

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS**  
**ALIMENTARIAS**



**CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, ESTRUCTURAL, FÍSICA, TÉRMICA**  
**Y FUNCIONAL DEL ALMIDÓN DE CÁSCARA DE PLÁTANO VARIEDAD**  
**BELLACO (*Musa paradisiaca* AAB) Y GUAYABO (*Musa paradisiaca* AABB)**

**Tesis**

Para optar el título de:

**INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

PRESENTADO POR:

**ROMERO ABAD, IVANNY CONSUELO**

Tingo María – Perú

2025



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

## **ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 007-2025**

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos en acto público el 22 de julio del 2025, a horas 10:00 a.m., en la Sala de Grados de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en la ciudad de Tingo María, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, para calificar la tesis presentada por la Bach. **IVANNY CONSUELO ROMERO ABAD**, titulada:

### **"CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, ESTRUCTURAL, FÍSICA, TÉRMICA Y FUNCIONAL DEL ALMIDÓN DE CÁSCARA DE PLÁTANO VARIEDAD BELLACO (*Musa paradisiaca* AAB) Y GUAYABO (*Musa paradisiaca* AAB)"**

Después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las preguntas formuladas, lo declaran **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO**; en consecuencia, la sustentante, queda **APTA** para obtener el título de **Ingeniero en Industrias Alimentarias**, de conformidad con el artículo 45° numeral 45.2, de la Ley Universitaria 30220; los artículos 132 inciso "k" y 135 inciso "f" del Estatuto de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Tingo María, 22 de julio del 2025

  
M.Sc. Raida Lourdes Matos Bustamante  
Presidenta

  
Dr. Jaime Eduardo Basilio Atencio  
Miembro

  
M.Sc. Victor Elvis Condori Rondán  
Miembro

  
Dra. Elizabeth Susana Ordoñez Gómez  
Asesora

  
M.Sc. Melchor Soria Iturri  
Asesor



“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

## CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 269 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

### CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

### Programa de Estudio:

Ingeniería en Industrias Alimentarias

### Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, ESTRUCTURAL, FÍSICA, TÉRMICA Y FUNCIONAL DEL ALMIDÓN DE CÁSCARA DE PLÁTANO VARIEDAD BELLACO (Musa paradisiaca AAB) Y GUAYABO (Musa paradisiaca AABB)	ROMERO ABAD, IVANNY CONSUELO	13 % Trece

Tingo María, 12 de agosto de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO  
  
ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES  
JEFE



## VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

### OFICINA DE INVESTIGACIÓN

## UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO, INVESTIGACIÓN DOCENTE Y TESISISTA

(Resol. N° 295-2023-CU-R-UNAS)

### DATOS GENERALES DE PREGRADO

<b>Universidad</b>	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
<b>Facultad</b>	: Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias
<b>Escuela Profesional</b>	: Ingeniería en Industrias Alimentarias
<b>Título de Tesis</b>	: CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, ESTRUCTURAL, FÍSICA, TÉRMICA Y FUNCIONAL DEL ALMIDÓN DE CÁSCARA DE PLÁTANO VARIEDAD BELLACO ( <i>Musa paradisiaca</i> AAB) Y GUAYABO ( <i>Musa paradisiaca</i> AABB)
<b>Autor</b>	: Romero Abad, Ivanny Consuelo
<b>Asesores</b>	: Dra. Ordoñez Gómez, Elizabeth Susana M.Sc. Soria Iturri, Melchor
<b>Programa de investigación</b>	: Ciencia y Tecnología de Alimentos
<b>Línea de investigación</b>	: Ciencia y Tecnología de Alimentos
<b>Eje temático</b>	: Nutrición y Alimentos Funcionales
<b>Lugar de ejecución</b>	: Laboratorio Central de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
<b>Duración</b>	: Inicio : Agosto 2022 Término : Julio 2023
<b>Financiamiento</b>	: Propio

Tingo María - Perú

2025

V° B°

Dra. Ordoñez Gómez,  
Elizabeth S.  
Asesora

M.Sc. Soria Iturri, Melchor  
Asesor

Bach. Romero Abad,  
Ivanny Consuelo  
Tesisista

## **DEDICATORIA**

### **A Dios:**

Por concederme la vida, iluminar mi mente, mantenerme con salud y darme la fuerza necesaria para seguir adelante con valentía en cada etapa de mi formación profesional.

### **A mis padres, Eulogio y Consuelo:**

Por sus sabios consejos, su apoyo incondicional y por ser mi mayor ejemplo de amor y perseverancia. Les expreso mi respeto y gratitud eternos por acompañarme en cada paso de esta etapa de mi vida.

### **A mi hermana, Milagros:**

Por su cariño, sus valiosos consejos y su constante motivación, que me impulsaron a seguir adelante en este camino.

### **A mi abuelito, Fortunato:**

Con profundo agradecimiento por el amor y la sabiduría que dejó como legado en mi vida.

## AGRADECIMIENTO

- A mis padres, Eulogio Romero y Consuelo Abad, por su esfuerzo, sabios consejos y apoyo incondicional durante todos estos años de mi formación profesional.
- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por brindarme la oportunidad de desarrollarme como profesional.
- A la Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias y a todos los docentes, por su dedicación y por compartir sus conocimientos durante toda mi formación profesional.
- A mis asesores, la Dra. Elizabeth Ordoñez Gómez y el M.Sc. Melchor Soria Iturri, por su orientación, apoyo constante y valiosa dedicación; su profesionalismo fue fundamental desde el inicio hasta la culminación de este trabajo de investigación.
- Al Ing. José Luis Trujillo, Ing. Darlym Reátegui Díaz, Ing. Cristopher del Águila, por su apoyo continuo, conocimientos y amistad durante la ejecución de la presente investigación.
- A los miembros del jurado, Ing. Raida Matos Bustamante, Dr. Jaime Basilio y Ing. Victor Condori, por su disposición, tiempo y valiosos comentarios que contribuyeron al enriquecimiento de este estudio.
- A mi hermana Milagros Romero, por estar siempre a mi lado, apoyarme moralmente y alentarme a lo largo de mi vida universitaria.
- A mi amiga María Pérez Nieto y a todas mis amistades por su apoyo moral e incondicional y compañerismo durante la ejecución de esta investigación y en el desarrollo de mi vida universitaria.

## ÍNDICE

	<b>Página</b>
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
2.1. Aspectos generales del plátano.....	3
2.1.1. Definición .....	3
2.1.2. Clasificación .....	3
2.1.3. Taxonomía .....	4
2.1.4. Variedades.....	4
2.1.5. Partes del fruto .....	5
2.2. Aspectos generales del almidón .....	6
2.2.1. Definición .....	6
2.2.2. Estructura del almidón .....	6
2.2.3. Usos y aplicaciones.....	8
2.2.4. Almidón de cáscara de plátano .....	8
2.3. Caracterización morfológica de los gránulos del almidón .....	9
2.3.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	9
2.3.2. Características morfológicas de almidones de diferentes fuentes botánicas ....	10
2.4. Identificación de grupos funcionales en la estructura del almidón .....	11
2.4.1. La espectroscopia.....	11
2.4.2. Espectroscopia de infrarrojo (IR).....	12
2.4.3. Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) .....	13
2.4.4. Técnica de reflectancia total atenuada (ATR) .....	14
2.4.5. La espectroscopia FTIR-ATR aplicada en los alimentos .....	15
2.5. Comportamiento térmico del almidón.....	16
2.5.1. Análisis termogravimétrico (TGA).....	16
2.5.2. Calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	18
2.6. Color y propiedades funcionales tecnológicas del almidón .....	22
2.6.1. El color.....	22
2.6.2. Propiedades funcionales tecnológicas del almidón.....	24
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1. Lugar de ejecución .....	26
3.2. Materia prima .....	26

3.3. Equipos, materiales y reactivos .....	27
3.3.1. Equipos .....	27
3.3.2. Materiales.....	27
3.3.3. Reactivos.....	28
3.4. Métodos de análisis .....	28
3.5. Metodología experimental.....	29
3.5.1. Obtención de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo .....	29
3.5.2. Caracterización morfológica de los gránulos de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo .....	30
3.5.3. Identificación de grupos funcionales en la estructura de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo.....	31
3.5.4. Determinación del comportamiento térmico de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo .....	32
3.5.4.1. Análisis termogravimétrico (TGA).....	32
3.5.4.2. Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	32
3.5.5. Caracterización de amilosa, amilopectina, color y propiedades funcionales tecnológicas del almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo .....	33
3.5.5.1. Análisis del contenido de amilosa y amilopectina de los almidones..	33
3.5.5.2. Análisis del color de los almidones .....	34
3.5.5.3. Análisis de las propiedades funcionales tecnológicas de los almidones .....	34
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	36
4.1. Caracterización morfológica de los gránulos de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo.....	36
4.2. Identificación de los grupos funcionales presentes en la estructura de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo .....	40
4.3. Determinación del comportamiento térmico de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo.....	43
4.3.1. Estabilidad térmica de los almidones por termogravimetría (TGA).....	43
4.3.2. Gelatinización de los almidones por calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	48
4.4. Caracterización de amilosa, amilopectina, color y propiedades funcionales tecnológicas del almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo .....	51
4.4.1. Análisis del contenido de amilosa y amilopectina de los almidones.....	51

4.4.2. Análisis del color de los almidones .....	53
4.4.3. Análisis de las propiedades funcionales tecnológicas de los almidones.....	55
4.4.3.1. Capacidad de retención de agua (CRA).....	55
4.4.3.2. Solubilidad (S).....	56
4.4.3.3. Poder de hinchamiento (PH).....	57
4.4.3.4. Sinéresis o estabilidad al congelamiento (Si) .....	59
V. CONCLUSIONES.....	61
VI. PROPUESTAS A FUTURO .....	62
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
ANEXOS .....	78

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1. Características morfológicas de gránulos de almidón de diferentes fuentes botánicas.....	10
2. Caracterización morfológica de los gránulos de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo por microscopía electrónica de barrido.....	39
3. Asignación y modo de vibración de las bandas encontradas en los espectros FTIR-ATR de los almidones .....	42
4. Resultados de TGA y DTG de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo.....	44
5. Resultados de las temperaturas y entalpía de gelatinización de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo obtenidos por DSC. ....	49
6. Contenido de amilosa y amilopectina en el almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo.....	52
7. Parámetros de color y índice de blancura de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo.....	54
8. Resultados de las propiedades funcionales tecnológicas de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Sección transversal del fruto del plátano.....	5
2. Estructura de la amilosa y amilopectina.....	7
3. El espectro electromagnético.....	11
4. Termograma DSC de las transiciones térmicas.....	20
5. Plátano Bellaco ( <i>Musa paradisiaca</i> AAB): Fruto (A) y Cáscara (B) .....	26
6. Plátano Guayabo ( <i>Musa paradisiaca</i> AABB): Fruto (A) y Cáscara (B).....	27
7. Flujograma del proceso de obtención de almidón presente en la cáscara de plátano verde mediante el método húmedo.....	30
8. Micrografías SEM de los gránulos de almidón de cáscara de plátano Bellaco: 420x (A); 760x (B); 2350x (C); Histograma de distribución de tamaño (D).....	37
9. Micrografías SEM de los gránulos de almidón de cáscara de plátano Guayabo: 460x (A); 910x (B); 2050x (C); Histograma de distribución de tamaño (D).....	38
10. Espectros FTIR-ATR de almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB), almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG) y del almidón control.....	41
11. Curvas TGA y DTG de almidón extraído de la cáscara de plátano Bellaco. ....	47
12. Curvas TGA y DTG de almidón extraído de la cáscara de plátano Guayabo. ....	47
13. Termograma DSC de la gelatinización de almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB) y almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG). ....	50

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar el almidón extraído de la cáscara de plátano de las variedades Bellaco (*Musa paradisiaca* AAB) y Guayabo (*Musa paradisiaca* AABB), evaluando sus propiedades morfológicas, estructurales, térmicas, físicas y funcionales tecnológicas. Los gránulos de almidón mostraron morfologías elipsoidales y ovoides alargadas, con tamaños promedio de 20,26  $\mu\text{m}$  (ACB) y 14,90  $\mu\text{m}$  (ACG), respectivamente. Mediante espectroscopía FTIR-ATR se identificaron grupos funcionales característicos del almidón. El análisis TGA evidenció mayor estabilidad térmica en ACB, mientras que ACG presentó un mayor rango de descomposición. En DSC, ambas variedades mostraron temperaturas de gelatinización similares, pero ACG tuvo mayor entalpía. ACG presentó mayor contenido de amilosa (32,79 %) y amilopectina (45,98 %), así como superior luminosidad ( $L^* = 90,45$ ) e índice de blancura ( $W = 89,48$  %), indicando mejor separación del almidón y menor presencia de compuestos pigmentados. En cuanto a propiedades funcionales, ACG mostró mayor capacidad de retención de agua ( $\text{CRA} = 167,47$  %) y poder de hinchamiento ( $\text{PH} = 1,69$  g/g), mientras que ACB presentó mayor solubilidad (1,56 %) y sinéresis (29,13 %). Los resultados sugieren que el almidón de cáscara de plátano Guayabo posee mejores características funcionales y ópticas, lo cual amplía su potencial en aplicaciones alimentarias y otros sectores industriales, promoviendo además el aprovechamiento de residuos agroindustriales.

**Palabras claves:** almidón, *Musa paradisiaca*, plátano, caracterización, bananos de cocción.

## ABSTRACT

The objective of the present study was to characterize the starch extracted from the bellaco (*Musa paradisiaca* AAB) and guayabo (*Musa paradisiaca* AABB) varieties of plantain peels, evaluating their morphological, structural, thermal, physical, and functional technological properties. The starch granules showed ellipsoidal and elongated ovoid morphologies, with average sizes of 20.26 (ACB – acronym in Spanish) and 14.90  $\mu\text{m}$  (ACG – acronym in Spanish), respectively. Through FTIR-ATR spectroscopy, functional characteristic groups of starch were identified. From the TGA analysis, a greater thermal stability was evidenced in ACB, while the ACG presented a greater range of decomposition. In DSC, both varieties proved to have temperatures of gelatinization that were similar, but the ACG had greater enthalpy. The ACG presented greater amylose (32.79 %) and amylopectin (45.98 %) contents, as well as a superior luminosity ( $L^* = 90.45$ ) and whiteness index ( $W = 89.48 \%$ ), indicating better separation from the starch and a lower presence of pigmented compounds. With respect to the functional properties, the ACG proved to have a greater water retention capacity (WRC = 167.47 %; CRA in Spanish) and swelling power (SP = 1.69 g/g; PH in Spanish), meanwhile, the ACB presented a greater solubility (1.56 %) and syneresis (29.13 %). The results suggested that the starch from the Guayabo plantain peels possessed better functional and optical characteristics, which widen its potential in food application and other industrial sectors, moreover, promoting the use of agro-industrial waste.

**Keywords:** starch, *Musa paradisiaca*, plantain, characterization, cooking plantains

## I. INTRODUCCIÓN

El plátano es una fruta de gran consumo y producción en el Perú, constituye una importante fuente alimenticia y un gran recurso económico para miles de familias. La mayor parte de producción nacional de plátano se concentra principalmente en la región amazónica, donde destaca Huánuco con una producción total de 234 207 toneladas (INEI, 2024). Sin embargo, durante la cosecha y el procesamiento del plátano, tanto a nivel doméstico como industrial, se generan alrededor de 95% de residuos orgánicos como el pseudotallo, el raquis y las cáscaras verdes (Haro-Velasteguí et al., 2017). Estos residuos, por lo general, no son aprovechados ni tratados adecuadamente y suelen ser incinerados o vertidos a los ríos, lo cual representa un problema ambiental significativo.

En los últimos años, el aprovechamiento de los residuos agroindustriales ha cobrado relevancia en buscar nuevas alternativas que contribuyan a mitigar la contaminación ambiental. Entre las alternativas exploradas destaca la obtención de almidón, cuya demanda ha aumentado significativamente debido a su amplio potencial de aplicación en la industria de alimentos como texturizante, gelificante, estabilizador y espesante, lo cual ha impulsado la búsqueda de nuevas fuentes no convencionales para su extracción. En este contexto, la cáscara de plátano, principal residuo agroindustrial del plátano, representa una fuente rica de almidón. Se ha reportado que 100 g de cáscara verde húmeda puede contener hasta 12,78 g de almidón (López et al., 2014). Además, este subproducto se caracteriza por su riqueza nutricional, ya que presenta un alto contenido de fibra dietética, minerales, proteínas, aminoácidos esenciales, ácidos grasos poliinsaturados y compuestos fenólicos (Anchundía et al., 2016).

El almidón extraído de la cáscara de plátano puede emplearse para la formulación de productos innovadores dentro de la industria alimentaria, debido a que presenta propiedades distintas a las de los almidones convencionales (Cañas et al., 2018). Sin embargo, esta fuente de almidón no convencional ha sido escasamente estudiada, por lo surge el interés de investigar sus características morfológicas, estructurales, físicas, térmicas y funcionales, particularmente en las variedades Bellaco y Guayabo, que son las más cultivadas y consumidas en provincia de Leoncio Prado. El tipo de investigación utilizado es la investigación experimental-aplicada, fundamentado en el nivel explicativo-compresivo (Gallardo, 2017). La caracterización de estos almidones permitirá evaluar su viabilidad como recurso tecnológico en diversas aplicaciones de la industria alimentaria, asimismo, se espera que este conocimiento impulse el aprovechamiento de las cáscaras de plátano, promoviendo su revalorización y generando

beneficios económicos y mejor calidad de vida para los productores y procesadores de plátanos de la región. Bajo este contexto, en el presente estudio se planteó los siguientes objetivos:

**Objetivo general:**

- Determinar las características morfológicas, estructurales, físicas, térmicas y funcionales del almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco (*Musa paradisiaca* AAB) y Guayabo (*Musa paradisiaca* AABB).

**Objetivos específicos:**

- Caracterizar morfológicamente los gránulos de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo.
- Identificar los grupos funcionales presentes en la estructura de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo.
- Determinar el comportamiento térmico de la estabilidad térmica y gelatinización del almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo.
- Caracterizar la amilosa, amilopectina, color y propiedades funcionales tecnológicas del almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Aspectos generales del plátano

#### 2.1.1. Definición

El plátano es una planta herbácea monocotiledónea gigante, que pertenece al género *Musa* de la familia de Musaceae, es cultivada en zonas tropicales y subtropicales del mundo. La mayoría de las especies del género *Musa* que pertenecen a la sección *Eumusa*, se cultivan principalmente para el consumo de sus frutos y se consumen frescos o cocinados, siendo una excelente fuente de carbohidratos (Muimba-Kankolongo, 2018). Es reconocido como el cuarto cultivo más importante a nivel global, siendo uno de los principales alimentos básicos en la canasta familiar, su gran cantidad de producción permite que sea exportado, lo que a su vez lo convierte en una fuente de trabajo y recursos económicos para muchos países (Rojas et al., 2019).

El plátano es una fruta nutritiva que se compone principalmente de agua (75%), carbohidratos (25%), proteínas y grasas. Es una fuente importante de micronutrientes y tiene cantidades significativas de potasio, calcio y fósforo. Además, el plátano verde en su etapa de madurez de cosecha, es una excelente fuente de almidón, su pulpa tiene de un 70 a 80% en base seca, mientras que la cáscara puede tener hasta un 50% de almidón (Miah et al., 2023).

#### 2.1.2. Clasificación

El plátano (*Musa* sp.) se compone de dos subgrupos principales: banano y plátano, ambos tienen una alta producción y a pesar de ser frutos de la misma familia presentan diferencias en su forma, tamaño, sabor y empleo. Los “bananos” son largos, rectos y se caracterizan por su sabor dulce cuando están maduros, son usados en la preparación de postes y pueden comerse principalmente crudos como frutas, mientras que los “plátanos”, suelen ser más pequeños, curvos y se caracterizan por ser ricos en almidón, son usados en la cocina de diversas maneras, como fritos, sancochados, asados o procesados, ya sean verdes o maduros no se pueden comer crudos (Soorianathasundaram et al., 2016).

En base a su composición genómica los plátanos comestibles se clasifican en tres tipos: diploides (AA y AB), triploides (AAA, AAB y ABB) y tetraploides (AAAA, AAAB y AABB). No obstante, la mayoría de los plátanos son triploides y se obtienen de importantes especies silvestres, *Musa acuminata* (A) y *Musa balbisiana* (B) quienes aportan los genomas A y B respectivamente. Generalmente, los cultivares de bananos son AA o AAA, y los plátanos son predominantemente AAB, ABB o BBB (Marta et al., 2022).

### 2.1.3. Taxonomía

Según Torres (2017), el plátano está clasificado taxonómicamente de la siguiente manera:

Reino	:	Plantae
División	:	Magnoliophyta
Clase	:	Liliopsida
Orden	:	Zingiberales
Familia	:	Musaceae
Género	:	Musa
Sección	:	Eumusa
Especie	:	Paradisiaca

### 2.1.4. Variedades

Las plantas silvestres de plátano tienen su probable centro de origen en la selva de Malasia. A lo largo de los años, el ser humano se dio cuenta de que sus frutos eran comestibles y comenzó a seleccionar la especie *M. acuminata*, que fue propagando a través de sus hijuelos. Con el tiempo, esta planta se dispersó por el sudeste asiático, donde se cruzó con la especie silvestre de *M. balbisiana*, lo que dio lugar a todas las variedades de plátanos comestibles que hoy conocemos (Belalcázar et al., 1991).

