costos directos e indirectos, que se realizaron durante el proceso de elaboración del plástico biodegradable.

#### 4.4.1 Costos directos

Para la realización de los costos se tomaron en cuenta:

- Costos de materia prima e insumos, ver tabla IV-8
- Costos de materiales, ver tabla IV-9
- Costos de análisis fisicoquímicos, ver tabla IV-10
- Costos de energía eléctrica, ver tabla IV-11

**Tabla IV-8 Costos de materia prima y reactivos**

Nº	ÍTEM	Descripción	Unidad	Valor unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Materia prima	Quinoa blanca	Kg	20	6	120
2	Reactivos para el proceso	Glicerina	l.	40	1	40
3		Agua destilada	l.	4	3	12
4		Ácido acético al 99,85%	l.	53	1	53
Total						225

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**Tabla IV-9 Costos de materiales**

N°	ÍTEM	Capacidad/tamaño	Unidad	Valor unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Vaso precipitado	250 mL	Pza	37	1	37
2	Vaso precipitado	100 mL	Pza	30	1	30
3	Probeta de vidrio	10 mL	Pza	40	1	40
4	Probeta de vidrio	50 mL	Pza	50	1	50
5	Piseta plástica	1 L	Pza	63	1	63
6	Termómetro de Hg	-10 a 200°C	Pza	49	1	49
7	Mortero de porcelana	Mediano	Pza	70	1	70
8	Vidrio reloj	Mediano	Pza	17	1	17
9	Varilla de vidrio	Mediano	Pza	16	1	16
10	Espátula metálica	Mediano	Pza	25	1	25
11	Cernidor de plástico	Mediano	Pza	15	1	15
12	balde de lavado	Mediano	Pza	35	1	35
13	Papel aluminio	Mediano	Pza	15	1	15
14	Moldes para degradar	Mediano	Pza	5	48	240



15	Vidrio	Mediano	Pza	6	8	48
16	Tela lienzo	Mediano	mts.	15	1	15
<b>Total</b>						765

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

Para los análisis fisicoquímicos solo se pagó el 40 % del precio unitario, ya que hubo un descuento del 60 % por parte del Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija-Bolivia, debido a que a la estudiante es de la UAJMS. Ver tabla IV-10

**Tabla-10 IV Análisis fisicoquímicos**

N°	Descripción		Precio Unitario (Bs)	40 % del Precio Unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Quinoa blanca	Ceniza	70	28	1	28
2		Grasa	90	36	1	36
3		Hidratos de carbono	20	8	1	8
4		Humedad	40	16	1	16
5		Proteína total (Nx6,25)	100	40	1	40
6		Valor energético	20	8	1	8
Total						136

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

A continuación, se detalla los costos de energía eléctrica en la tabla IV-11

**Tabla IV-11 Costos de energía eléctrica**

N°	ÍTEM	Precio de kWh (Bs)	Energía consumida (kW)	Costo (Bs)
1	Agitador magnético	0,9	0,373	0,336
2	Licuada	0,9	0,083	0,075
3	Centrifuga	0,9	0,107	0,096
4	Estufa	0,9	52,000	46,800
5	Tamizador	0,9	0,040	0,036
Total				47,343

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

El resumen de los costos directos, se detallan en la tabla IV-12

**Tabla IV-12 Resumen costos directos**

<b>Costos directos</b>	<b>Precio (Bs)</b>
Costos de materia prima y reactivos	225,000
Costos de materiales	765,000
Costos de análisis fisicoquímicos	136,000
Costos de energía eléctrica	47,343
<b>Total</b>	<b>1173,343</b>

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

#### 4.4.2 Costos indirectos

Los gastos indirectos se detallan en la tabla IV-13

**Tabla IV-13 Costos indirectos**

<b>N°</b>	<b>ÍTEM</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor unitario (Bs)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo (Bs)</b>
1	Investigacion por internet	mes	140	6	840
2	Impresión	hoja	0,5	1400	700
3	Anillados	anillado	15	4	60
4	Empastados	empastado	50	3	150
5	Transporte	dia	4	95	380
<b>Total</b>					<b>2130</b>

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

#### 4.4.3 Costo total

El costo total es la suma de los costos directos e indirectos, ver tabla IV-14

**Tabla IV-14 Resumen costo total**

<b>Costos</b>	<b>Precio (Bs)</b>
Costos directos	1173,343
Costos indirectos	2130,000
<b>Total</b>	<b>3303,343</b>

**Fuente:** Elaboracion propia, 2025

**CAPITULO V**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5.1 Conclusiones

Tal como se propuso en el presente trabajo de investigación se logró obtener plástico biodegradable a partir de la quinua blanca producida en Bolivia.