Según Cárdenas (2009), en el Perú el cultivo de plátano se distingue por ser un producto agrícola que ha crecido significativamente en la región de la selva y en el norte del territorio de nuestro país. La región selva presenta la mayor producción nacional, donde destacan las variedades de plátano: bellaco, guayabo, ingiri, moquicho, manzano, seda e isla. En la provincia de Leoncio Prado se producen y consumen plátanos de cocción, entre las cuales predominan la variedad bellaco y guayabo:

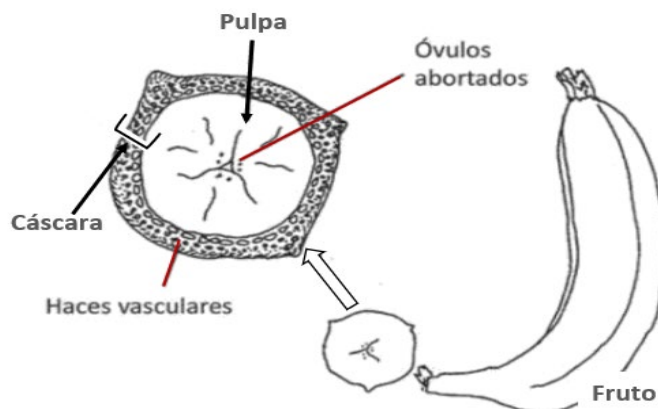
- **Bellaco:** es una variedad de plátano también conocida como “harton”, “cuerno”, clon triploide (AAB) de la especie *Musa x paradisiaca*, que pertenece a la subespecie Horn, se cultiva tanto en la selva como en la costa del Perú. La planta muestra un pseudotallo verde con reflejos rosados de 3 m de altura y un diámetro de base de 24 cm aproximadamente, con flores de color amarillenta. El racimo al madurar tiene un promedio de 30 a 50 frutos. Los frutos son largos y miden de 30 a 40 cm, con un peso promedio de 400 g, su pulpa se caracteriza por tener un alto contenido de almidón y bajo de azúcares, con una cáscara gruesa de color verde intenso en estado de madurez comercial. Puede ser consumido en estado verde y maduro de manera sancochada o frita.

- **Guayabo:** es una variedad de plátano también denominado como “palillo”, clon tetraploide (AABB) de la especie *Musa x paradisiaca*, que pertenece a la subespecie *Maia-Maoli*. La planta es robusta, tiene un pseudotallo grueso de color verde que alcanza unos 5 m de altura y 28 cm de diámetro en su base, con flores de color amarillento cremoso. El racimo al llegar a su madurez puede producir un promedio de 120 frutos. Los frutos son grandes, transversalmente redondo y pesan alrededor de 270 g, tienen una pulpa de color amarillo, con cáscara delgada de color verde claro en estado de madurez comercial (Flores, 2011).

### 2.1.5. Partes del fruto

El fruto de plátano es una baya falsa con pericarpio, de forma alargada o ovalada, que se desarrolla por partenogénesis, sin producir semillas. El desarrollo del fruto comienza con la formación de inflorescencia, luego se desarrolla el racimo, que puede contener de 5 a 20 manos, cada una con 3 a 20 frutos. Al llegar a su madurez fisiológica cada fruto puede pesar alrededor de 200g, y medir entre 20 a 40 cm de largo y hasta 7 cm de diámetro, la cáscara puede ser de color amarillento verdoso, amarillento o rojizo y la pulpa es blanca (Blasco y Gómez, 2014).

Los frutos de plátano, se forman a partir de un ovario ínfero, y están constituidos por dos partes principales: la cáscara y la pulpa (Kerbel, 2016). Estas partes, se aprecian en la sección transversal del fruto (Figura 1), la cáscara es la pared del ovario y se forma de la capa más externa del pericarpio, denominada epicarpio, está compuesta por una capa de parénquima con haces vasculares. La pulpa se origina por la división celular de las capas más internas del pericarpio, conocidas como el mesocarpio y endocarpio. El mesocarpio que forma la parte de la pulpa carnosa y el endocarpio que es la capa interior más próxima a la cavidad que presenta el ovario, donde están los lóculos que contienen los óvulos abortados (Robinson y Galán, 2012).



**Figura 1.** Sección transversal del fruto del plátano

**La pulpa:** es la parte comestible del fruto, de consistencia firme y carnosa que puede ser de color blanca o amarillenta. Es rica en carbohidratos (principalmente almidón), minerales (K, P y Mg), proteínas, fibra, vitaminas A, B6, C, D y además contiene compuestos fenólicos. La pulpa de plátano se puede utilizar en diversas preparaciones culinarias y también es muy utilizada en la industria de alimentos y farmacéutica (Maseko et al., 2024).

**La cáscara:** es principal subproducto del proceso industrial del plátano, que representa entre el 35% y 40% del peso total del fruto, la cual no se aprovecha. Es una fuente rica de almidón (3%), proteína (6% a 9%), grasa (3,8% a 11%), fibra dietética total (43,2% a 49,7%), ácidos grasos poliinsaturados, potasio, pectina, aminoácidos esenciales y micronutrientes (K, P, Ca, Mg) (Hadisoewignyo et al., 2017). Entre las alternativas para su aprovechamiento se ha utilizado en la obtención de proteínas, etanol, pectinas, metanol y enzimas, además es considerada una fuente de compuestos antioxidantes (galocatequina, defínidita y cianidina) para la producción de alimentos funcionales (Blasco y Gómez, 2014). Asimismo, es un desecho que podría utilizarse en la fabricación de varios productos con valor agregado, como en la extracción de almidón, elaboración de pastas alimenticias, productos de panificación, snack y otros productos elaborados en la industria alimentaria (Rojas et al., 2019).

## 2.2. Aspectos generales del almidón

### 2.2.1. Definición

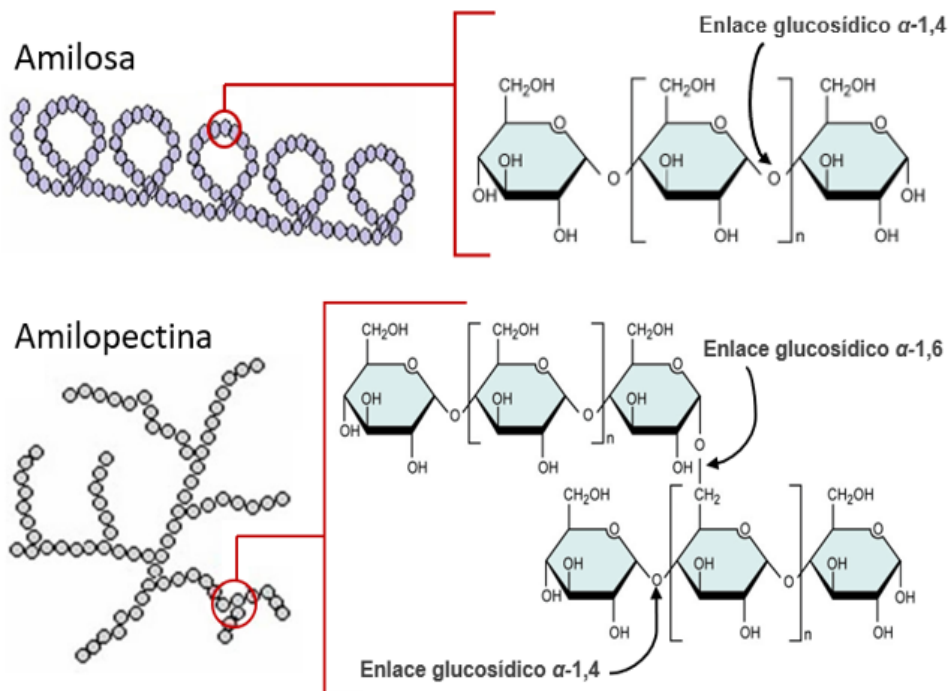
El almidón es el polisacárido más abundante almacenado en las plantas verdes y es un componente dietético importante en todas las poblaciones humanas. Se encuentra presente en forma de gránulos en los cloroplastos de hojas verdes y amiloplastos de semillas, raíces, tubérculos y frutos, cuya forma, composición química y estructura a nivel supermolecular son distintas según cada tipo de especie vegetal. Es un componente importante en numerosos productos agrícolas tales como granos, leguminosas, tubérculos y ciertas frutas en una fase fisiológica inmadura (Trejo et al., 2024).

### 2.2.2. Estructura del almidón

El almidón está constituido de dos polímeros principales: la amilosa y la amilopectina. Estos polímeros presentan diferentes estructuras dentro del gránulo de almidón, su distribución y proporción varían según la fuente botánica. La amilosa es una cadena de moléculas dispuestas linealmente, que constituye entre 15% al 20% de almidón, mientras que la amilopectina es una molécula ramificada grande, que constituye entre 80% al 85% (Amaya-Pinos, 2019).

La estructura de la amilosa y amilopectina (Figura 2) está constituida de la siguiente manera (Luga y Mironeasa, 2020):

- **La amilosa:** compuesta por  $D$  moléculas de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -1,4 glucosídicos. Las cadenas de amilosa son helicoidales y en el centro se distribuyen los átomos de hidrógeno, mientras que los grupos hidroxilo están enlazados fuera de la estructura. La presencia de hidrógeno en la estructura de la amilosa está relacionada con su carácter hidrofóbico y le permite formar complejos con ácidos grasos, yodo o alcoholes.
- **La amilopectina:** está formada por cadenas lineales con 10 hasta 60 moléculas de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -1,4 glucosídicos y cadenas laterales con 15 hasta 45 moléculas de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$ -1,6-glucosídicos en los puntos de ramificación. Tiene un alto peso molecular con un promedio de 1800 unidades de glucosa.



**Figura 2.** Estructura de la amilosa y amilopectina

La estructura del almidón y sus características funcionales están relacionadas con la cantidad de amilosa y amilopectina, que difiere según la fuente botánica de donde provienen el almidón. La amilopectina por sí misma es capaz de formar los gránulos de almidón, mientras que la amilosa es fundamental en las primeras etapas de cristalización de los gránulos. Tanto la amilosa como la amilopectina determinan la funcionalidad del almidón y por consiguiente influyen de manera determinante en las propiedades sensoriales y reológicas de los alimentos, mediante su capacidad de hidratación y gelatinización (Salcedo et al., 2017).

### **2.2.3. Usos y aplicaciones**

El almidón es el polisacárido más utilizado como ingrediente funcional, esto se debe a que contribuye significativamente a las propiedades de textura, lo cual lo lleva a ser usado frecuentemente en la industria alimentaria y en diversas aplicaciones industriales. La industria alimentaria lo utiliza como aditivo para modificar la viscosidad, textura y consistencia de los alimentos (Tao et al., 2018). Es empleado como aglutinante de agua, estabilizante de emulsión, agente gelificante y espesante en alimentos enlatados, sopas y salsas, también se utiliza como materia prima para elaboración de productos como bebidas, aderezos, mayonesa, confitería y snacks. Asimismo, se utiliza en varias industrias que requieren la fabricación de polímeros biodegradables, textiles, cosméticos, adhesivos, plásticos, fármacos y papeles (Sharlina et al., 2017).

### **2.2.4. Almidón de cáscara de plátano**

La cáscara o piel del plátano es un residuo que se produce en grandes cantidades durante el procesamiento del fruto de plátano tanto a nivel doméstico como industrial. Esta cáscara contiene hasta un 30% de almidón en base seca, lo que la convierte en un recurso valioso de almidón. El almidón que se encuentra en la cáscara de plátano puede ser empleado para la fabricación de nuevos productos, gracias a sus propiedades únicas puede ser aprovechado en diversas aplicaciones industriales. Entre sus aplicaciones se ha utilizado como materia prima en la elaboración de biopolímeros y producción de bioetanol (Cañas et al., 2018).

El almidón presente en la cáscara de plátano se puede extraer mediante molienda húmeda o seca. Sin embargo, se prefiere la molienda húmeda por ser un método más sencillo, económico y rentable, que produce un almidón de mejor calidad. El proceso de extracción de almidón mediante molienda húmeda pasa por la selección, lavado, pelado, raspado, triturado, filtrado, centrifugado, secado, molienda y tamizado de las cáscaras de plátano verde o maduro. Entre los estudios realizados por el método de extracción húmeda, se han reportado rendimientos de 2,5% hasta 20,57%, con una pureza de 50% a 70% de almidón. Además, el almidón que se obtienen de la cáscara de plátano, se compone de un 11,1% de humedad, 3,4% de proteína, 0,8 % de cenizas, 2,9 % de grasa y 5,3 % de fibra bruta, estos valores nos permiten evaluar su potencial como fuente de almidón (Alarcón y Caicedo, 2021).

### **2.3. Caracterización morfológica de los gránulos del almidón**

Como todo material, las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón y sus productos dependen de su morfología, naturaleza y estructura, por lo que resulta importante caracterizar morfológicamente los almidones. Esta caracterización de almidones de diferentes fuentes botánicas es necesaria para determinar su uso específico en diversas industrias (Medina y Salas, 2008). Las propiedades morfológicas, como la forma y el tamaño de los gránulos de almidón, muestran variaciones notables entre diferentes tipos de almidón, se debe considerar que esta variación se atribuye al origen biológico, asimismo la morfología de los gránulos de almidón esta influenciada por la bioquímica del amiloplasto, así como de la fisiología de la planta, lo que hace fundamental identificar las características morfológicas. Las características morfológicas como la forma (redonda, alargada, elíptica, irregular y ovalada), tipo de superficie y tamaño se determinan mediante microscopía electrónica de barrido (Luque-Vilca et al., 2023).

#### **2.3.1. Microscopia electrónica de barrido (SEM)**

En la actualidad existe una amplia de microscopios y técnicas de obtención de imágenes que son empleadas para analizar las características morfológicas, estructurales y químicas de los materiales. Existen diferentes tipos de técnicas microscópicas: microscopia electrónica de transmisión, microscopía electrónica de barrido ambiental y microscopia electrónica de barrido. Esta última es muy utilizada debido a que nos permite una mayor apreciación de la morfología en general del material (Tovar, 2008).

La microscopia electrónica de barrido o también conocida como SEM por sus siglas en inglés (Scanning Electron Microscopy) tiene un rol importante en el estudio de la estructura molecular de una amplia variedad de materiales. Esta técnica de caracterización superficial no destructiva es ampliamente utilizada para identificar la estructura morfológica de las muestras examinadas. La base de la técnica SEM radica en la utilización de electrones en lugar de luz para crear una imagen. Un filamento metálico se calienta para generar un haz de electrones. Los electrones que se liberan del átomo iluminan la muestra y producen una interacción con la superficie del material en estudio, resultando en una imagen (micrografía) que revela las características morfológicas de la muestra, permitiendo obtener información sobre la forma, tamaño y composición química de sus componentes (Salcedo et al., 2017).

El análisis SEM permite caracterizar varios materiales como los polímeros, aleaciones metálicas, minerales, fibras, películas delgadas y biomateriales, esto debido al detalle y rapidez en la adquisición de las micrografías de superficie. Además, a través del SEM se puede caracterizar morfológicamente el gránulo de almidones de diversas fuentes

botánicas, lo cual ayuda a reconocer diferencias marcadas en la superficie, tamaño y forma de los gránulos. Este análisis microscópico puede servir como fundamento para comparar y seleccionar almidones en la producción de productos (Molina, 2019).

### 2.3.2. Características morfológicas de almidones de diferentes fuentes botánicas

Las características morfológicas como la forma, tamaño y distribución de los gránulos de almidón, están relacionadas directamente a la fuente botánica a partir de la cual son aislados (Tabla 1). Hay diversas formas y tamaños de los gránulos, lo que se debe a las diferencias genéticas dentro de un mismo género o entre especies. Los gránulos de almidón pueden presentar formas ovaladas, redondas, esféricas, lenticulares e incluso irregulares. El tamaño de los gránulos es aproximadamente de 1 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro, donde los gránulos de 1 a 20  $\mu\text{m}$  se consideran como pequeños y de 20 a 100  $\mu\text{m}$  como grandes. La distribución de los gránulos por general se clasifica como unimodal y bimodal, donde una distribución de tamaño bimodal se caracteriza por tener gránulos grandes y pequeños en una misma fuente botánica, mientras que la clasificación unimodal solamente tiene un solo tamaño (Tovar, 2008).

**Tabla 1.** Características morfológicas de gránulos de almidón de diferentes fuentes botánicas

Almidón	Tipo	Forma	Distribución	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
Cebada	Cereal	Lenticular y Esférica	Bimodal	15-25 y 2-5
Maíz	Cereal	Esférica/Poliédrica	Unimodal	2-30
Amilomaíz	Cereal	Irregular	Unimodal	2-30
Mijo	Cereal	Poliédrica	Unimodal	4-12
Avena	Cereal	Poliédrica	Unimodal	3-10
Chícharo	Leguminosa	Rentiform (simple)	Unimodal	5-10
Papa	Tubérculo	Lenticular	Unimodal	5-100
Arroz	Cereal	Poliédrica	Unimodal	3-8
Centeno	Cereal	Lenticular y Esférica	Bimodal	10-40 y 5-10
Sorgo	Cereal	Esférica	Unimodal	5-20
Tapioca	Raíz	Esférica y Lenticular	Unimodal	5-45
Triticale	Cereal	Esférica	Unimodal	1-30
Sago	Cereal	Ovalada	Unimodal	20-40
Trigo	Cereal	Lenticular y Esférica	Bimodal	15-35 y 2-10

Fuente: Tovar, 2008

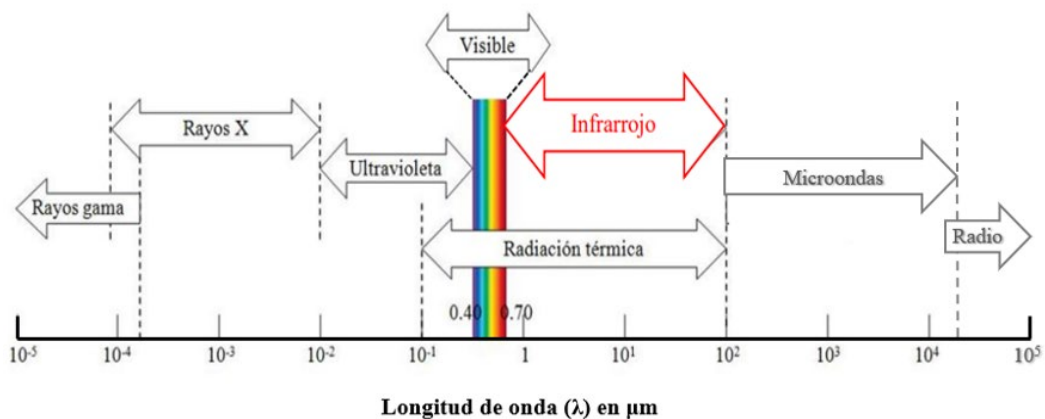
La caracterización morfológica de los almidones muestra las variaciones de su forma y tamaño, las cuales están influenciadas por la fuente botánica de la que se obtienen o por una modificación que se les haya realizado, lo que genera cambios físicos como químicos en la superficie de los gránulos. Comprender estas variaciones morfológicas ayuda a entender el comportamiento de propiedades funcionales, como la capacidad para absorber agua y la susceptibilidad de los gránulos ante diversos factores físicos, químicos y enzimáticos. Además, la forma del gránulo es como un indicador del origen del almidón y puede ser empleado como un criterio de calidad para detectar almidones que han sido adulterados (Salcedo et al., 2017).

## 2.4. Identificación de grupos funcionales en la estructura del almidón

### 2.4.1. La espectroscopia

La espectroscopia estudia la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, esta puede darse por procesos de absorción, reflexión, refracción, difracción, dispersión o transmisión de la energía radiante, como resultado de esta interacción se obtiene información analítica, molecular o estructural de la materia (Mondragón, 2017). En los últimos años se ha convertido en la herramienta más utilizada en la investigación, análisis y control en varios ámbitos relacionados con la física, la química, las ciencias médicas, biológicas y en los laboratorios de análisis de la industria (González y Montaña, 2015).

**Espectro electromagnético:** se define como el rango de todas las radiaciones electromagnéticas de diferentes longitudes de onda y frecuencias, que se divide en regiones con denominaciones específicas y características más o menos comunes. Abarca desde las radiaciones de menor longitud de onda (rayos gamma) hasta aquellas de mayor longitud de onda (ondas de radio) (Riveros y Reyes, 2021). La Figura 3 muestra de manera esquemática las regiones que integran el espectro electromagnético: rayos gamma, rayos x, radiación ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas y ondas de radio (Mondragón, 2020).



**Figura 3.** El espectro electromagnético

**Región infrarroja:** es la región del espectro electromagnético, que se encuentra enmarcada por el espectro visible y la región de microondas. Está ubicada entre los números de onda  $13000$  y  $10\text{ cm}^{-1}$ , siendo equivalente a la longitud de onda entre  $0,77$  y  $1000\text{ }\mu\text{m}$ . Se divide en tres zonas: infrarrojo cercano (NIR, Near Infrared) que se extiende desde  $13000$  a  $4000\text{ cm}^{-1}$  ( $0,77 - 2,5\text{ }\mu\text{m}$ ), infrarrojo medio (MIR, Middle Infrared) desde  $4000$  a  $400\text{ cm}^{-1}$  ( $2,5 - 25\text{ }\mu\text{m}$ ) e infrarrojo lejano (FIR, Far Infrared) que abarca desde  $400$  a  $10\text{ cm}^{-1}$  ( $25 - 1000\text{ }\mu\text{m}$ ). Como se puede observar en los valores, es posible utilizar números de onda ( $\bar{\nu}$ ) o longitudes de onda ( $\lambda$ ), sin embargo, la espectroscopía infrarroja (IR) generalmente usa números de onda expresada en unidades de centímetros recíprocos ( $\text{cm}^{-1}$ ) que son iguales a la inversa de la longitud de onda expresada en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), tal como se aprecia en la Ecuación (1) que relaciona ambas unidades (Mondragón, 2020):

$$\bar{\nu}\text{ (en cm}^{-1}\text{)} = \frac{1}{\lambda\text{ (en }\mu\text{m)}} \times 10^4 \quad (1)$$

#### 2.4.2. Espectroscopia de infrarrojo (IR)

La espectroscopia de infrarrojo (IR) es una de las técnicas espectroscópicas que estudia como el modo de vibración de los enlaces covalentes de la molécula se ven afectados por la absorción de la radiación infrarroja. En esta técnica, un haz de luz infrarroja incide sobre la materia y provoca vibraciones en los átomos de una molécula, estas vibraciones se dan porque la energía de la radiación IR es absorbida por los enlaces covalentes de una molécula que se encuentra vibrando en su estado basal a la misma longitud de onda que la radiación infrarroja incidente, provocando con ello una vibración más intensa y con características propias. Como consecuencia del estudio mediante espectroscopia IR, se genera un espectro de infrarrojo de la muestra evaluada. Este espectro consiste en una secuencia de bandas o picos de absorción en un intervalo de frecuencias dentro del infrarrojo, donde cada pico corresponde a un tipo de vibración que ocurrió en un enlace atómico al interactuar el haz de infrarrojo con la muestra (Velandia, 2017).

**Tipos de modos de vibración:** Existen dos tipos de modos de vibraciones: tensión y flexión. Las vibraciones de tensión o también conocidas como estiramiento son cambios en la distancia interatómica que ocurre a lo largo del eje de enlace entre dos átomos y se clasifican en dos tipos: simétrico y asimétrico. Las vibraciones de flexión o deformación se producen por cambios en los ángulos del enlace y se clasifican en cuatro tipos: balanceo, tijereteo, torsión y aleteo (Mondragón, 2020).

**Regiones del espectro IR y sus aplicaciones:** Las regiones espectrales del infrarrojo cercano (NIR), infrarrojo medio (MIR) e infrarrojo lejano (FIR) tienen aplicaciones diferentes debido a la naturaleza de sus absorciones y la instrumentación que utiliza cada región. Según la zona de la región de infrarrojo que se emplee, la espectroscopia IR se puede clasificar en (Bermejo y Moreno, 2014):

- **Espectroscopia de infrarrojo cercano:** emplea la región espectral del infrarrojo cercano (NIR) y estudia la absorción que corresponde a la excitación de sobretonos de frecuencias vibracionales aromáticas y combinaciones de vibraciones fundamentales, lo que proporciona una información estructural compleja. La instrumentación de la espectroscopia NIR usa como fuente de radiación lámparas de tungsteno y celdas de cuarzo o sílice fundida. Su aplicación principal es el análisis cuantitativo de muestra gaseosas, sólidas y líquidas (Lazo-Aguirre, 2019).
- **Espectroscopia de infrarrojo medio:** emplea la región del infrarrojo medio (MIR) y estudia la absorción molecular provocada por la excitación de las vibraciones fundamentales, con el fin de proporcionar información acerca de los enlaces, aportando detalles sobre la composición y la estructura de la muestra estudiada. La espectroscopia MIR utiliza equipos que incluyen la transformada de fourier y accesorios con reflectancia total atenuada. Su aplicación principal es llevar a cabo análisis cualitativos y cuantitativos de gases, líquidos, sólidos y mezclas (Téllez, 2019).
- **Espectroscopia de infrarrojo lejano:** utiliza la región del infrarrojo lejano (FIR) y estudia la absorción originada por las rotaciones moleculares. Su aplicación principal es el análisis cualitativo de compuestos inorgánicas y organometálicos (Bermejo y Moreno, 2014).

#### **2.4.3. Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)**

La espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier o FTIR por sus siglas en inglés (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) es una técnica de análisis espectroscópica que emplea energía de la región del infrarrojo medio (MIR) para analizar una muestra. La espectroscopia FTIR se aplica mediante instrumentos no dispersivos que detectan y miden todas las longitudes de onda simultáneamente, para ello se necesita de un espectrómetro FTIR que basa su funcionamiento en un interferómetro de Michelson (Velandia, 2017). Este interferómetro consta de un divisor de luz y dos espejos uno fijo y otro móvil, de forma que la radiación que proviene de la fuente IR pasa a través del divisor de luz y divide la radiación en dos partes, una que es dirigida al espejo móvil y la otra al espejo fijo que al reflejarse en los espejos vuelven a encontrarse y se produce una señal de interferencia, que

presenta variaciones de intensidad en función del desplazamiento del espejo móvil, dando lugar a un interferograma. La señal adquirida, después de ser enviada a través de la muestra y medida, se decodifica y se transforma en el programa de la computadora, utilizando el artificio matemático de transformada de Fourier, con el fin de transformar el interferograma en un espectro infrarrojo (Mondragón, 2020).

**El espectro de infrarrojo:** La información proveniente de la espectroscopia FTIR se presenta en la forma de un espectro de infrarrojo o de FTIR, el cual está compuesto por una serie de bandas o picos de absorción que aparecen en distintas posiciones e intensidades y puede ser obtenido en absorbancia (picos hacia arriba) o transmitancia (picos hacia abajo). El espectro de FTIR, en el eje horizontal (eje X) se muestran los valores de la radiación infrarroja en números de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ), mientras que en el eje vertical (eje Y) se representan los valores de absorbancia o el porcentaje de transmitancia (Téllez, 2019).

El espectro de infrarrojo se divide en dos regiones importantes: la de grupos funcionales y la de huellas digitales. La región de los grupos funcionales está situada entre  $4000$  a  $1500 \text{ cm}^{-1}$ , los picos que aparecen en esta región provienen de las vibraciones de enlaces presentes en los grupos funcionales de las moléculas orgánicas. Mientras que la región de huellas digitales está comprendida de  $1500$  a  $500 \text{ cm}^{-1}$  y los picos que aparecen en esta región son originados por las vibraciones de los enlaces presentes en la estructura de las moléculas (Carey y Giuliano, 2014).

#### **2.4.4. Técnica de reflectancia total atenuada (ATR)**

En el espectrómetro de FTIR, el dispositivo donde se produce la interacción entre la radiación infrarroja y la muestra se conoce como accesorio de interacción. Hay varios diseños de accesorios según el aspecto físico de la muestra y en función a la forma de interacción. Los accesorios más comunes son los basados en las técnicas de interacción de transmisión, reflectancia difusa y reflectancia total atenuada. Siendo esta última la más utilizada debido a las ventajas que presenta respecto a las otras técnicas, como obtener espectros a partir de muestras en cualquier forma física, realizar una lectura de muestras con una preparación mínima o sin ninguna preparación y no saturar ninguna de las regiones del espectro (Mondragón, 2020).

**La reflectancia total atenuada**, conocida como ATR por sus siglas en inglés (Attenuated Total Reflection) es una de las técnicas de interacción más potentes y versátiles que utiliza la espectroscopía FTIR, fue diseñada originalmente para muestras en estado líquido, pero con el paso del tiempo su uso se ha extendido para investigar muestras en

polvo y sólidas. Esta técnica utiliza un accesorio de ATR que cuenta con cristales de alto índice de refracción y de buena resistencia mecánica como el seleniuro de zinc (ZnSe), germanio (Ge) o el diamante (Mondragón, 2017). El principio de funcionamiento de la técnica ATR ocurre cuando un haz de radiación IR pasa a través del cristal de ATR e incide en la muestra con un ángulo de 45°, el haz IR penetra a una distancia muy pequeña más allá de la interfaz hacia el medio menos denso generando una reflexión interna total. Las múltiples reflexiones internas totales producen una onda evanescente sobre la superficie del cristal y se extiende hasta la muestra que se encuentra a pocas micras de profundidad ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ), siempre que se mantenga el contacto íntimo con el cristal. En las regiones del infrarrojo en el que la muestra se absorbe, la onda evanescente se atenúa y el haz IR sale por el extremo opuesto del cristal una vez medido y genera un espectro resultante de absorción (Téllez, 2019).

#### **2.4.5. La espectroscopia FTIR-ATR aplicada en los alimentos**

La espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR), es una de las técnicas espectroscópicas más sencillas y rápidas que se utiliza ampliamente para caracterizar diversos tipos de alimentos (Mondragón-Cortez et al., 2022). La importancia de la espectroscopia FTIR-ATR, se debe a que permite estudiar el modo de las vibraciones de los enlaces covalentes que caracterizan a los diferentes grupos funcionales, evidenciando su presencia o ausencia en la estructura molecular de un alimento específico. Esta técnica se basa en la emisión de una luz infrarroja que pasa a través de una muestra alimenticia, la cual adsorbe algunas longitudes de onda y permite que las demás pasen y sean leídas por el detector, a las ondas recibidas se les aplica la transformada de Fourier obteniendo como resultado un espectro (Orsini y Aparicio, 2021). El espectrómetro FTIR es donde se realiza a cabo esta interacción haz de infrarrojo-alimento y para que sea una interacción confiable se utiliza un accesorio ATR que nos permite colocar la muestra alimentaria sin ningún tipo de preparación de forma rápida y obtener espectros de FTIR de muy buena calidad con picos de absorción claros y bien definidos (Molina, 2019).

La espectroscopía FTIR-ATR presenta un enorme potencial en la industria de alimentos, se utiliza para la caracterización de alimentos, resolver problemas de adulteración (productos lácteos, café, miel y aceite de oliva), determinar parámetros de calidad de ingredientes, determinar contaminantes en los alimentos, para solucionar problemas de seguridad alimentaria, identificar compuestos específicos en los alimentos y revelar información sobre el tipo de moléculas presentes en los alimentos como carbohidratos, proteínas, lípidos y agua (Téllez, 2019).

## 2.5. Comportamiento térmico del almidón

**Análisis térmico:** es un grupo de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales. Esto debido a que, cuando se calienta o enfría un material, la composición química y la estructura experimentan cambios importantes como la fusión, sublimación, solidificación, sinterización, oxidación, cristalización, descomposición etc. En general el estudio de estos cambios se hace midiendo las propiedades termo físicas de una muestra al ser sometida a un programa de temperatura controlada. El análisis térmico permite evaluar las propiedades físicas y químicas de una muestra cuando se somete a diferentes temperaturas, permitiendo identificar las transiciones más importantes que son consecuencia de la temperatura. Entre las principales técnicas de análisis térmico que estudian e investigan el comportamiento térmico de una muestra, se encuentran la calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termogravimétrico (TGA), análisis térmico diferencial (DTA), análisis termomecánico (TMA) y el análisis mecánico dinámico (ADM) (Hancoo, 2021).

Las diferentes técnicas de análisis térmico son aplicadas en campos como control de calidad, caracterización de polímeros, investigación de productos alimenticios y farmacéuticos, en el estudio de materiales como arcillas, minerales, metales y aleaciones. Entre ellas, la termogravimetría y calorimetría son consideradas como la herramienta más comúnmente utilizada para la identificación y caracterización de materiales y polímeros. Cada una de estas técnicas provee información diferente, a la hora de caracterizar térmicamente a un material. La termogravimetría (TGA) mide la propiedad de la masa, mientras que la calorimetría diferencial de barrido (DSC) es asociada al cambio de energía y mide la propiedad de la entalpía (Prieto, 2007).

### 2.5.1. Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico o también conocido como TGA por sus siglas en inglés (Thermogravimetric analysis), es una técnica del análisis térmico que mide la pérdida de peso de una muestra en función de la temperatura o tiempo, cuando ésta es sometida a un programa controlado de temperatura bajo condiciones de velocidad de calentamiento y una atmosfera específica. Esta técnica consiste en que la muestra es calentada en el horno de un equipo llamado termobalanza y se va midiendo la variación del peso a medida que es calentada. La variación de peso identificada permite determinar y evaluar bajo qué condiciones se descompone la muestra durante todo el proceso de calentamiento (Zamora y Amador, 2019). Como resultado de análisis TGA se obtienen los datos del porcentaje de pérdida de peso con respecto a la temperatura, los cuales se expresan gráficamente en un termograma o curva TGA,

esta curva se puede derivar con ayuda de un sistema de análisis de datos para obtener un diagrama termogravimétrico diferencial o curva DTG, que nos da información sobre las distintas transformaciones que tiene la muestra (Rojas et al., 2014).

**El equipo termogravimétrico:** La termobalanza es un equipo utilizado para realizar el análisis TGA, está compuesto por cinco partes importantes: una microbalanza electrónica con su equipo de control, un horno con sensores de temperatura (termocupla), un programador de temperatura, un controlador de atmosfera y un microprocesador. La muestra se coloca en un soporte cuyo diseño y forma varían según el tamaño y la condición de la muestra. El soporte está conectado a una microbalanza que se encarga de monitorear el comportamiento de la masa en la muestra, mientras que la termocupla, situada cerca del soporte, monitorea el comportamiento de la temperatura. Tanto el soporte como la termocupla se ubican dentro de una cavidad con atmosfera controlada, que contiene un gas inerte como nitrógeno, argón, helio o un gas que interactuare con la muestra, como el oxígeno (Prieto, 2007).

**Presentación de resultados del análisis termogravimétrico:** El resultado de un análisis termogravimétrico se presenta en forma de una gráfica conocida como termograma o curva TGA, la cual nos da información sobre la temperatura inicial, temperatura final y la pérdida peso de cada etapa del proceso que tiene la muestra durante el análisis. En la curva TGA se presenta en el eje de las ordenadas “Y” los valores de pérdida de peso expresados en porcentaje (%) o miligramos (mg) y en el eje de las abscisas “X” se muestra los valores de la temperatura (°C) o el tiempo (min). En el análisis TGA además del termograma se puede construir la gráfica termogravimétrica diferencial conocida como la curva DTG. La curva DTG es la primera derivada de la curva TGA frente a la temperatura o al tiempo y se interpreta como la velocidad de la pérdida o ganancia de peso expresada en unidades de %/°C, %/min, mg/°C o mg/min (Salazar, 2022). La curva DTG ayuda a identificar con mayor claridad las temperaturas del proceso (temperatura inicial y final), teniendo como parámetro importante la temperatura máxima, que es la temperatura de máxima velocidad de pérdida de peso o de máxima velocidad del proceso en general (Rojas et al., 2019).

**Estabilidad y descomposición térmica de los almidones por TGA:** El análisis termogravimétrico se utiliza ampliamente para determinar la estabilidad térmica y estudiar las reacciones de descomposición térmica de los almidones (Lemos et al., 2018). La curva termogravimétrica o curva TGA muestra información sobre, el porcentaje de pérdida de peso, temperatura inicial y temperatura final de cada etapa del proceso de descomposición de los almidones; dicho proceso de descomposición puede ser dividida en tres etapas, cada una de ellas se relaciona con pérdidas de peso. La etapa 1, es la pérdida de peso debido a la evaporación

de sustancias volátiles, principalmente la evaporación del agua. La etapa 2, es la pérdida de peso debido en gran medida a la descomposición de los polímeros de almidón (amilosa y amilopectina). La etapa 3, es la pérdida de peso debido principalmente a la carbonización de materias orgánicas y no volátiles, también se debe a la descomposición de polisacáridos de alto peso molecular (Moo-Huchin et al., 2015). Mientras que la curva termogravimétrica diferencial o curva DTG, muestran los cambios de peso expresados como picos los cuales proporcionan información sobre la máxima velocidad de pérdida de peso. Al comparar el parámetro de la temperatura de máxima velocidad de pérdida de peso se puede indicar si un almidón se descompone más fácilmente que otro (Carrasco et al., 2010).

### 2.5.2. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido o también conocida como DSC (siglas en inglés, Differential Scanning Calorimetry) es una técnica del análisis térmico que permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia cuando esta es sometida a una temperatura constante a lo largo de un tiempo determinado o cuando es sometida a un proceso de calentamiento o enfriamiento a una velocidad constante en un determinado rango de temperatura (Zalazar-Oliva et al., 2021). En el análisis DSC, se calientan la muestra y el material de referencia de manera independiente, lo que permite medir directamente la variación en el flujo de calor para mantener la misma temperatura en ambas, de este modo, se obtienen los datos en forma de entradas diferenciales de calor en función de la temperatura. Los resultados del análisis DSC se reportan en termogramas que grafican la diferencia de flujo de calor entre la muestra y la referencia en función del tiempo o la temperatura. Los termogramas presentan una línea base y cualquier desviación de esta línea ya sea en forma de picos o cambios de pendiente, representa una transición o transformación térmica de la muestra (Zamora y Amador, 2019).

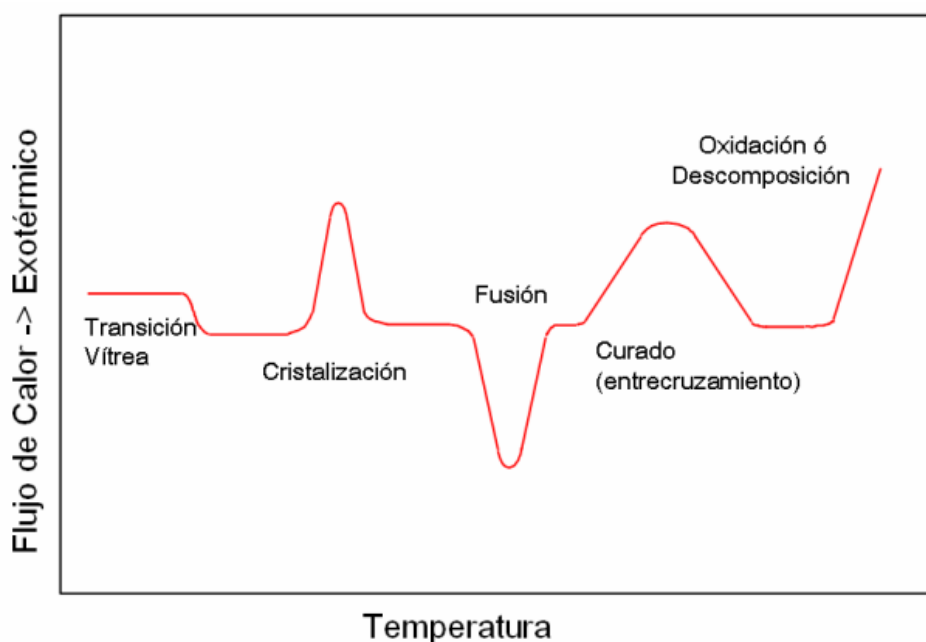
**Métodos DSC:** Hay dos tipos de métodos ampliamente usados y conocidos para obtener datos en DSC: por potencia compensada y por flujo de calor. En la DSC de potencia compensada, la muestra y la referencia se sitúan por separado en hornos idénticos y se controlan de manera independientemente. A lo largo del ciclo térmico, se mantiene estrictamente la igualdad de la temperatura de ambas, controlando la potencia que se suministra a cada uno de los hornos, de este modo, bajo condiciones experimentales, se puede calcular la entalpía relativa de transformación entre ellas a partir de la diferencia de potencia suministrada a ambos hornos. En la DSC de flujo de calor, la muestra y la referencia se colocan en un mismo horno, ambas son montadas sobre un mismo disco metálico, para mantener un contacto térmico

adecuado; al ocurrir un cambio de entalpía en la muestra se produce una diferencia de temperatura entre esta y la referencia, de esta manera, se mide la diferencia de flujo de calor entre la muestra y el material de referencia, cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura en una atmósfera controlada (Granados, 2017).

**Curvas DSC:** Los equipos DCS están conectados a un sistema de adquisición de datos y a una computadora, lo que permite mostrar como resultado una gráfica de un termograma, la cual presenta los datos medidos en forma de curvas; estas curvas DSC vienen trazadas en términos de flujo de calor ( $mW$ ) versus el tiempo ( $t$ ) o temperatura ( $T$ ), pero además es posible calcular otros datos a partir de los valores medidos originalmente y trazar sus gráficos respectivos. La curva DSC permite tener información rápida del proceso de medición total como: transiciones, reacciones y cambios de calor específico; además, la curva DSC permite ver si el rango de temperatura ha sido cubierto totalmente, si las temperaturas características y las áreas de los picos se encuentran dentro del rango esperado (Vele, 2019).