En consecuencia, se concluye diciendo:

- Se caracterizó la quinua blanca producida en Bolivia, los resultados de los parámetros fisicoquímicos determinados por el CEANID son: cenizas 2,09 g/100g, grasa 5,58 g/100g, Hidratos de carbono 67,66 g/100g, humedad 11,88 g/100g, valor energético 372 g/100g y proteína total (Nx6,25) 12,79 g/100g.
- Se seleccionó el método de casting para la fabricación del plástico biodegradable, optimizando el proceso a través de un diseño factorial. El análisis estadístico validó la significancia de las variables estudiadas, permitiendo establecer las condiciones óptimas del proceso en 30 mL de ácido acético, 10 mL de glicerina y 70 °C (correspondientes al experimento N° 2). Esta combinación de parámetros fue la que permitió alcanzar el módulo tensil más favorable, con un valor de 21,673 MPa. Por lo tanto, se confirma que el control preciso de estas variables operativas es crucial para maximizar las propiedades mecánicas y asegurar la calidad del plástico biodegradable.
- Se llegó a obtener el plástico biodegradable a partir de la quinua blanca, esto se puede ver en la fotografía II-17
- Se caracterizaron los plásticos biodegradables obtenidos a partir de la quinua blanca, estudiando la variable respuesta (Módulo tensil), los cuales indican cual es más resistente, el resultado puede ser observado en la tabla III-5, dando como resultado que el experimento 2 presenta un elevado modulo tensil. También se realizó el análisis sensorial a los plásticos biodegradables, donde el experimento 2 fue el que presentó mejores atributos organolépticos (buena resistencia,

flexibilidad, traslúcido y liso). En la tabla IV-1 se muestra las características del plástico biodegradable obtenido a la mejor muestra.

**Tabla V-1 Caracterización de la mejor muestra (Experimento N° 2)**

<b>Experimento N° 2</b>	
<b>Módulo tensil (Mpa)</b>	21,673
<b>Esfuerzo máximo (Mpa)</b>	4,876
<b>Elongación máxima (%)</b>	19,033
<b>Espesor (mm)</b>	0,153
<b>Solubilidad (%)</b>	33,577
<b>Permeabilidad de vapor de agua (g/m*h*Mpa)</b>	$9,46 \times 10^{-3}$
<b>Biodegradacion en tierra (%)</b>	52,064
<b>Biodegradacion en agua (%)</b>	69,020
<b>Biodegradacion en aire (%)</b>	8,183

**Fuente:** Elaboración propia, 2025

- Se concluye que el plástico biodegradable desarrollado a partir de la quinua blanca presenta un perfil de propiedades altamente competitivo que cumple y, en aspectos clave, supera los estándares comerciales. El material destaca por su excelente balance de propiedades mecánicas, combinando una rigidez superior (módulo tensil de 21,673 MPa) con una resistencia y flexibilidad adecuadas. Crucialmente, demuestra tener propiedades de barrera al vapor de agua muy eficaces y tasas de biodegradación que validan su perfil sostenible. Por lo tanto, se confirma que el bioplástico de quinua es un material de alto potencial, particularmente idóneo para el desarrollo de soluciones de envasado funcionales y ecológicas.
- El análisis de la eficiencia del proceso se centró en la muestra obtenida en el experimento 2, seleccionada por presentar las propiedades más óptimas. Sobre

esta muestra, se ejecutó un balance de materia y energía bajo las condiciones de operación establecidas: una temperatura de 70°C, con la adición de 10 mL de glicerina y 30 mL de ácido acético. Este estudio permitió cuantificar de manera precisa tanto el consumo de los materiales requeridos como la demanda energética del sistema. Posteriormente se calculó el rendimiento del proceso, el cual alcanzó un valor de 40,514 %. Este resultado implica una conversión efectiva de la materia prima, logrando una producción de 405,140 g de plástico biodegradable por cada kilogramo de quinua blanca procesada. Dicho rendimiento no solo valida la efectividad del método bajo las condiciones estudiadas, sino que también proporciona una línea base cuantitativa indispensable para evaluar la viabilidad de un futuro escalado a nivel industrial.

- El análisis de costos indica que el costo total del proyecto fue de 3303,343 Bs. El costo de producción de 405,140 g de plástico biodegradable a partir de 1 kg de quinua blanca tiene un costo de 272,307 Bs.

## **5.2 Recomendaciones**

1. Para obtener una lámina de plástico biodegradable con una homogeneidad superior y ausencia de irregularidades, como abultamientos, es fundamental el empleo de partículas de tamaño reducido y uniformes en la formulación de los insumos, esto podría lograrse a través del pulverizado y tamizado de los insumos.
2. La consecución de una homogeneización óptima en la mezcla es crucial para la calidad final del plástico biodegradable. Para ello, es indispensable mantener una agitación constante y durante un tiempo suficiente, asegurando la uniformidad del material. La falta de una homogeneización adecuada resultaría en una lámina dispareja y estructuralmente vulnerable, lo que, a su vez, comprometería la fiabilidad de los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas.
3. Mejorar las propiedades fisicoquímicas del plástico biodegradable obtenido.

4. Realizar un estudio de mercado formal en Tarija y a nivel nacional para identificar nichos de mercado de alto valor donde los consumidores estén dispuestos a pagar un extra por un producto sostenible (ej. empaques para productos orgánicos, menaje para eventos ecológicos).
5. Se exhorta a los ingenieros, especialmente en las áreas química, industrial y de materiales, a tomar estos resultados como punto de partida para la optimización del proceso de producción. Esto incluye el diseño de reactores más eficientes para la homogeneización, el desarrollo de sistemas de secado continuo que reduzcan los tiempos y el consumo energético, y la implementación de sistemas de control de calidad en línea para garantizar la consistencia del producto.
6. Se alienta a los consumidores a priorizar y apoyar los productos y emprendimientos que utilizan empaques sostenibles. La decisión de compra es una herramienta poderosa para dirigir el mercado hacia prácticas más respetuosas con el medio ambiente.
7. Los docentes y centros de investigación deben actuar como puente para transferir este conocimiento al sector productivo. Se recomienda la creación de talleres, seminarios y proyectos conjuntos con emprendedores y empresas locales para explorar la factibilidad de crear startups o nuevas líneas de negocio basadas en esta tecnología.