**Transiciones térmicas estudiadas con DSC:** La caracterización de las transiciones térmicas que se presentan en la mayoría de los materiales polímeros se puede estudiar por la técnica DSC, dependiendo de la geometría de las desviaciones de la línea base, las transiciones se asocian con un tipo de fenómeno determinado y se analizan de manera diferente. Las transiciones más comunes en el análisis de materiales mediante la técnica de DSC son: la transición vítrea, cristianización, fusión, curado y descomposición, todas estas transiciones se presentan en las curvas del termograma DSC de la Figura 4. La primera transición que se observa corresponde a la transición vítrea, esta transición se identifica como un cambio drástico en forma de escalón en la línea y no hay ninguna depresión o pico, esto es porque durante la transición vítrea no hay calor latente, pero si existe un cambio de capacidad calorífica por lo que se trata de una transición de segundo orden. Las transiciones de cristianización y fusión se presentan como picos en el termograma y tienen calores latentes por lo que son denominadas transiciones de primer orden. La cristalización es un proceso exotérmico, donde un material pasa a un estado más estable liberando energía durante la formación de estructuras cristalinas; en cambio, la fusión es un proceso endotérmico que absorbe energía para superar las interacciones intermoleculares. Los datos que se obtienen de los picos de cristianización y fusión son la temperatura de inflexión, que es cuando se genera una desviación de línea base, la temperatura en la que se alcanza el valor máximo o mínimo del pico (según el fenómeno) y la entalpía asociada a dicho fenómeno, que corresponde al área delimitada por el pico de interés. Las dos últimas transiciones que muestra el termograma es el entrecruzamiento de cadenas el curado en los materiales termoestables en el cual se libera

energía y la transición de descomposición que corresponde al rompimiento de enlaces covalentes y se representa como un fenómeno exotérmico (Prieto, 2007).



**Figura 4.** Termograma DSC de las transiciones térmicas

**Aplicaciones de la calorimetría diferencial de barrido:** Esta técnica es utilizada ampliamente para la determinación de la entalpia, determinación de pureza de los compuestos, estudio de la estabilidad de oxidación, estudio de transición de cristalización de polímeros, determinación de la temperatura de transición vítrea de polímeros, estudio de cinética de las reacción químicas, estudio del calor específico y de procesos de envejecimiento, determinación de rangos de temperaturas características de transformación o transición, estudio de compatibilidad entre polímeros, estudio de transiciones de fusión, estudio de transiciones de ebullición, evaluación de diagramas de fases, mediciones comparativas de sustancias y estudio de gelatinización de polímeros (Hanco, 2021).

**Proceso de gelatinización del almidón:** La gelatinización es una transición de orden y desorden que experimentan los polímeros de almidón sometidos a procesos de calentamiento lo cual tiene gran impacto en la calidad, procesamiento y estabilidad de los productos basados en almidón, por lo que se considera como la transición más importante de los almidones. En la gelatinización ocurren cambios irreversibles que provocan el hinchamiento y ruptura de los gránulos de almidón con una consecuente pérdida de cristalinidad. Los cambios que ocurren en esta transición están influenciados por factores intrínsecos como el tipo de almidón y el tamaño de los gránulos, y por factores extrínsecos

como la velocidad de calentamiento, el contenido de humedad, el daño mecánico de los gránulos y las condiciones de extracción del almidón (Pineda-Gómez et al., 2010). El proceso de gelatinización consiste en que el agua penetra inicialmente en la región amorfa de los gránulos de almidón. Cuando el almidón se calienta a una temperatura específica en presencia de agua, los gránulos de almidón absorben el agua y se hinchan aumentando su volumen, por lo que pierde su birrefringencia (pérdida de la orientación molecular) y se vuelve transparente. Posteriormente, el agua se esparce de las cadenas de almidón a la superficie de los cristales, provocando que las dobles hélices se desplieguen hasta que la estructura granular queda fragmentada casi completamente, por lo que el almidón pierde su estructura cristalina (pérdida de la estructura de doble hélice) y adquiere una textura solución-gel, esta transición térmica se conoce como gelatinización y la temperatura a la que el almidón pierde la estructura cristalina se llama temperatura de gelatinización. La temperatura de gelatinización es una propiedad característica de cada almidón y está correlacionada positivamente con la longitud de la cadena ramificada de la amilopectina (Ai y Jane, 2016).

#### **Comportamiento térmico de la gelatinización del almidón por DSC:**

En la evaluación de alimentos por técnicas calorimétricas, se pueden observar fenómenos térmicos que pueden ser endotérmicos y exotérmicos, siendo la gelatinización uno de los procesos endotérmicos de vital importancia que contribuyen a la aplicación industrial del almidón (Peña, 2017). Aunque existen varios métodos de análisis, la calorimetría diferencial de barrido (DSC) se ha convertido en la técnica preferida para estudiar el comportamiento endotérmico de gelatinización de los almidones, sirve para medir tanto el rango de la temperatura como el cambio de entalpía de la gelatinización (Tao et al., 2018). Los parámetros de gelatinización que se reportan del pico endotérmico de la curva DSC son detallados a continuación (Lagos, 2016):

- **Temperatura inicial ( $T_0$ ):** Es la temperatura en la cual inicia el hinchamiento del gránulo por la entrada de agua en las estructuras amorfas de los gránulos, el almidón comienza a perder su ordenamiento molecular.
- **Temperatura pico ( $T_p$ ):** Es la temperatura en la cual el gránulo está totalmente hidratado y se indica la pérdida de la estructura cristalina del gránulo del almidón, también se registra los valores más altos de absorción de calor que está asociada a la calidad de la estructura cristalina.
- **Temperatura final ( $T_f$ ):** Es la temperatura en la cual los gránulos de almidón perdieron su estructura (amorfa y cristalina), están totalmente desintegrados.

- **Entalpía gelatinización ( $\Delta H_{Gel}$ ):** Es la energía necesaria requerida por el gránulo del almidón para poder llevar a cabo el proceso de gelatinización y es obtenida a partir del área que se encuentra debajo de la curva del pico de la gelatinización (Pardo et al., 2013).

Los parámetros de temperatura de gelatinización, se ven afectadas por el tamaño de los gránulos de almidón, cuanto mayor sea el tamaño de los gránulos del almidón, menor será la temperatura de gelatinización de los gránulos, esto se debe a que los gránulos grandes de almidón pueden absorber fácilmente más agua, por lo que el almidón se hincha más fácil y tiene una temperatura de gelatinización más baja (Hadisoewignyo et al., 2017). Mientras que el parámetro de la entalpía de gelatinización se ve afectada por el contenido de estructuras cristalinas, cuando más es el contenido de estructuras cristalinas que presenta el almidón, se necesita una mayor cantidad de energía para gelatinizar sus gránulos. Valores superiores en la temperatura y entalpía de gelatinización, indican que se necesita mayor tiempo de procesamiento o temperaturas de operación elevadas, lo que afecta los costos energéticos del proceso de gelatinización (Riera et al., 2021).

## 2.6. Color y propiedades funcionales tecnológicas del almidón

### 2.6.1. El color

El color representa una propiedad sensorial que se puede evaluar mediante parámetros físicos medibles, en la industria de alimentos es un aspecto crucial para el aseguramiento de la calidad de los productos. El color es afectado por diferentes factores, tales como la luz, el espectro, el punto de vista del observador, la cantidad de pigmentos, el tamaño, la textura y el brillo de la muestra que se examina (Arone, 2019).

**Color en alimentos:** es una característica organoléptica de los alimentos que se percibe a través de la vista. Se considera un aspecto crucial en la valoración de los alimentos y un criterio importante en su selección. En los alimentos de origen vegetal, el color está asociado con el grado de madurez y su adecuación para el consumo. En la actualidad, la seguridad y la calidad de los alimentos son criterios fundamentales, por lo que las técnicas para medir el color se han actualizado con el propósito de llevar a cabo las pruebas físicas en los alimentos de forma más eficiente, logrando una medición del color de manera precisa, rápida y objetiva (Ruiz, 2023).

**El sistema CIELAB:** es un método que se ha venido empleando para analizar el color en los alimentos, identificar inconsistencias para establecer límites de color según el tipo de producto que se evalúa, para esto se emplean las coordenadas  $L^*a^*b^*$ , que determinan si un producto cumple o no con los estándares de calidad. El método CIELAB es

un sistema de coordenadas cartesianas que incluye tres ejes fundamentales: el eje vertical, representado por ( $L^*$ ), y los dos ejes horizontales ( $a^*$  y  $b^*$ ). El valor de  $L^*$  indica la luminosidad del color, que oscila entre 0 para el negro y 100 para el blanco. El eje horizontal  $a^*$ , indica la cantidad de rojo o verde en un color, si un color contiene rojo, el valor de  $a^*$  será positivo, pero si un color contiene verde, el valor de  $a^*$  será negativo. El eje horizontal  $b^*$ , indica la cantidad de amarillo o azul en un color, un valor positivo de  $b^*$  muestra la presencia de color amarillo, mientras que un valor negativo de  $b^*$  señala la presencia de color azul (Quispe, 2023).

**El color de un alimento en el espacio CIELAB:** debe ser caracterizado según los tres atributos del color: el tono, el croma y el valor:

- **El tono:** es la manera en que reconocemos y nombramos un color, la característica que permite diferenciar una familia de otra, de colores cromáticos, como rojo, amarillo, verde, azul o púrpura. Representa la longitud de onda dominante del color y suele ser lo primero que se percibe al hablar de él. Además, influye en la percepción del observador, ya que los tonos más iluminados generan sensación de amplitud y lejanía, mientras que los más oscuros sugieren cercanía y proximidad (García, 2016).
- **El croma o saturación:** describe la intensidad o grado de pureza del color, variando desde su máximo hasta el gris en su punto mínimo. Un color muy saturado es puro y vibrante, mientras que la ausencia de saturación lo acerca al gris y lo hace apagado. Además, la saturación distingue colores puros y sus variaciones dentro de la rueda cromática, como el verde amarillento y el verde azulado (Aguirre, 2021).
- **El valor o luminosidad:** Es la propiedad que determina la claridad u oscuridad del color, En los colores, una saturación del 100 % con máxima luminosidad da como resultado un color puro, mientras que al 0 % se percibe como negro absoluto. A medida que la luminosidad aumenta, el color se aclara hasta volverse blanco en su punto máximo (Aguirre, 2021).

En el espacio de color CIELAB, los atributos de color se pueden obtener mediante los valores  $L^*a^*b^*$ . La luminosidad se encuentra en el eje vertical representado por ( $L^*$ ), mientras que la tonalidad se representa en los dos ejes horizontales ( $a^*$  y  $b^*$ ), donde  $a^*$  indica el ángulo *hue* (tono) en una escala de verde (-60) a rojo (+60) y  $b^*$  indica el ángulo *hue* (tono) en una escala de azul (-60) a amarillo (+60) (Von y Machado, 2005).

### 2.6.2. Propiedades funcionales tecnológicas del almidón

Las propiedades funcionales tecnológicas son importantes porque permite aclarar la posible aplicación tecnológica que se le puede dar a los almidones, así como su comportamiento al ser integrados en algún producto. Las propiedades funcionales tecnológicas más relevantes que se deben considerar para establecer el uso del almidón son: capacidad de retención de agua, solubilidad, sinéresis, poder de hinchamiento entre otras (Ríos, 2014).

- **Capacidad de retención de agua (CRA):** también conocida como capacidad de absorción de agua, es una propiedad funcional, que se define como la cantidad de agua que un almidón puede retener en su estructura, la cual es medida en granos de agua por gramo de almidón. En general los almidones pueden absorber cantidades significativas de agua, las cuales pueden variar según el tipo de almidón, el tamaño de los gránulos, la temperatura y las modificaciones del almidón, dichos factores influyen en esta propiedad aumentando o disminuyendo su capacidad (Manzanillas, 2018).

La capacidad de retención de agua tiene un papel importante en la industria alimentaria y en la investigación de almidones, ya que afecta las características como la textura, la viscosidad y la estabilidad de los productos alimenticios. La CRA es fundamental en la textura de los alimentos, donde los almidones con mayor capacidad de absorción pueden contribuir a una textura más suave y elástica, y pueden utilizarse en productos horneados, cárnicos, sopas, salsas (Salcedo-Mendoza et al., 2018).

- **Solubilidad y poder de hinchamiento:** son propiedades funcionales que proporcionan evidencia sobre la intensidad de la interacción entre las cadenas de almidón. Dicha interacción está influenciada por la proporción de amilosa y amilopectina, y por las características de ambas en lo que respecta a peso molecular, distribución, grado y longitud de ramificación. La diferencia entre la solubilidad y el poder de hinchamiento de los almidones también se debe a la estructura morfológica de los gránulos de almidón. Cuando las moléculas de almidón se calientan en exceso de agua, se rompe la estructura cristalina y las moléculas de agua se unen por enlaces de hidrógeno a los grupos hidroxilo expuestos de amilosa y amilopectina, lo que provoca un aumento en la solubilidad y el hinchamiento de los gránulos (Trela, 2018).

El poder de hinchamiento se define como la cantidad de agua que un almidón puede absorber por gramo de almidón a una temperatura determinada y a una cierta concentración de almidón, mientras que la solubilidad representa los porcentajes de amilosa y amilopectina lixiviados a esta temperatura (Marquez, 2022).

- **Sinéresis en refrigeración y congelación:** la sinéresis se refiere a la separación espontánea del agua y se considera un factor clave en el desarrollo de los productos refrigerados. Evaluar el porcentaje de sinéresis en procesos de refrigeración y congelación es importante, debido a que indica la cantidad de agua que se pierde durante el almacenamiento, la cual afecta las propiedades de los productos y su tiempo de vida útil. Por otro lado, la estabilidad de congelación y descongelación es una característica fundamental del almidón, que se emplea para evaluar la resistencia estructural ante cambios de temperatura no deseados que ocurren durante estos procesos (Maza, 2020).

La congelación y descongelación de los geles de almidón a menudo resultan en sinéresis, es decir, el líquido se separa del gel de almidón. La sinéresis puede ocurrir no sólo debido a la congelación y descongelación, sino también después de un almacenamiento en la refrigeración, o incluso después de permanecer a temperatura ambiente (Peña, 2017).

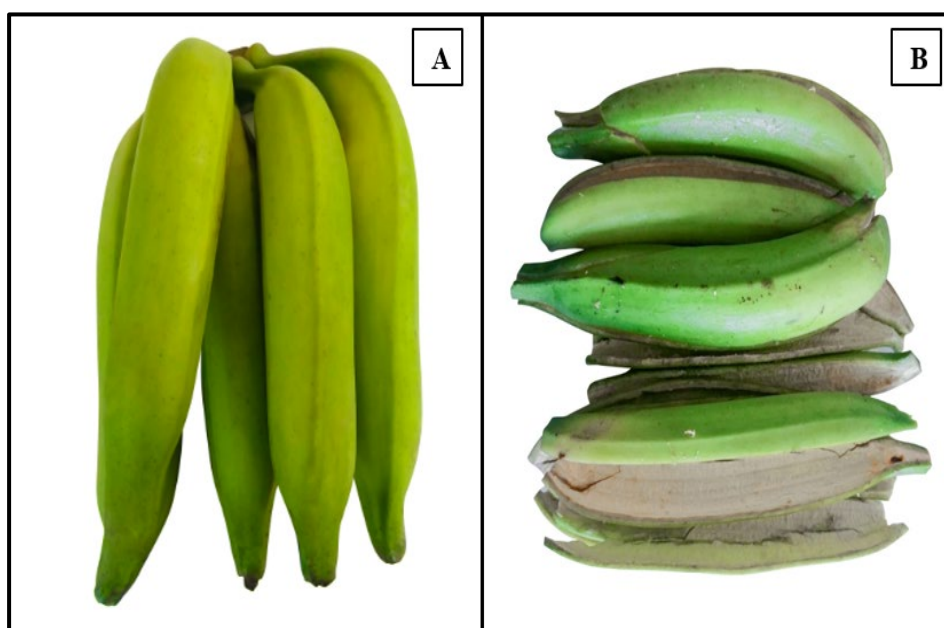
### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

El presente trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de Análisis de Alimentos, Laboratorio Central de Investigación, y en el Laboratorio de Investigación de Ciencia de Alimentos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva; ubicada en la ciudad de Tingo María, distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, geográficamente está situada a una altitud de 660 m.s.n.m., a 09° 17' 08" de latitud sur, y 75° 59' 52" de latitud oeste, con clima tropical húmedo; humedad relativa de 84 % y una temperatura promedio anual de 24 °C.

#### 3.2. Materia prima

La materia prima empleada fueron cáscaras de plátano verde (Figura 5 y Figura 6) de la variedad Bellaco (*Musa paradisiaca* AAB) y Guayabo (*Musa paradisiaca* AABB), las cuales procedían de plantas cultivadas en las parcelas del Centro de Investigación y Producción Tulumayo Anexo La Divisoria (CIPTALD) perteneciente a la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en el distrito de José Crespo y Castillo, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, situada geográficamente a una altitud de 620 m.s.n.m., a 09° 09' 00" de latitud sur y 75° 59' 00" de longitud oeste. Para la ejecución de esta investigación, se recolectó 20 kg de plátano verde de cada variedad y se obtuvo aproximadamente 7 kg de cáscara de cada una.



**Figura 5.** Plátano Bellaco (*Musa paradisiaca* AAB): Fruto (A) y Cáscara (B)



**Figura 6.** Plátano Guayabo (*Musa paradisiaca* AABB): Fruto (A) y Cáscara (B)

### 3.3. Equipos, materiales y reactivos

#### 3.3.1. Equipos

Licadora marca Oster, modelo BLST4655, México; Centrífuga marca MPW, modelo MPW-352R, Polonia; Estufa de secado marca MMM Group, modelo EC-222-ECO, Alemania; Homogeneizador marca IKA, modelo T 10 basic ULTRA-TURRAX®, Alemania; Balanza de análisis marca KERN, modelo ABT100-5NM, Alemania; Calorímetro marca SETARAM, modelo LABSYS evo, Francia; Espectrofotómetro marca Konica Minolta Sensing, modelo CM5, Japón; Microscopio electrónico de barrido (SEM) de mesa marca Phenom World, modelo ProX, Holanda; Espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier marca Lumex, modelo InfraLUM FT-08, Canadá; Espectrofotómetro UV/VIS marca Thermo Fisher Scientific, modelo Genesys 150, EE.UU.; Vórtex marca Scientific Industries SI™, modelo SI0256, EE. UU.; Centrífuga marca Hettich, modelo EBA 280S, Alemania; Baño maría marca Memmert, modelo WNB 22, Alemania; Ultracongeladora marca GIMMSA, modelo CCEL-580, Alemania.

#### 3.3.2. Materiales

Cuchillo de acero inoxidable de 24 cm; Tablero de picar de plástico; cuchara de acero inoxidable; Balde de plástico de 4 y 8 litros; Jarras de plástico de 1 litro; Coladeras de plástico (Ø 20 cm); Mortero con pilón de porcelana; Tela de algodón; Tamiz Tyler N° 80 (Ø 180 µm); Pinzas de laboratorio; espátula de laboratorio; Placas Petri de vidrio;

Desecador de vidrio; Varilla de vidrio; Matraz erlenmeyer de 100 mL y 500 mL; Vasos precipitados de vidrio de 100 mL, 600 mL y 1000 mL; Pipetas graduadas de vidrio de 5 mL; Probetas graduadas de vidrio de 100 mL; Tubo centrifuga cónico de 10 mL, 15 mL y 50 mL; Bolsas doypack trilaminadas; Portamuestras de vidrio; Paño de microfibra.

### 3.3.3. Reactivos

Ácido ascórbico ( $C_6H_8O_6$ ) 98 % para uso alimentario, marca Frutarom, Perú; Hipoclorito de sodio ( $NaClO$ ) al 5%, marca Daryza, Perú; Almidón de papa ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> al 99 % para uso analítico, marca Merck, Alemania; Isopropanol ( $C_3H_8O$ ) al 99%, marca Sigma-Aldrich, USA; Etanol ( $C_2H_6O$ ) al 95%, marca Millipore, USA; Hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) al 97 %, marca Fermont, México; Ácido acético ( $C_2H_4O_2$ ) al 99 %, marca Merck, Alemania; Amilosa de almidón de papa, marca Sigma Aldrich, EE. UU.; Yodo ( $I_2$ ), marca Merck, Alemania, Yoduro de potasio ( $KI$ ), marca Merck, Alemania; Agua destilada ( $H_2O$  d).

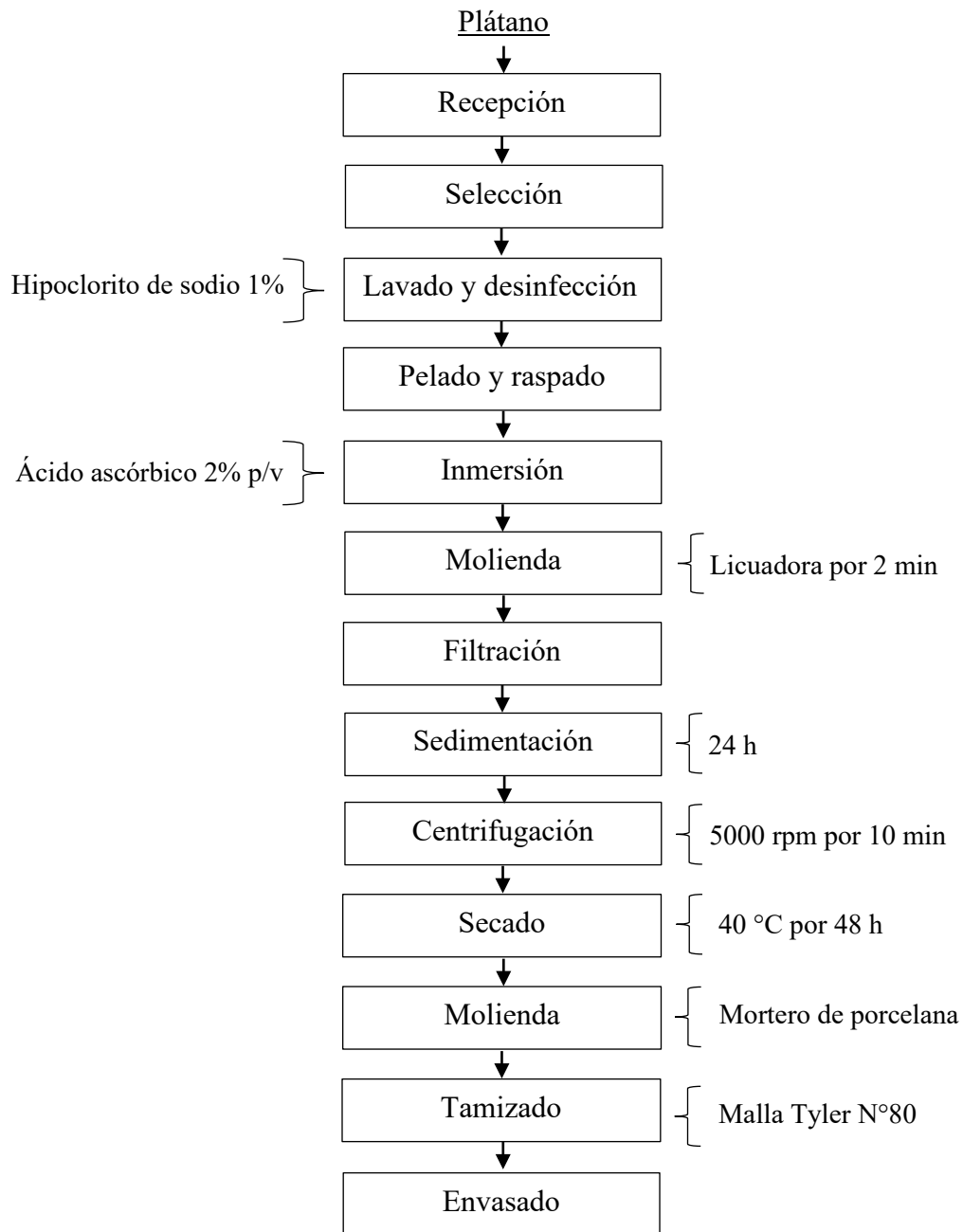
### 3.4. Métodos de análisis

- Caracterización morfológica por microscopía electrónica de barrido (SEM), descrito por Zhang et al. (2023); Monroy et al. (2017).
- Identificación de los grupos funcionales por espectroscopia de infrarrojo por transformada de fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR), descrito por Orsini y Aparicio (2021).
- Determinación de la estabilidad térmica por termogravimetría (TGA), descrito por Londoño-Restrepo et al. (2014).
- Determinación de la gelatinización por calorimetría diferencial de barrido (DSC), descrito por Utrilla-Coello et al. (2013).
- Análisis del contenido de amilosa y amilopectina, descrito por Sonkar et al. (2023).
- Determinación del color en el sistema CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), descrito por Barraza-Jáuregui y Siche (2021); Guo et al. (2019).
- Capacidad de retención de agua (CRA), descrito por Kunyaneet et al. (2023).
- Solubilidad (S) y poder de hinchamiento (PH), método descrito por Nasrin et al. (2015).
- Sinéresis (Si), descrito por Marta et al. (2019).

### **3.5. Metodología experimental**

#### **3.5.1. Obtención de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo**

El almidón de cáscara de plátano de la variedad Bellaco y Guayabo se obtuvo por el método húmedo, adaptando la metodología propuesta por Alarcón y Caicedo (2021). En la Figura 7, se detalla el flujograma del proceso para la obtención de almidón, se recibieron los plátanos de cada variedad en recipientes de plásticos rotulados, luego se realizó la selección para separar los frutos que presentaron daños mecánicos, se lavó con agua corriente y se desinfectó en una solución de hipoclorito de sodio al 1% durante 10 minutos, se pelaron manualmente con un cuchillo de acero inoxidable y mediante cortes transversales se desprendió el fruto obteniéndose las cáscaras, seguidamente con ayuda de una cuchara se raspó la parte interna de las cáscaras (endocarpio) en tiradas delgadas y a medida que se obtenían inmediatamente se realizó la inmersión de las tiras de cáscaras raspadas en una solución de ácido ascórbico al 2% (p/v) durante 10 minutos de esa manera se evitó el pardeamiento enzimático, seguidamente se molió en una licuadora a velocidad máxima por 2 minutos hasta obtener una pasta, luego se filtró la pasta mediante un colador y una tela de algodón, se lavó con agua potable varias veces hasta que el líquido de salida fue cristalino, se dejó sedimentar el líquido en un recipiente a temperatura ambiente durante 24 horas, pasado este tiempo se eliminó el sobrenadante de la parte superior del recipiente y al sedimento se le agregó agua y se homogenizó, se llenó en tubos de 50 mL y se centrifugó a 5000 rpm durante 10 minutos obteniendo el almidón húmedo que fue colado sobre placas petri, las cuales fueron secadas en una estufa a temperatura de 40 °C durante 48 horas, se molieron en un mortero hasta conseguir un polvo finamente homogéneo, luego se tamizaron a través de una malla Tyler N°80 (180 µm de apertura de poro), finalmente fueron envasados en tubos de polipropileno con tapa rosca con las siguientes codificaciones; ACB = Almidón de cáscara de plátano Bellaco, ACG = Almidón de cáscara de plátano Guayabo, y se guardaron en bolsas doypack trilaminadas con zipper hasta su respectivo análisis.



**Figura 7.** Flujograma del proceso de obtención de almidón presente en la cáscara de plátano verde mediante el método húmedo.

### 3.5.2. Caracterización morfológica de los gránulos de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo

Las características morfológicas de los gránulos de los almidones aislados de la cáscara de plátano se determinaron por microscopía electrónica de barrido (SEM) siguiendo la metodología propuesta por Zhang et al. (2023) con algunas modificaciones. Para observar la forma, superficie y tamaño de los gránulos se utilizó un microscopio electrónico de

barrido modelo Phenom ProX. Las muestras de almidón se fijaron en un portamuestras de aluminio usando una cinta de carbono adhesiva de doble cara, formando una capa delgada y uniforme, la misma que fue colocada en la platina del equipo y se aseguró para evitar movimientos durante el análisis. Se ajustó la posición y el enfoque de la muestra utilizando los controles del microscopio y se obtuvieron las micrografías de los gránulos de almidón a un voltaje de aceleración de 15 kV con aumentos desde 420x a 2350x, utilizando el software Phenom Pro Suite (Software de adquisición automatizada de imágenes en microscopios SEM). Luego la distribución de tamaño de los gránulos fue procesada a partir de las micrografías en el programa de procesamiento de imágenes ImagenJ 1.53k siguiendo la metodología de Monroy et al. (2017). Se midieron las áreas de 105 partículas al azar, luego se convirtió esas áreas a diámetros equivalentes esféricos. Finalmente, se elaboró los histogramas de distribución de tamaño, considerando 8 intervalos de frecuencia ajustada al número de mediciones, se reportaron los rangos y promedio de diámetro equivalente de los gránulos.

**Análisis estadístico:** Los resultados del tamaño de partícula considerando el diámetro equivalente esférico, fueron analizados estadísticamente utilizando la “prueba t de student” para muestras pareadas, con un nivel de significancia ( $P < 0,05$ ), empleándose el Software de análisis estadístico INFOSTAT 2020 versión libre.

### **3.5.3. Identificación de grupos funcionales en la estructura de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo**

La identificación de los grupos funcionales presentes en la estructura de los almidones aislados de la cáscara de plátano se realizó por la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR), siguiendo la metodología descrita por Orsini y Aparicio (2021). Los espectros de fondo y los espectros de las muestras fueron analizados mediante un espectrómetro infrarrojo con transformada de fourier (FTIR) modelo InfraLUM FT-08, se trabajó a una temperatura de  $20 \pm 2$  °C, programando el experimento con un rango de lectura desde 500 hasta  $4000 \text{ cm}^{-1}$ , con una resolución espectral de  $4 \text{ cm}^{-1}$  y tomándose un total de 256 barridos. Primero se procedió a obtener el espectro de fondo o background, resultante de la lectura del equipo con el accesorio de reflectancia total atenuada (ATR) de reflexión única sin muestra y del cristal de seleniuro de zinc limpio, seguidamente se obtuvo por separado los espectros FTIR-ATR de cada una de las muestras de almidón y luego se procedió a comparar los espectros de las muestras de interés (ACB y ACG) con el espectro del almidón control (Almidón de papa al 99% de grado analítico marca Merck), para identificar las bandas de absorción y picos de transmitancia característicos.

Para cada lectura se colocó una cantidad adecuada de muestra sobre la superficie del cristal de seleniuro de zinc que posee el accesorio, luego se ejerció presión sobre la muestra para asegurar un buen contacto. Entre cada lectura realizada, el cristal de ZnSe y el accesorio ATR se limpió exhaustivamente con un paño de microfibra e isopropanol, para evitar interferencias espectrales en la siguiente medición. Los espectros obtenidos por el software SpectraLUM (propio del equipo), fueron procesados para optimizar su aspecto mediante el software de análisis de datos y generación de gráficos científicos OriginPro8. En los espectros se ubicaron el número de onda, los picos o bandas de absorción lo cual permitió determinar el modo de las vibraciones de enlaces y el grupo funcional al que pertenece.

### **3.5.4. Determinación del comportamiento térmico de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo**

#### **3.5.4.1. Análisis termogravimétrico (TGA)**

La estabilidad térmica de los almidones fue determinada por termogravimetría, según la metodología de Londoño-Restrepo et al. (2014) con ligeras modificaciones. Se utilizó un calorímetro previamente acondicionado con un flujo constante de gas argón (100 mL/min) por 30 minutos y la calibración de la temperatura se realizó con un patrón de indio y estaño al 99,99% de pureza. Se pesó  $10 \pm 0,5$  mg de muestra de almidón dentro de un crisol de aluminio de 75  $\mu$ L de capacidad, seguidamente fue introducido en el equipo. Se programó la corrida del análisis con tres etapas de temperatura, la primera fue para la estabilización del equipo con una isoterma de 25 °C por 30 minutos, la segunda consistió en el calentamiento de la muestra desde 25 °C hasta 550 °C con una velocidad de 10 °C/min y la tercera fue para el enfriamiento del equipo desde 550 °C hasta 30 °C a una velocidad de 20 °C/min, toda la corrida del análisis se realizó en una atmósfera de argón, utilizando un flujo constante en 60 mL/min. Se usó un crisol de aluminio vacío como referencia y los análisis de las muestras se realizaron por triplicado. Finalizada la corrida con los datos obtenidos se analizaron utilizando el software Calisto v2.0992 (SETARAM, Francia). Se reportó datos de la variación de la masa ( $\Delta m$ ), temperatura inicial ( $T_i$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y temperatura máxima de degradación ( $T_{max}$ ); obtenidas de la curva de TGA y DTG.

#### **3.5.4.2. Análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

La temperatura y la entalpía de gelatinización de los almidones se determinaron siguiendo la metodología propuesta por Utrilla-Coello et al. (2013), con ligeras modificaciones. Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido previamente calibrado con un

patrón de indio y plomo al 99,99 % de pureza. Se pesó 10 mg de cada muestra de almidón en un crisol de aluminio de 75  $\mu\text{L}$  de capacidad y se les agregó 30  $\mu\text{L}$  de agua destilada en proporción 1:3 p/v (almidón /agua). Los crisoles se cerraron herméticamente y se dejaron reposar durante 60 minutos a temperatura ambiente y fueron introducidos en el equipo. Se programó el equipo con una rampa de calentamiento de 25 °C hasta 110 °C con una velocidad de 5 °C/min y una rampa de enfriamiento desde 110°C a 30 °C a una velocidad de 10 °C/min, en una atmosfera de argón a 30 mL/min. De referencia se usó un crisol de aluminio vacío y sellado. Los datos de temperatura inicial ( $T_0$ ), temperatura pico ( $T_p$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y entalpía de gelatinización ( $\Delta H_{\text{Gel}}$ ), fueron reportados de los termogramas resultantes.

**Análisis estadístico:** Los resultados del análisis DSC; temperatura inicial ( $T_0$ ), temperatura pico ( $T_p$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y la entalpía de gelatinización ( $\Delta H_{\text{Gel}}$ ), fueron analizados estadísticamente utilizando la “prueba t de student” para muestras pareadas, con un nivel de significancia ( $P < 0,05$ ), empleándose el software de análisis estadístico INFOSTAT 2020 versión libre.

### **3.5.5. Caracterización de amilosa, amilopectina, color y propiedades funcionales tecnológicas del almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo**

#### **3.5.5.1. Análisis del contenido de amilosa y amilopectina de los almidones**

El contenido de amilosa y amilopectina del almidón de cáscara de plátano Bellaco y del almidón de cáscara de plátano Guayabo se determinó siguiendo el método descrito por Sonkar et al. (2023), para el contenido de amilosa se pesaron 0,1 g de cada muestra de almidón en tubos centrífuga de 50 mL y se añadió 1 mL de etanol de 95 mL/dL y 9 mL de NaOH 1N. Las soluciones se calentaron en un baño de agua hirviendo durante 30 minutos, posteriormente se enfriaron y se diluyeron en matraces hasta un volumen de 100 mL con agua destilada. Se pipetearon 5 mL de solución a un matraz de 100 mL y se mezclaron con 1 mL de ácido acético 1N y 2 mL de solución de yodo (2 g/dL de KI + 0,2 g/dL de  $\text{I}_2$ ), se aforó a 100 mL con agua destilada, se mezcló y se dejó reposar durante 20 minutos, luego se midió la absorbancia de cada solución a una longitud de onda a 620 nm con un espectrofotómetro UV/VIS. Para la preparación estándar se utilizó amilosa de almidón de papa. El contenido de amilopectina se obtuvo de la resta del contenido total de almidón con el contenido de amilosa.

### 3.5.5.2. Análisis del color de los almidones

Los **parámetros de color** de los almidones de cáscara de plátano se determinaron con un espectrofotómetro modelo CM-5, siguiendo la metodología propuesta por Barraza-Jáuregui y Siche (2021). El equipo fue calibrado, utilizando el iluminante D65 y un observador estándar con ángulo de visión de 10° para espectroscopía de reflectancia. Las muestras de almidón se colocaron en un portamuestras cubriendo totalmente su superficie, luego se realizó tres lecturas por cada muestra y finalmente se registró los parámetros de color que se mostró en la pantalla de salida del equipo. La evaluación de color de los almidones se midió en el espacio de color CIELAB y se determinó los parámetros de color  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ . Donde  $L^*$  es el parámetro que mide la luminosidad y sus valores van de cero a cien (0 = negro, 100 = blanco),  $a^*$  es la coordenada de color rojo/verde (valores de  $a^*$  (+) representa el color rojo y  $a^*$  (-) representa el color verde) y  $b^*$  es la coordenada de color amarillo/azul (valores de  $b^*$  (+) representa el color amarillo y  $b^*$  (-) representa el color azul).

El **índice de blancura (W)** de los almidones de cáscara de plátano se calculó a partir de los parámetros obtenidos de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) utilizando la Ecuación (2) propuesta por Guo et al. (2019):

$$W(\%) = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2)$$

### 3.5.5.3. Análisis de las propiedades funcionales tecnológicas de los almidones

**Capacidad de retención de agua:** Se determinó siguiendo la metodología propuesta por Kuyaneet et al. (2023). Se pesó 1,5 g de muestra de almidón seco y se añadió 15 mL de agua destilada en tubos centrifugas, los tubos se agitaron en un vórtex durante 1 hora y se centrifugaron a 4000 rpm por 20 minutos para eliminar el sobrenadante, luego se pesó el almidón húmedo retenido en los tubos y se calculó la capacidad de retención de agua (CRA) en porcentaje utilizando la Ecuación (3).

$$CRA (\%) = \frac{\text{Almidon húmedo (g)}}{\text{Muestra seca (g)}} \times 100 \quad (3)$$

**Solubilidad y poder de hinchamiento:** Se calcularon según la metodología de Nasrin et al. (2015), con ligeras modificaciones. En un vaso precipitado se dispersó 1 g de muestra de almidón con 50 mL de agua destilada, luego se homogenizo a 3000 rpm por 10 minutos, después la mezcla se llenó en tubos centrifuga de 10 mL y se llevaron a una centrifuga a 4000 rpm

durante 20 minutos, se separó el sobrenadante sobre una placa petri y se secó a 105 °C durante aproximadamente 5 horas y se pesó para calcular la solubilidad. Alternativamente, se tomó el peso del almidón húmedo sedimentado en los tubos para determinar el poder de hinchamiento. La solubilidad (S) y el poder de hinchamiento (PH) se calcularon utilizando la Ecuación (4) y Ecuación (5).

$$S (\%) = \frac{\text{Sobrenadante seco (g)}}{\text{Masa dispersa de almidon (g)}} \times 100 \quad (4)$$

$$PH (\%) = \frac{\text{Muestra humeda (g)}}{\text{Masa dispersa de muestra (g) - Masa de solubles}} \times 100 \quad (5)$$

**Sinéresis o estabilidad al congelamiento:** Se determinó según el método descrito por Marta et al. (2019), se preparó una suspensión de almidón y agua destilada al 5% (p/v), luego se gelatinizó a 90 °C durante 30 minutos en un equipo de baño maría con agitación constante, el gel obtenido se enfrió a  $26 \pm 2$  °C, después se tomaron 10 g de gel en tubos centrífuga de 15 mL y se almacenaron a 4 °C durante 24 horas y fueron congelados a -20 °C/48 horas, después se realizó la descongelación a 25 °C/3 horas y se centrifugaron los tubos a 4000 rpm durante 25 minutos, se registró el peso del agua separada y se calculó el porcentaje de sinéresis (Si) mediante la Ecuación (6).

$$Si (\%) = \frac{\text{Masa de agua separada (g)}}{\text{Masa del gel (g)}} \times 100 \quad (6)$$

**Análisis estadístico:** Los resultados de amilosa, amilopectina, parámetros de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), índice de blancura (W) y las propiedades funcionales tecnológicas: capacidad de retención de agua (CRA), solubilidad (S), poder de hinchamiento (PH) y sinéresis (Si), fueron analizados estadísticamente utilizando la “prueba t de student” para muestras pareadas, con un nivel de significancia ( $P < 0,05$ ), empleándose el software de análisis estadístico INFOSTAT 2020 versión libre.

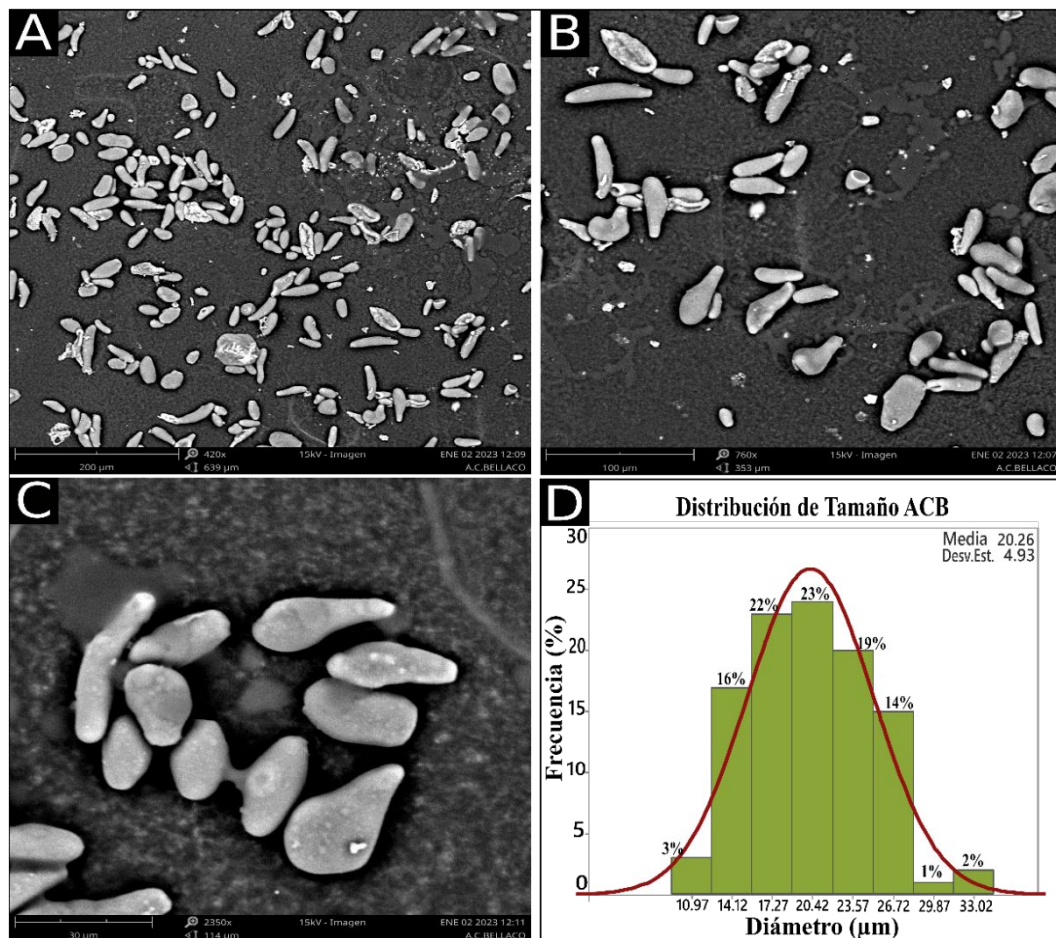
## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización morfológica de los gránulos de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo

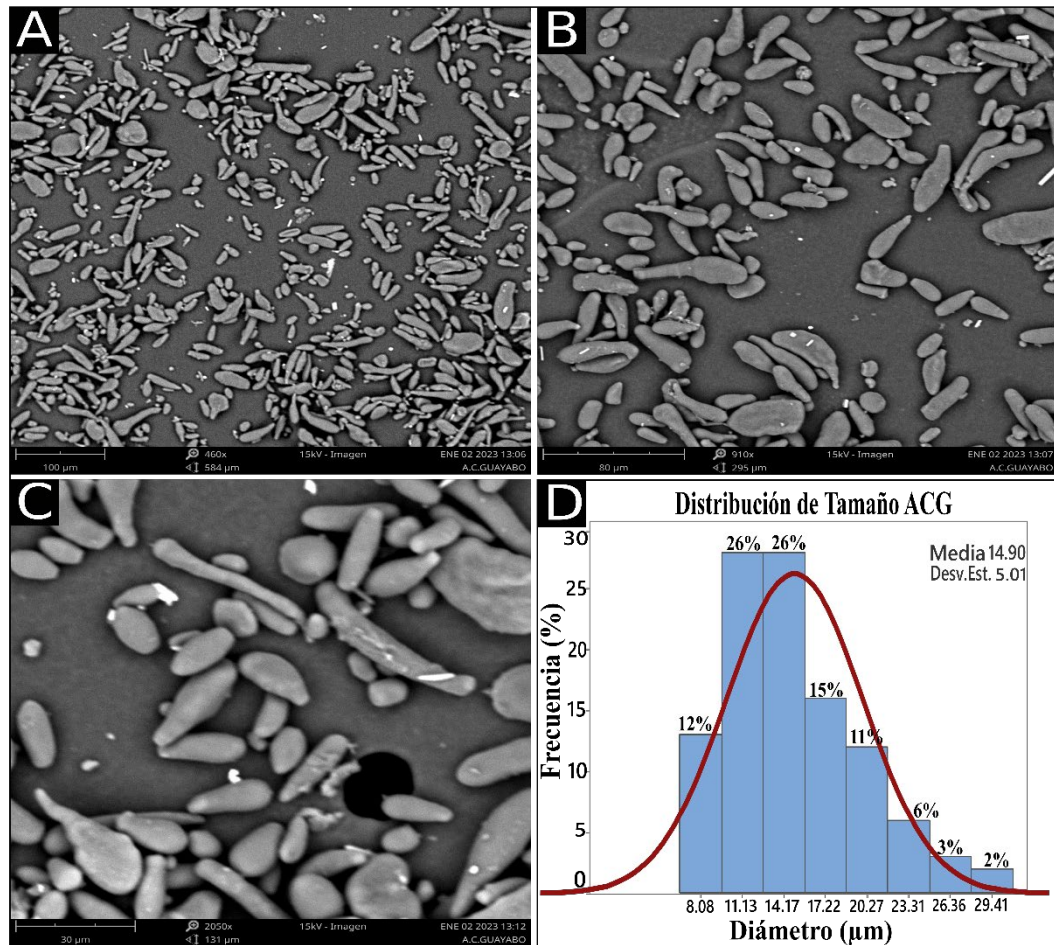
La Microscopía Electrónica de Barrido o SEM (siglas en inglés, Scanning Electron Microscopy) emplea un haz de electrones para explorar las muestras y proporciona imágenes altamente ampliadas en comparación con las que se obtienen a través del microscopio óptico convencional. Esta avanzada técnica de microscopía permite caracterizar morfológicamente el gránulo de los almidones (apariencia, forma, tamaño y su distribución) (Govindaraju et al., 2021).

La caracterización morfológica del almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB) y almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG), permitieron visualizar los gránulos que conforman las muestras por medio de micrografías. En la Figura 8 y Figura 9, se muestra las micrografías SEM de los almidones estudiados, se observa la forma y superficie de los gránulos de almidón. Las micrografías de menor aumento (420x) de los gránulos de ACB se encontraron distribuidos de forma dispersa (Figura 8A), mientras que los gránulos de ACG a 460x aparecieron más aglomerados (Figura 9A). Respecto a la **forma** de los gránulos, el ACB presentó formas elipsoidales, pero algunos gránulos mostraron formas alargadas con externos redondos en las micrografías a 760x (Figura 8B), variando de los gránulos de ACG los cuales fueron de formas ovoides y alargadas, algunos gránulos presentaron formas ovoides de mayor longitud con externos más estrechos y largos pareciéndose a bastones alargados tal como se muestra en las micrografías a 910x (Figura 9B). Con respecto a los resultados, los gránulos de ACB mostraron semejanzas, como las formas elipsoides y alargadas, en comparación con investigaciones previas en almidón de *Musa acuminata* AAA y *Musa sapientum* L. ABB hechas por Thanyapanich et al. (2021), así como en almidón de *Musa ssp.* por Ramírez-Hernández et al. (2020), mientras que la forma en los gránulos de ACG fue ovoides alargadas, similar a los encontrados en gránulos del almidón de plátano verde *Cavendish* por Dhull et al. (2020). Las diferencias en las formas de los gránulos pueden ser explicada por Paramasivam et al. (2021) quienes relacionan las características morfológicas en función de la fuente botánica de la cual se obtiene el almidón, lo que afecta la forma del gránulo, Leonel et al. (2021) en su investigación sobre los almidones de dos variedades de plátanos verdes (*Musa spp.*), indicaron que las diferencias de la forma de los gránulos son debido a los diferentes grupos genómicos de los cultivares, a la bioquímica de los amiloplastos y a la fisiología de la planta.

Respecto a la **superficie**, el gránulo de ACB en la micrografía de mayor aumento (2350X) presentó una textura lisa, con algunas rupturas y protuberancias (Figura 8C), mientras que el gránulo de ACG tuvo una superficie de textura lisa sin rupturas y con ligeras protuberancias, tal como se aprecia en la micrografía a 2050x (Figura 9C). Los resultados coinciden con los estudios realizado por Govindaraju et al. (2021) quienes afirman que los gránulos de almidón nativo de plátano tienen superficies externas lisas, a veces mostrando una ligera depresión ecuatorial en el centro del gránulo. Surendra et al. (2018) indica que la textura lisa en la superficie, es un indicativo de que la extracción del almidón se llevó de manera óptima y no infligió daños significativos en la estructura del gránulo como rupturas y grietas. Respecto a las pequeñas protuberancias en las superficies de algunos gránulos, Yang et al. (2022) mencionaron que en la superficie de los gránulos de almidón de cinco variedades de plátanos verdes (*Musa paradisiaca*) se observaron varias protuberancias pequeñas, las cuales pueden ser debido a la presencia de fibra y pectina que quedaron durante la obtención del almidón.



**Figura 8.** Micrografías SEM de los gránulos de almidón de cáscara de plátano Bellaco: 420x (A); 760x (B); 2350x (C); Histograma de distribución de tamaño (D).



**Figura 9.** Micrografías SEM de los gránulos de almidón de cáscara de plátano Guayabo: 460x (A); 910x (B); 2050x (C); Histograma de distribución de tamaño (D).

El **tamaño** obtenido de la medición de diámetro equivalente de los gránulos de almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB) y almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG) se presentan en la Tabla 2, para la muestra de ACB el tamaño varió en un amplio rango entre 9,40 y 34,60  $\mu\text{m}$ , con un promedio de  $20,26 \pm 0,48 \mu\text{m}$ , para el ACG el tamaño de los gránulos estuvo dentro del intervalo de 6,55 a 30,93  $\mu\text{m}$  y un promedio de  $14,90 \pm 0,56 \mu\text{m}$ , lo cual es menor con respecto al promedio de los gránulos de ACB. Los valores obtenidos del tamaño promedio fueron significativamente diferentes (Anexo-I). Con respecto a los resultados relacionados con el tamaño de los gránulos, al comparar los valores obtenidos con otras fuentes de almidón, se encuentran en los rangos mencionados por Dhull et al. (2020), quienes en su revisión mencionan que los gránulos de almidón de *Musa spp.* varían en tamaño desde 6 hasta 60  $\mu\text{m}$ . Esto concuerda con los hallazgos de Huang et al. (2022) quienes señalaron que el tamaño de los gránulos de almidón en general oscila entre 1 y 100  $\mu\text{m}$  de diámetro. En cuanto a las diferencias de tamaños entre el ACB y ACG, es explicado por Martínez-Mora (2015) en

su estudio de almidón obtenido de *Musa sapientum* de cuatro variedades, señala que las diferencias del tamaño de los gránulos son asignadas a su origen biológico, debido a que los almidones de diferentes orígenes botánicos cambian dependiendo del genotipo y las técnicas de cultivo, asimismo indican que el tamaño influye en las propiedades fisicoquímicas y de digestibilidad de los almidones. En otro estudio Santoyo-Aleman et al. (2019) reportaron que en almidón de *Musa paradisiaca* (variedad Guayabo), el tamaño promedio de los gránulos fue  $33,4 \pm 0,18 \mu\text{m}$ , lo cual es mayor a los resultados obtenidos en el presente estudio. Estas diferencias en el tamaño promedio de los gránulos pueden ser atribuidas a la variedad de los gránulos de almidón de plátano (Thanyapanich et al., 2021), e incluso puede deberse por las semanas de cosecha (Chávez-Salazar et al., 2017), lo cual es reforzado por De Barros Mesquita et al. (2016) quienes explican que los gránulos más pequeños probablemente son los que están en proceso de formación, debido a que las frutas se cosechan en estado verde antes de la desintegración del almidón, que ocurre durante la maduración de la fruta.

**Tabla 2.** Caracterización morfológica de los gránulos de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo por microscopía electrónica de barrido

Muestras	Forma	Superficie	Distribución de tamaño de los gránulos	
			Rango ( $\mu\text{m}$ )	Promedio ( $\mu\text{m}$ )
ACB	Elipsoide, alargada y con extremos redondeados	Textura lisa	9,40 - 34,60	$20,26 \pm 0,48^a$
		con algunas rupturas y protuberancias		
ACG	Ovoide, alargada y con extremos estrechos	Textura lisa	6,55 - 30,93	$14,90 \pm 0,56^b$
		con ligeras protuberancias		

Los valores representan el Promedio  $\pm$  SEM, datos procedentes del experimento (n=105). Valores con superíndices distintos en la misma columna son significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

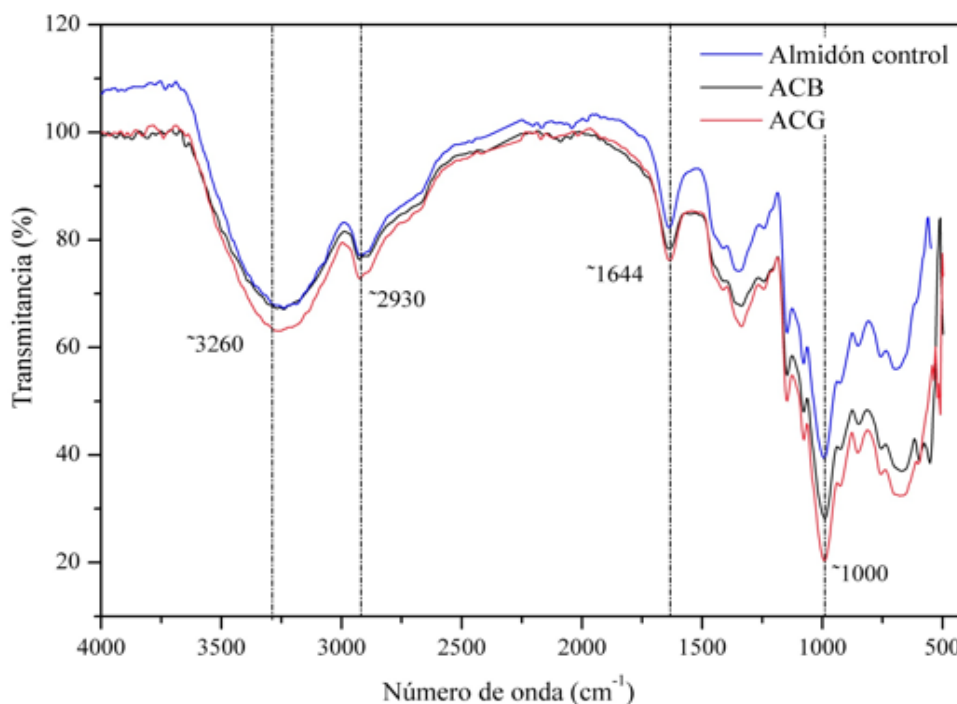
La **distribución de tamaño** de los gránulos se ve reflejada en los histogramas, el ACB (Figura 8D) presentaron una mayor acumulación de frecuencia los gránulos entre 17,27 y 23,53  $\mu\text{m}$  con 64%, mientras que en el histograma de ACG (Figura 9D) se observó una mayor acumulación de frecuencia (52%) entre 11,13 – 14,17  $\mu\text{m}$ . La curva de distribución de tamaño de ACB mostró un pico unimodal central similar a lo reportado por Zhang et al. (2023) en almidón de guisantes amarillos, destacando mayor cantidad de gránulos con tamaño similares

al valor promedio central evidenciando una mayor homogeneidad, mientras que en comparación con la curva de ACG, se mostró un pico unimodal también pero que se desplazó hacia la izquierda, lo que indica una reducción significativa en el tamaño de los gránulos, y una mayor heterogeneidad, evidenciado mayor variación en el tamaño.

#### **4.2. Identificación de los grupos funcionales presentes en la estructura de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo**

La espectroscopia de infrarrojo por transformada de fourier (FTIR) es una de las técnicas más empleadas en investigaciones de alimentos, por ser rápida, sencilla y confiable (Valand et al., 2019). Esta técnica permite identificar y caracterizar los grupos funcionales específicos presentes en la estructura molecular de los ingredientes alimentarios (Orsini y Aparicio, 2021). Mide la absorbancia de la radiación infrarroja en enlaces dipolares de grupos funcionales moleculares, excitando electrones y generando movimientos de flexión o estiramiento en dichos enlaces (Tiernan et al., 2020).

Los resultados obtenidos del análisis de espectroscopía (FTIR-ATR) del almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB), almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG) y almidón control (Figura 10), mostraron los tres almidones las mismas bandas de absorción (picos) alrededor de los números de onda  $3260\text{ cm}^{-1}$ ,  $2930\text{ cm}^{-1}$ ,  $1644\text{ cm}^{-1}$  y  $1000\text{ cm}^{-1}$ , asimismo también se puede apreciar que las muestras ACB y ACG presentan menor transmitancia (%) en todo el espectro comparado con el almidón control. Este comportamiento es explicado por Rojas et al. (2015) en su evaluación de almidón extraído de cáscara de plátano variedad hartón comparado con un almidón de grado analítico marca Merck, encontró variación en su transmitancia y lo atribuye a la cantidad de regiones ordenadas (cristalinas) y amorfas que poseen cada muestra debido a su origen biológico diferente, coincidiendo con los resultados reportados de cáscaras verdes de plátano de la variedad Bellaco y Guayabo y el almidón control que es de papa con una pureza de 99 %. Además, según García-Cruz et al. (2020) dependiendo del origen del almidón adquieren propiedades específicas, que se reflejan en los estudios realizados, es por esta razón, que las muestras presentan similitudes en el espectro FTIR-ATR en lo que respecta a los picos identificables (bandas de absorción), pero varían en cuanto a su intensidad (transmitancia).



**Figura 10.** Espectros FTIR-ATR de almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB), almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG) y del almidón control.

Los espectros FTIR-ATR del almidón de la cáscara de plátano Bellaco y almidón de cáscara de plátano Guayabo presentaron bandas de absorción vinculadas al estiramiento, flexión y deformación, las cuales corresponden a los principales grupos funcionales representativos de los almidones. En la Tabla 3 se indican la asignación y modo de vibración de las bandas de absorción encontradas en los espectros de los almidones. La vibración de estiramiento del grupo hidroxilo (-OH) en el espectro FTIR-ATR para el ACB se halló en el número de onda  $3263\text{ cm}^{-1}$  y para el espectro de ACG apareció en  $3267\text{ cm}^{-1}$ . Los resultados encontrados son similares a lo reportado por García-Ramón et al. (2021) quienes asignan una banda ancha ( $3000\text{ a }3700\text{ cm}^{-1}$ ) a los grupos -OH (grupo hidroxilo) unidos mediante enlaces de hidrógeno en almidón de *Musa paradisiaca* L; así mismo, Yang et al. (2022) reportaron una señal similar alrededor de  $3237\text{ cm}^{-1}$  al estudiar cinco variedades diferentes de almidón de plátano verde (Mzuzu, Mshale, Bukoba y Moshi) identificándolas también como vibración de enlace de puentes hidrogeno generada por el grupo funcional -OH. Según Ramírez-Hernández et al. (2020) la aparición de estas bandas identificadas en los espectros de los almidones corresponde a las vibraciones de estiramiento de los grupos hidroxilos (-OH) de la unidad glucosídica del almidón que conforman las cadenas de amilosa y amilopectina que suelen encontrarse alrededor de  $3260\text{ cm}^{-1}$  en el rango de  $3000\text{ a }3750\text{ cm}^{-1}$ .

**Tabla 3.** Asignación y modo de vibración de las bandas encontradas en los espectros FTIR-ATR de los almidones

Asignación de las bandas de absorción		ACB	ACG
Grupo funcional	Modo de vibración	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )	
-OH	Estiramiento	3263	3267
C-H	Estiramiento	2930	2927
H <sub>2</sub> O	Deformación	1649	1649
C-O; C-O-H	Estiramiento y flexión	1077; 989	1077; 990

Grupo hidroxilo(-OH); enlace (C-H); Agua (H<sub>2</sub>O); enlace del anillo anhidroglucosa (C-O y C-O-H).

La vibración de estiramiento de enlace (C-H) en el espectro FTIR-ATR de ACB se encontró en el número de onda de 2930 cm<sup>-1</sup> y para el espectro de ACG se observó en el número de onda en 2927 cm<sup>-1</sup>. Los resultados encontrados concuerdan con García-Ramón et al. (2021) reportaron que en los espectros FTIR de almidón de *Musa paradisiaca* se observaron señales de bandas alrededor del número de onda a 2927 cm<sup>-1</sup> correspondiente a las vibraciones de estiramiento de enlaces C-H. Así mismo, Hernández-Gil et al. (2022) reportaron señales alrededor del número de onda 2400 cm<sup>-1</sup> en almidón de plátano (*Musa paradisiaca L.*), ambos asociaron dichas bandas de absorción o picos que corresponden a las vibraciones de estiramiento de enlaces C-H del grupo metileno.

La vibración de deformación de agua (H<sub>2</sub>O) en los espectros FTIR-ATR para ACB y ACG, mostraron una misma señal en el número de onda 1649 cm<sup>-1</sup>. Estos resultados encontrados coinciden dentro del intervalo señalado por Tibolla et al. (2019) en su estudio de almidón de obtenido de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca*), reportaron bandas de absorción entre 1642 -1652 cm<sup>-1</sup> y lo asocian al agua adsorbida en la región amorfa del almidón. Así mismo, Ramírez-Hernández et al. (2020) en su investigación sobre el almidón de *Musa ssp.* encontraron un numero de onda a 1647 cm<sup>-1</sup> y asignaron esta señal a la vibración de deformación de H<sub>2</sub>O. Lo anterior es reforzado por Orsini y Aparicio (2021) quienes, al estudiar almidón de yuca, señalaron que las bandas de absorción entre 1641-1645 cm<sup>-1</sup> reflejan un pico intenso del estiramiento de los enlaces H-O-H característicos de los puentes de hidrogeno asociada al agua presente.

La vibración correspondiente a los enlaces C-O y C-O-H en los espectros FTIR-ATR de almidón de cáscara de plátano Bellaco y almidón de cáscara de plátano Guayabo presentaron dos picos diferentes; en el primer pico ambas muestras (ACB y ACG) coincidieron en el número de onda de 1077 cm<sup>-1</sup> y para el segundo pico, el ACB presento una señal a 989

$\text{cm}^{-1}$  y el ACG fue a  $990 \text{ cm}^{-1}$ . Estos resultados se asemejan a lo señalado por Hernandez-Gil et al. (2022), en su estudio de almidón nativo de plátano (*M. paradisiaca*) asociaron las longitudes de onda entre  $760$  y  $1149 \text{ cm}^{-1}$  a vibraciones de estiramiento de los enlaces C-O y C-O-H del anillo de anhidroglucosa, enlaces que comúnmente se encuentra en la estructura de los almidones. Sumado a esto Ramírez-Hernández et al. (2020) reportaron en su estudio de almidón de *Musa ssp.* una señal en el rango de  $900$  a  $1200 \text{ cm}^{-1}$  debido a vibraciones de los enlaces C-O. Asimismo, Martínez et al. (2019) identificaron en almidón de *S. tuberosum* variedad Única, una banda ancha en el rango de  $993$  y  $995 \text{ cm}^{-1}$  asignada a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C-O-H y Yang et al. (2022) reportaron en almidón de *Musa spp.* una banda de absorción entre  $1000$  y  $1300 \text{ cm}^{-1}$  causada por la vibración de flexión de los enlaces C-O-H. Los picos de absorción por debajo de  $1000 \text{ cm}^{-1}$  se deben posiblemente a vibraciones complejas de los restos de glucosa del almidón (Sessini et al., 2017).

### 4.3. Determinación del comportamiento térmico de almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo

#### 4.3.1. Estabilidad térmica de los almidones por termogravimetría (TGA)

El análisis termogravimétrico es una técnica valiosa para investigar la estabilidad térmica y la descomposición térmica de los almidones. Al suministrar datos relativos a la composición, pureza y la cinética que regula su descomposición, lo que es fundamental para comprender su comportamiento térmico en diferentes aplicaciones y procesos industriales Pielichowska y Nowicka (2019). La Tabla 4 presentan los resultados obtenidos del análisis termogravimétrico del almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB) y almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG). Estos resultados revelan que el proceso de descomposición térmica se desarrolló en tres zonas distintas donde se reportó las pérdidas de masa, también muestra una zona de estabilidad térmica.

La **primera zona**, corresponde a la pérdida de masa debido a la humedad presente en las muestras, para el ACB fue  $9,98 \%$  que se registró entre  $27,53 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $136,92 \text{ }^\circ\text{C}$  y para ACG la pérdida fue de  $10,59 \%$  que ocurrió entre  $27,96 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $144,10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Los resultados de pérdida de masa para esta zona se enmarcan en las investigaciones previas realizadas por Méndez et al. (2022) quienes reportaron valores de  $7,1\%$  para almidón de *M. paradisiaca*, mientras que Baena-Jurado et al. (2021) indicaron valores levemente mayores de  $12\%$  en almidones de plátanos verdes extraídos de cuatro variedades (Gros Michel, Cachaco, Manini y FHIA 21). Castaño-Carvajal et al. (2019) en su estudio de almidón de plátano Dominic Hartón (*Musa* AAB Simmonds) y yuca (*Manihot esculenta*), indicaron que las muestras que

presentaron porcentajes mayores de pérdida de masa, se deben al mayor contenido de humedad. Además, Yang et al. (2022) obtuvieron variaciones en la humedad de los almidones aislados de cinco variedades de banano (*Musa* spp.) atribuyendo este comportamiento a la variedad vegetal y estado de madurez del banano. En cuanto al rango de temperatura los datos coinciden con Chandrasekar et al. (2023), en su investigación de almidón de cáscaras de plátanos recolectadas de industrias de la India, reportaron una pérdida de masa inicial por debajo de los 100 °C y es atribuida a la deshidratación del almidón. Así mismo, Baena-Jurado et al. (2021) en su investigación sobre los almidones extraído de cuatro variedades de Musáceas, señalaron que la pérdida de masa en esta zona finaliza alrededor de 130-140 °C. De acuerdo con los resultados del análisis termogravimétrico, se observó una similitud en los valores de temperatura máxima de degradación ( $T_{max}$ ) para el ACB (83,09 °C) y ACG (85 °C). Los hallazgos son similares con el estudio de Méndez et al. (2022) quienes informaron una temperatura máxima cercana a 83 °C en su estudio sobre el almidón extraído de plátano (*M. paradisiaca*), lo que refuerza la concordancia con los resultados obtenidos.

**Tabla 4.** Resultados de TGA y DTG de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo

Muestra	Zonas	Rango de Temperatura		$\Delta T$ (°C)	$T_{max}$ (°C)	$\Delta m$ (%)
		$T_i$ (°C)	$T_f$ (°C)			
ACB	Zona 1	27,53	136,92	109,39	83,09	9,98
	Estabilidad	136,92	279,20	142,28	-	-
	Zona 2	279,20	353,48	74,29	314,22	62,44
	Zona 3	353,48	554,71	201,23	-	11,38
	Residuo	-	-	-	-	16,21
ACG	Zona 1	27,96	144,10	116,15	85,00	10,59
	Estabilidad	144,10	262,31	118,21	-	-
	Zona 2	262,31	354,76	92,45	312,60	64,03
	Zona 3	354,76	554,91	200,15	-	5,64
	Residuo	-	-	-	-	19,75

$T_i$ : Temperatura inicial;  $T_f$ : Temperatura final;  $\Delta T$ : Variación de la temperatura;  $T_{max}$ : Temperatura máxima de descomposición;  $\Delta m$ : Variación de la masa.

La **zona de estabilidad** térmica, es el intervalo de temperaturas en el que el almidón retiene su integridad y no se descompone ni se transforma de manera significativa, para la muestra de ACB se encontró entre 136,92 - 279,20 °C y para el ACG ocurrió entre

144,10 - 262,31 °C. Según los resultados el ACB mostró una estabilidad térmica mayor con un rango de  $\Delta T$  de 142,28 °C, para el ACG el rango de  $\Delta T$  fue 118,2 °C. Esta diferencia en los rangos de temperatura se puede atribuir a que ACB presenta mayor peso molecular en su estructura de amilosa-amilopectina lo que aumenta su estabilidad térmica, tal efecto fue reportado por Li et al. (2023) en su estudio almidón de maíz nativo y oxidado, reportaron que la reducción de la estabilidad térmica es directamente proporcional con la estructura del peso molecular y que modificaciones a la cadena polimérica (oxidación) afectarán a este rango de estabilidad. Además, Lemos et al. (2018) señalan que la cristalinidad tiene mayor relevancia en la estabilidad térmica, al comparar almidón nativo y amorfo de plátano (*Musa spp.*) verificaron que los almidones amorfos se descomponen más rápido a temperaturas más bajas, debido a que los almidones nativos presentaron mayores enlaces cristalinos.

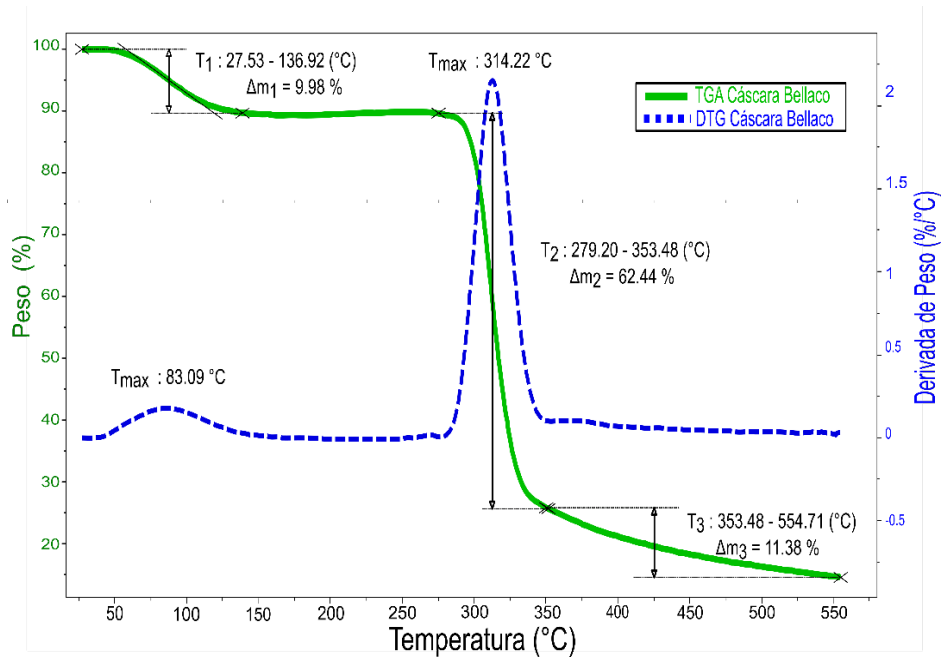
En la **segunda zona**, se registró la mayor pérdida de masa para las muestras, para ACB la pérdida de masa fue 62,44 % y se registró en un rango de temperatura de descomposición que empieza en 279,20 °C y termina en 353,48 °C, para ACG el porcentaje de pérdida de masa fue de 64,03 % y se registró en un rango de temperatura de descomposición que empieza en 262,31 °C y termina en 354,76 °C. Los rangos de temperatura de ambos almidones extraídos coinciden con lo reportado por Chandrasekar et al. (2023) indicaron rangos entre 229,65 °C y 362,96 °C para almidón derivados de cáscaras de plátano, señalando que esta descomposición térmica puede ser causada por la ruptura de los anillos de glucosa en la composición polimérica (amilosa-amilopectina) del almidón. Asimismo, Méndez et al. (2022) reportaron que la pérdida masa en esta zona comienza alrededor de los 270 °C, que resulta de la desintegración de las pequeñas unidades del almidón, es decir, los oligómeros. Las diferencias en los porcentajes de descomposición se atribuyen a la composición de amilosa-amilopectina en las muestras, el ACG presentó mayor  $\Delta T$  (92,45 °C) comparada al  $\Delta T$  de ACB (74,29 °C), al tener mayor rango de temperatura sugiere que se necesitó mayor energía para descomponer, este comportamiento se debe a la mayor presencia de amilopectina en la composición molecular de ACG, como lo evidenció Lemos et al. (2018) en su investigación sobre la descomposición térmica de almidones de diferentes composiciones de amilosa-amilopectina, destacando la mayor estabilidad térmica de la amilopectina debido a la gran cantidad de uniones  $\alpha$ -1,6, que demanda una mayor cantidad de energía para el proceso de descomposición. Asimismo, en esta zona en la Figura 11 y Figura 12 se aprecian las temperaturas máximas de descomposición ( $T_{max}$ ) obtenidos de las curvas derivadas de peso (DTG). Se observa que el ACB presentó una  $T_{max}$  a 314,22 °C y para el ACG fue a 312,60 °C. Los resultados obtenidos son similares a lo reportado por Khawas y Deka (2017) en su estudio

de almidón aislado de plátano culinario (*Musa spp.*) registraron una temperatura máxima de 311,11 °C, lo que sugiere que los almidones tienen el mismo perfil de descomposición y que la cristalinidad afectará a este valor  $T_{max}$ , como lo reporta Chandrasekar et al. (2023) con  $T_{max}$  a 295,69 °C en su estudio de almidón obtenido de la cáscara verde de plátano.

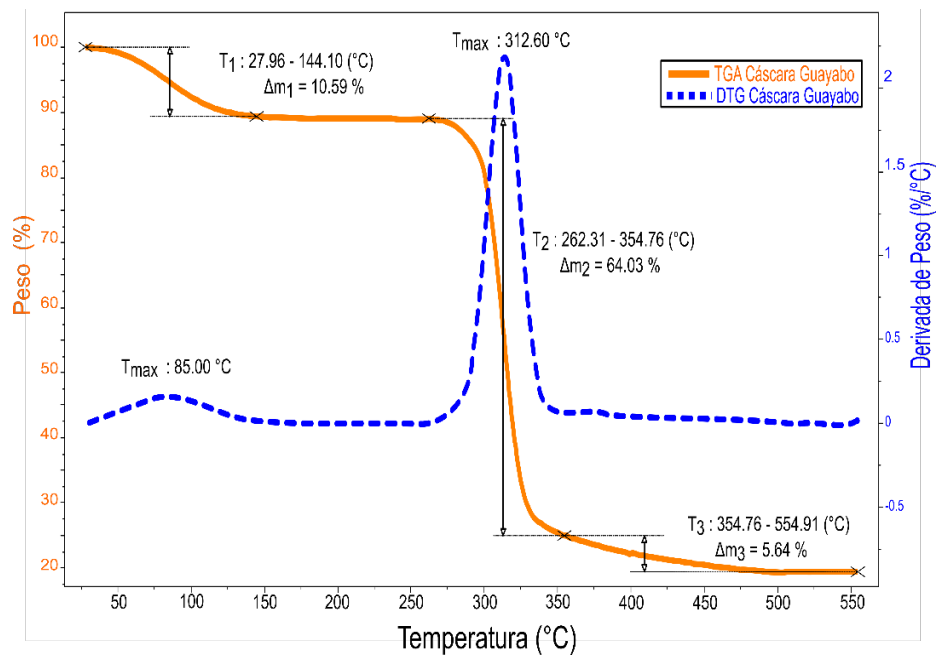
En la **tercera zona**, se registra la pérdida de masa debido a la descomposición de polisacáridos con alto peso molecular Castaño-Carvajal et al. (2019), para ACB la pérdida de masa fue de 11,38 % y se registró en un rango de temperatura de descomposición que empieza en 353,48 °C y termina en 554,71 °C y para ACG la pérdida de masa fue 5,64 % y se registró entre 354,76 °C y 554,91 °C. La diferencia de  $\Delta m$  (%) entre las muestras puede estar influenciado por las impurezas presentes en el almidón extraído, para ACB al tener más pérdida de masa (11,38%) en esta zona indicaría mayor presencia de polisacáridos como hemicelulosa, lignina y pectina comparada a ACG (5,64%), este comportamiento fue reportado por Khawas y Deka (2017) quienes en estudio de almidón aislado de plátano culinario (*Musa spp.*) atribuyen una mayor pérdida en esta zona debido al contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina presentes en la muestra de almidón. Esto explicaría los diferentes reportes de  $\Delta m$  (%) encontrado en almidones extraídos de frutos verdes de plátano, tal como lo cita Lucas-Aguirre et al. (2016), reportaron valores superiores para el almidón de plátano guayabo con una descomposición del 18,98 % en un rango de temperatura de 390 °C -560 °C, y Méndez et al. (2022) en almidón de *M. paradisiaca* indicaron valores de 13,9% en un rango de temperatura de 400 °C -780 °C.

Los residuos finales del proceso del análisis termogravimétrico de los almidones fue 16,21 % para ACB y 19,75 % en el ACG, estos valores obtenidos son mayores a lo reportado por Chandrasekar et al. (2023) en su estudio del almidón de cáscara de plátano presentaron un porcentaje de residuo 13,27 %, mientras que Castaño-Carvajal et al. (2019) señalaron un residuo de 8,48 % para el almidón de plátano *Dominico Hartón*, esta diferencia de residuos se puede atribuir al rango de temperatura programada en el análisis termogravimétrico, estos autores despolimerizaron al almidón por pirolisis hasta 800 °C, en la Figura 11 y Figura 12 al término de la zona 3, la curva TGA todavía presenta una pendiente negativa característica a la pérdida de masa lo indica un mayor residuo ya que aun continua la descomposición a temperaturas superiores de 550 °C sin obtener una pendiente nula, que indicaría la descomposición total de los polímeros. Además, el contenido de cenizas (minerales) presentes en los almidones puede generar variación en los residuos, con respecto a esto, Lucas-Aguirre et al. (2016) mencionan que el residuo de muestra que queda de las descomposiciones, se relaciona con el contenido de minerales presentes en los almidones.

Los resultados de análisis termogravimétrico indican que los almidones estudiados (ACB y ACG) son térmicamente estables a temperaturas inferiores a 279,20 °C y 262,31 °C respectivamente, siendo el ACB el que mostro mayor estabilidad a temperaturas mayores.



**Figura 11.** Curvas TGA y DTG de almidón extraído de la cáscara de plátano Bellaco.



**Figura 12.** Curvas TGA y DTG de almidón extraído de la cáscara de plátano Guayabo.

### 4.3.2. Gelatinización de los almidones por calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La gelatinización del almidón implica la pérdida de birrefringencia y se considera un proceso de fusión o colapso (ruptura) del orden molecular dentro del gránulo. Como resultado, los gránulos de almidón se vuelven menos rígidos y pueden hidratarse manifestando cambios irreversibles en las propiedades estructurales (Wang y Copeland, 2013). Los resultados del análisis DSC de los almidones muestran termogramas con picos endotérmicos que indica la absorción de energía en forma de calor cuando los gránulos de almidón absorben agua, lo que corresponde a un proceso de gelatinización. En la Figura 13 se observan los termogramas con información sobre la temperatura inicial ( $T_0$ ), temperatura pico ( $T_p$ ), temperatura final ( $T_f$ ) y la entalpía de gelatinización ( $\Delta H_{Gel}$ ). De igual manera en la Tabla 5, se detallan las temperaturas y entalpías del proceso de gelatinización de los almidones estudiados (ACB y ACG) junto con los resultados del análisis estadístico mediante la prueba t de Student.

La **temperatura inicial** ( $T_0$ ) indica cuando comienza el proceso de gelatinización, que es el proceso en el cual el almidón absorbe agua y se hincha. Según los resultados tanto el almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB) y almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG) presentaron temperaturas iniciales estadísticamente similares (Anexo-IIa), para el ACB ( $71,35 \pm 0,06$  °C) y para el ACG ( $70,77 \pm 0,17$  °C). Según los resultados las temperaturas iniciales son parecidas con lo señalado por Lemos et al. (2018) en su análisis de gelatinización de almidón de plátano (*Musa spp.*) señaló una  $T_0$  cercana a 70 °C, asimismo Roman et al. (2019) reportó una  $T_0$  de 71,74 °C en almidón nativo de plátano verde, mientras que valores inferiores fueron reportados por Yang et al. (2022) quienes obtuvieron una  $T_0$  entre 57,33 – 62,51 °C de cinco almidones extraídos de plátano (*Musa spp.*). Este comportamiento en los distintos valores de  $T_0$  son atribuidos a la longitud de la cadena de amilopectina, para los almidones estudiados (ACB y ACG) presentarían cadenas de amilopectina ramificadas y largas, formando así microcristales térmicamente estables elevando la  $T_0$ . Ai y Jane (2015), este comportamiento es reafirmado por Yang et al. (2022) quienes señalan su baja  $T_0$  a las cadenas cortas de amilopectina de los almidones de plátano (*Musa spp.*) estudiados.

La **temperatura pico** ( $T_p$ ) del gráfico DSC (Figura 13) registra el punto de la máxima absorción de calor, este parámetro es importante para caracterizar la gelatinización del almidón porque indica la temperatura a la que ocurre este proceso con mayor intensidad. Para el almidón de cáscara de Bellaco se obtuvo un  $T_p$  en  $76,31 \pm 0,28$  °C y para el

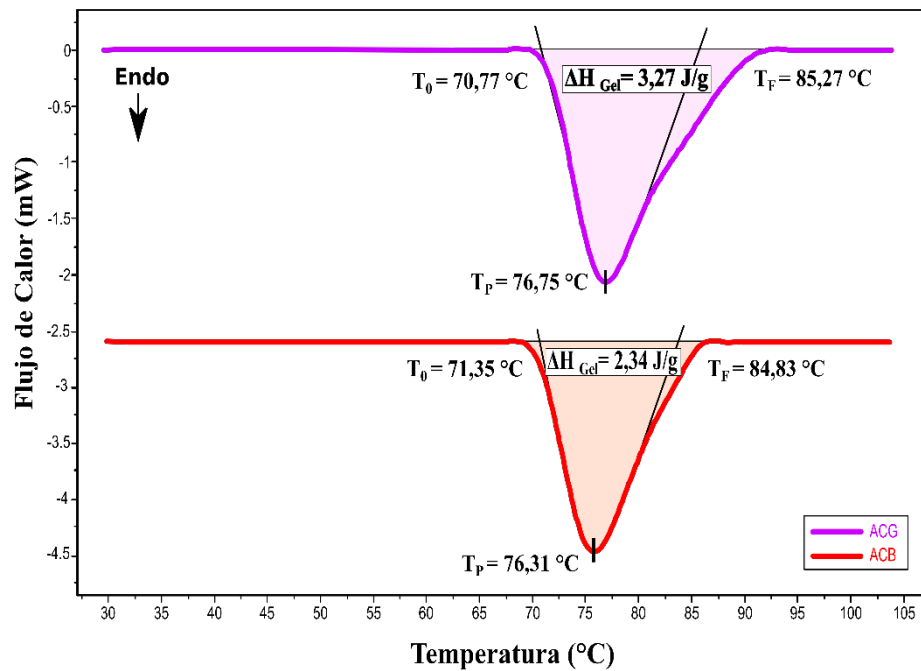
almidón de cáscara de Guayabo la  $T_p$  alcanzó  $76,75 \pm 0,33$  °C, ambas temperaturas no mostraron diferencia estadística (Anexo-IIb). Investigaciones previas indican  $T_p$  cercanos con las muestras ACB y ACG, Lucas-Aguirre et al. (2016) y Roman et al. (2019) reportaron  $T_p$  entre  $78,0 - 78,62$  °C para el almidón de plátano verde (*Musa spp*), mientras que Lemos et al. (2018) obtuvieron un  $T_p$  para el almidón de plátano (*Musa spp.*) en  $76,5$  °C, por otro lado valores menores a las muestras ACB y ACG mostró Chávez-Salazar et al. (2017) en almidón de plátanos de variedades Dominico Hartón ( $T_p$  :  $74,33$  °C), FHIA 20 ( $T_p$  :  $73,98$  °C) y Gros Michel ( $T_p$  :  $73,55$  °C). Estas diferencias en el  $T_p$  de gelatinización depende de las condiciones genéticas, climáticas y de la cosecha con lo indican Lucas-Aguirre et al. (2016) y Chávez-Salazar et al. (2017). Por otro lado, Ai y Jane (2015) clasifican al almidón de plátano verde como tipo C y que las ramificaciones de la amilopectina presentarían cadenas largas que aumentarían el valor  $T_p$ , este efecto es corroborado por Lemos et al. (2018) quienes señalaron la disminución de  $T_p$  en relación a la cristalinidad de la estructura amorfa del almidón.

La **temperatura final ( $T_f$ )** indica el término de la absorción de calor durante la gelatinización, para el almidón de cáscara de plátano Bellaco fue  $84,83 \pm 0,38$  °C y para el almidón de cáscara de plátano Guayabo  $85,27 \pm 0,35$  °C; estos valores presentaron diferencia estadística (Anexo-IIc), esto indicaría una mayor heterogeneidad en la distribución de tamaño de los gránulos de almidón de cáscara de plátano Guayabo y mayor presencia en el contenido de amilopectina (Chávez-Salazar et al., 2017). Roman et al. (2019) reportaron una  $T_f$  de  $87,69$  °C en almidón nativo de plátano verde y Lucas-Aguirre et al. (2016) reportaron una  $T_f$  entre  $70 - 95$  °C en almidón de cuatro variedades de plátano (*Mussa ssp*), concordado con los resultados obtenidos para ACB y ACG que implicaría temperaturas bajas de cocción.

**Tabla 5.** Resultados de las temperaturas y entalpía de gelatinización de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo obtenidos por DSC.

Muestra	$T_o$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_f$ (°C)	$\Delta H_{Gel}$ (J/g)	R (°C)
ACB	$71,35 \pm 0,06^a$	$76,31 \pm 0,28^a$	$84,83 \pm 0,38^b$	$2,34 \pm 0,10^b$	$13,49 \pm 0,40^a$
ACG	$70,77 \pm 0,17^a$	$76,75 \pm 0,33^a$	$85,27 \pm 0,35^a$	$3,27 \pm 0,04^a$	$14,50 \pm 0,23^a$

$T_o$ : Temperatura inicial de gelatinización;  $T_p$ : Temperatura pico de gelatinización;  $T_f$ : Temperatura final de gelatinización;  $\Delta H_{Gel}$ : Entalpía de gelatinización; R: Rango de temperatura ( $R = T_f - T_o$ ). Los valores representan el Promedio  $\pm$  SEM, datos procedentes del experimento (n=3). Valores con superíndices distintos en la misma columna son significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ).



**Figura 13.** Termograma DSC de la gelatinización de almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB) y almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG).

Respecto al **rango de temperatura** de gelatinización  $R(T_f - T_0)$ , los resultados no presentaron una diferencia estadística (Anexo-IIId). Para el ACB el rango fue  $13,49 \pm 0,40$  ligeramente inferior al ACG en  $14,50 \pm 0,23$ , estos valores encontrados fueron mayores a los estudios previos por Lemos et al. (2018) quienes reportaron diferencia entre la temperatura final y de inicio de las endotermas de gelatinización ( $T_f - T_0$ ) en  $9,8$  °C, asimismo Ai y Jane (2015) reportan rango de gelatinización en  $7,5$  °C y De Barros Mesquita et al. (2016) señalaron un R entre  $5,56 - 6,85$  °C en almidones de plátanos (*Mussa spp*) cultivados en Brasil. Estos valores inferiores a los obtenidos por ACB y ACG que son almidones extraídos de cáscaras presentarían gran heterogeneidad en su área cristalina, lo que significa diferentes tamaños y grados de cristalinidad, respecto a los resultados para ACG al tener mayor R en el grafico DSC (Figura 13) indicaría mayor presencia de gránulos de diferentes tamaños y amilopectina, como lo enmarcan Lemos et al. (2018) y De Barros Mesquita et al. (2016) en almidones de plátano (*Mussa spp*).

La **entalpía de gelatinización** ( $\Delta H_{Gel}$ ) de los almidones, se determina mediante el área debajo de la curva del pico y representa la energía requerida para realizar el proceso de gelatinización. Para el ACB la entalpía ( $\Delta H_{Gel}$ ) fue  $2,34 \pm 0,10$  J/g y para el ACG es  $3,27 \pm 0,04$  mostrando una diferencia estadística (Anexo-IIe), esta diferencia en las entalpías indicaría mayor presencia de cadenas largas de amilopectina para ACG y mayor cristalinidad

en la región amorfa del gránulo, investigaciones previas indicaron valores de 1,024 J/g en almidón de plátano guayabo (Lucas-Aguirre et al., 2016), siendo inferiores al resultado obtenido por ACG, además reportes previos de Lemos et al. (2018), De Barros Mesquita et al. (2016) y Yang et al. (2022) quienes analizaron la gelatinización en almidones extraídos de plátano verde (*Musa spp.*) señalan esta entalpía entre 8,1 a 14, 73 J/g, estos valores superiores contrastan con el valor de R al tener un almidón extraído de cáscara la pureza y separación de otros componentes dificultó la obtención de un almidón homogéneo y cristalino, en consecuencia al tener un mayor R la entalpía se redujo por la presencia de otros compuestos al gránulo, tal fenómeno es descrito por Yang et al. (2022) quienes señalan que la composición del gránulo, la distribución del tamaño y la pureza podrían interferir con la gelatinización del almidón. Algunas macromoléculas, como lípidos y proteínas, evitaron que el agua ingresara a la región cristalina de los gránulos de almidón debido a la pureza del almidón. Respecto a la diferencia de entalpías entre ACB y ACG a pesar de tener similares temperaturas  $T_o$ ,  $T_p$  y R indicaría mayor disposición de las dobles hélices de las cadenas de amilopectina para ACG que ocasionaron mayor absorción de energía para gelatinizar el gránulo (Lemos et al., 2018).

Los valores señalan que los almidones de cáscara de plátano evaluados (ACB y ACG) son fáciles de cocinar, ya que su gelatinización comienza a aproximadamente 71 °C y concluye a 85 °C, lo que sugiere un proceso de cocción eficiente y rápido. Además, este proceso requiere un menor consumo de energía, lo que podría ser beneficioso en términos de eficiencia energética durante la preparación de alimentos (Lucas-Aguirre et al., 2016). Estas propiedades térmicas favorables hacen que los almidones de musáceas sean una opción atractiva para su uso en alimentos que requieren procesamiento térmico debido al grado de gelatinización que mejora su hidrólisis por enzimas digestivas, lo que podría tener implicaciones en la digestibilidad y valor nutricional de los alimentos elaborados con estos almidones (Chávez-Salazar et al., 2017).

#### **4.4. Caracterización de amilosa, amilopectina, color y propiedades funcionales tecnológicas del almidón de cáscara de plátano variedad Bellaco y Guayabo**

##### **4.4.1. Análisis del contenido de amilosa y amilopectina de los almidones**

La fracción de amilosa y amilopectina determina principalmente la funcionalidad del almidón (Makroo et al., 2021) y a su vez, las propiedades y su calidad en los alimentos (Sjöö & Nilsson, 2018). Es por ello que las relaciones entre estructura, función y uso de cada almidón son información crucial para aumentar las aplicaciones industriales, especialmente de los almidones no convencionales (Zhu et al., 2020). En la Tabla 6 se muestran

los diferentes porcentajes de amilosa y amilopectina de los almidones extraídos de cáscara de plátano, se puede apreciar que el almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG) presentó mayor ( $P < 0,05$ ) contenido de amilosa con  $32,79 \pm 0,75$  %, comparado al almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB)  $26,66 \pm 0,14$  % (Anexo-IIIa). Según los resultados el contenido alto de amilosa de ACG contribuye a aumentar la capacidad de gelatinización, además la amilosa influye tanto en las propiedades fisicoquímicas como funcionales del almidón, por lo que su contenido es un factor crucial en el almidón (Miah et al., 2023). Estos valores de **amilosa**, encontrados en ACB son cercanos a los reportado por Li et al. (2018), quienes obtuvieron un porcentaje de amilosa de 25,7 % en almidón extraído de cáscara de plátano verde (*Musa spp.*). De igual manera el ACG se asemeja más a lo reportado por Francis et al. (2023), quienes encontraron un contenido de amilosa de 31,61 % en el almidón de cáscara de plátano verde (*Musa spp.*). Valores superiores fueron obtenidos por Yang et al. (2022), en los almidones de plátano de la variedad Mzuzu, Mshale y Moshi (*Musa spp.*) con porcentajes de amilosa de 39,50 %, 36,94 % y 35,10 % respectivamente. Obadi y Xu (2021) indican que los almidones se pueden encontrar con diferentes contenidos de amilosa según la fuente botánica y los clasifican en: contenido normal de amilosa (20 a 40%); contenido alto de amilosa (50 a 80%); y un contenido bajo de amilosa de 0 a 8% (almidón ceroso), siguiendo esta clasificación el ACB y ACG se encuentran como almidones con contenido normal de amilosa. Las variaciones del contenido de amilosa pueden deberse a las diferentes variedades de plátano, origen geográfico, condiciones de cultivo, etapas de maduración, método de extracción del almidón y método de medición de la amilosa (Makroo et al., 2021).

**Tabla 6.** Contenido de amilosa y amilopectina en el almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo

Muestras	Amilosa (%)	Amilopectina (%)
ACB	$26,66 \pm 0,14^b$	$42,29 \pm 0,20^b$
ACG	$32,79 \pm 0,75^a$	$45,98 \pm 0,80^a$

Los valores representan el Promedio  $\pm$  SEM, datos provenientes del experimento (n=3). Valores con superíndices distintos en la misma columna son significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

Con respecto al contenido de **amilopectina** en los almidones extraídos de la cáscara de plátano, el ACG obtuvo el mayor ( $P < 0,05$ ) contenido de amilopectina con  $45,98 \pm 0,80$  %, comparado al ACB con  $42,29 \pm 0,20$  % (Anexo-IIIb). Según estos resultados el ACG contribuye a mejorar sus propiedades adhesivas e influye directamente en el comportamiento de los gránulos debido a su alto contenido de amilopectina Luga y Mironeasa (2020). Los

valores obtenidos son inferiores a lo reportado por Nasrin et al. (2015), obtuvieron 67,48 % de amilopectina en almidón extraído de cáscara de plátano Kluai Namwa (*Musa acuminata* × *balbisiana*). La diferencia en el contenido de amilopectina puede atribuirse al método de medición de la amilopectina, ya que ciertos métodos de análisis cometen un error al medir uno de los componentes y consideran el otro como complemento de un 100% (Bolaños, 2011).

#### 4.4.2. Análisis del color de los almidones

La evaluación de color en los almidones es crucial para asegurar la calidad, la pureza y la consistencia del producto. Este análisis permite identificar y corregir anomalías en la producción, y asegura la idoneidad del almidón para aplicaciones específicas en la industria alimentaria, cumpliendo con los estándares industriales y satisfaciendo las expectativas de los consumidores (Guo et al., 2019). La Tabla 7 presentan los parámetros colorimétricos ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) y el índice de blancura ( $W$ ) evaluados en los almidones extraídos de la cáscara verde de plátano. El almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG), presentó mayor ( $P < 0,05$ ) **luminosidad ( $L^*$ )** con 90,45 respecto, al almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB) en 89,88 (Anexo-IVa). Esta diferencia puede deberse al contenido de humedad presente la muestra, este efecto es reportado Zhang et al. (2024) quienes señalan que el valor  $L^*$  tiende a reducirse a medida que se reduce el contenido de humedad. Por otro lado, la presencia de proteínas de la cáscara de plátano pudieron interferir en la diferencia de luminosidad entre ACG y ACB, como lo señala Salazar et al. (2022) en su estudio sobre harina obtenida de plátano verde (*Musa acuminata* AAA), reportó que la presencia de proteínas en la cáscara de plátano contribuyó al oscurecimiento del almidón en harinas de plátano. Los valores de luminosidad ( $L^*$ ) son menores a lo obtenido por Nasrin et al. (2015) quienes indican valores de 93,30 ( $L^*$ ) en almidón extraído de cáscara de plátano Kluai Namwa (*Musa acuminata* × *balbisiana*), sin embargo, son mayores a los valores de luminosidad obtenidos por Viana et al. (2024) para harinas de pulpa de plátano ( $L^* = 73,27$ ) y harina de cáscara ( $L^* = 44,57$ ) obtenidas de *Musa paradisiaca* AAB, estas variaciones pueden asignarse al método de obtención del almidón que se utiliza. El uso de sales como el metabisulfito de sodio y el cloruro de calcio durante el procesamiento de las cáscaras de plátano verde mejora el parámetro  $L^*$ , como lo indican Hoque y Janaswamy (2024), quienes reportaron un incremento de  $L^*$  de 81,68 a 84,72, asimismo Salazar et al. (2022), señalaron un incremento de  $L^*$  de 59,3 a 79,7 en la harina de plátano verde (*Musa acuminata* AAA). Estas sales previenen la oxidación del almidón y facilitan la separación del almidón de la cáscara.

**Tabla 7.** Parámetros de color y índice de blancura de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo.

Muestras	L*	a*	b*	W (%)
ACB	89,88 ± 0,01 <sup>b</sup>	1,09 ± 0,01 <sup>a</sup>	4,56 ± 0,02 <sup>a</sup>	88,84 ± 0,01 <sup>b</sup>
ACG	90,45 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,67 ± 0,01 <sup>b</sup>	4,35 ± 0,01 <sup>b</sup>	89,48 ± 0,01 <sup>a</sup>

Parámetros del espacio de color CIELAB: L\* (Luminosidad); a\* (Coordenadas rojo-verde); b\* (Coordenadas amarillo-azul); W: índice de blancura. Los valores representan el Promedio ± DE, datos procedentes del experimento (n=3). Valores con superíndices distintos en la misma columna son significativamente diferentes (p <0,05).

El valor de la **coordenada a\*** para ambos almidones (ACB y ACG) tuvieron tendencia hacia la cromaticidad roja (+a\*); siendo ACB quien presento mayor (P<0,05) valor de a\* con 1,09 y menor para ACG en 0,67 (Anexo-IVb). Estos valores se encuentran cercanos a lo señalado por Nasrin et al. (2015) en almidón de cáscara de plátano Kluai Namwa (a\* = 0,80) y almidón de pulpa de plátano (a\* = 0,08); valores superiores son reportados por Viana et al. (2024) para harina de pulpa de plátano (a\* = 4,97) y harina de cáscara (a\* = 5,67) obtenidas de *Musa paradisiaca* AAB; esta variabilidad es ocasionado por la composición de la cáscara de plátano, que consiste en azúcar y aminoácidos, lo que explicaría la diferencia encontrada entre ACB y ACG, como lo reporta Verma et al. (2024) quienes indican diferencia del croma a\* causado por el color natural de la cáscara de plátano y parte del azúcar caramelizado durante el proceso de secado. Además, diferencias en a\* también se atribuyen a la variación en las especies de plátano usadas en la producción de almidón (Helen et al., 2022).

El valor de la **coordenada b\***, en los almidones extraídos de cáscara de plátano presentaron acentuación del color amarillo, ACB obtuvo el mayor (P<0,05) b\* en 4,56 y para ACG en 4,35 (Anexo-IVc). Estos valores se encuentran cercanos a lo obtenido por Nasrin et al. (2015) en su investigación de almidón extraído de cáscara de plátano Kluai Namwa (b\* = 5,40). Valores superiores fueron obtenidos por Viana et al. (2024) en harina de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* AAB) con b\* = 18,53, asimismo Salazar et al. (2022) reportaron en harinas de plátano verde (*Musa acuminata* AAA) valores con b\* de 12,9 a 14,0, lo cual se debe a la presencia de otras sustancias no amiláceas que incrementan este valor. Estas diferencias en b\* se podrían atribuirse a la presencia de clorofila en la cáscara (Anyasi et al., 2017), visualmente en este trabajo también se confirmó esta diferencia, ya que las cáscaras de plátano Bellaco tenían un color verde más oscuro que el Guayabo. Además el almidón extraído tendrá influencia del color de la materia prima, por lo que concuerda la acentuación de +b\* (Verma et al., 2024).

El **índice de blancura (W)** en almidones indica qué tan claro es el almidón, cuanto mayor sea este índice, más blanco será el almidón, un elevado valor de blancura podría potenciar su utilización en varias aplicaciones alimentarias en las que se recomienda la estandarización de color (Barraza-Jáuregui y Siche, 2021). El almidón extraído de cáscara de plátano Guayabo presentó el mayor ( $P < 0,05$ ) índice de blancura  $W = 89,48 \%$ , comparada al almidón de cáscara de plátano Bellaco en  $W = 88,84 \%$  (Anexo-IVd). La fuente de extracción y los componentes del almidón extraído afectaron a esta característica, por lo que se obtuvo un almidón de baja pureza como lo reporta Guo et al. (2019) valores de índice de blancura superiores a  $90 \%$  son indicativos de alta pureza del almidón extraído. Asimismo, Nasrin et al. (2015) reportó valores de  $L^*$  (93,3),  $a^*$  (0,80) y  $b^*$  (5,40) en almidón extraído de cáscara de plátano Kluai Namwa, obteniéndose un  $W = 91,36 \%$ . Valores inferiores son señalados por Viana et al. (2024) en su investigación de harina de cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* AAB) con un  $W = 41,28 \%$  y Hadisoewignyo et al. (2017) reportó  $55,96 \%$  de  $W$  en almidón extraído de cáscara de plátano (*Agung Semeru*). Estos valores inferiores pudieron deberse al modo de extracción del almidón como lo reporta Anyasi et al. (2017), señalando oscurecimiento de la harina de plátano verde (*Musa spp*) debido a la actividad enzimática de la polifenoloxidasas durante la sedimentación y secado, por otro lado Viana et al. (2024), reafirma que la temperatura y tiempo de secado influirán en la  $W$  de los almidones; influenciado por la gelatinización del almidón, que genera oscurecimiento del producto. Además que el sumergido de la materia prima con sales ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  y  $\text{CaCl}_2$ ) incrementan la  $L^*$  ocasionando valores más altos en el índice de blancura (Salazar et al., 2022). Además, la cantidad de amilosa y amilopectina presente en el almidón influye en el oscurecimiento, como lo señala Chandrakala et al. (2017), que los almidones extraídos de cáscara de plátano son ricos en amilopectina, por lo que tendrán valores menores de  $W$ . En general, ambas muestras presentaron índices de blancura ( $W$ ) inferiores a  $90 \%$ , lo que sugiere que la composición de las cáscaras de plátano interviene en el proceso de extracción obteniendo una pureza menor.

#### **4.4.3. Análisis de las propiedades funcionales tecnológicas de los almidones**

##### **4.4.3.1. Capacidad de retención de agua (CRA)**

La CRA en los almidones se refiere a la cantidad de agua que el almidón puede absorber y mantener en su estructura, siendo un parámetro clave para aplicaciones alimentarias, especialmente en productos que exigen textura, viscosidad y estabilidad frente a procesos como la cocción o el almacenamiento (Munir et al., 2024). En la Tabla 8 se presentan los porcentajes de CRA, el almidón extraído de cáscara de plátano Guayabo (ACG), presentó

mayor ( $P < 0,05$ ) CRA con 167,47 % respecto, al almidón extraído de cáscara de plátano Bellaco (ACB) en 157,87 % (Anexo-Va), esta variación es afectada por la proporción de amilosa y amilopectina, tal como lo indica Miah et al. (2023), que estudiaron las propiedades funcionales tecnológicas de almidón extraído de plátano (*Musa paradisiaca*), reportando valores de CRA entre 170,66 - 165,84 %, atribuyendo la diferencia a la relación amilosa/amilopectina, cuando la proporción de amilosa es mayor, la CRA también aumenta, lo que genera una menor compactación entre las moléculas de amilosa y amilopectina, este efecto también fue reportado por Francis et al. (2023) en su estudio de almidón extraído de cáscara de plátano verde (*Musa ssp*), señala que menor CRA es causada por un mayor contenido de amilopectina y bajo contenido de amilosa. Además, los valores obtenidos están dentro del rango de CRA señalado por Marta et al. (2022), quienes indicaron valores entre 130,45% a 251% en almidones de diversas variedades de plátano (*Musa ssp*). Los valores de CRA también son afectados por la presencia de proteína y fibra, lo que sugiere que los almidones (ACB y ACG) presentarían estas impurezas debido a la fuente y procedimiento de extracción del almidón, este efecto es descrito por Islam et al. (2023) en almidón resistente de plátano verde (*Musa paradisiaca*) señalaron que cuanto más bajo sea el contenido de proteína y fibra, los resultados de CRA serán más altos. Nasrin et al. (2015) reportaron el mismo efecto en almidón extraído de cáscara de plátano Klwai Namwa (*Musa acuminata* x *balbisiana*) con CRA inferior a 200%, asociando a las características físicas de las moléculas de almidón, la fibra dietética, proteína y el porcentaje de amilosa en la muestra. La importancia de tener valores altos de CRA radica en la fabricación de productos de panadería, donde la hidratación es necesaria para mejorar las características de manipulación de la masa (Miah et al., 2023), en los productos cárnicos es un parámetro de calidad crucial relacionado con la pérdida de peso y rendimiento, siendo crucial en términos de pérdida financiera. Además, juega un papel en la calidad sensorial, ya que la pérdida de agua durante la cocción puede afectar los atributos de textura, como la jugosidad (De Oliveira et al., 2024). Según los valores de CRA obtenidos en ACB y ACG, pueden ser considerados como una fuente de almidones para emplearse en la fabricación de alimentos panificados y cárnicos.

#### 4.4.3.2. Solubilidad (S)

La solubilidad en los almidones se refiere a la capacidad que tienen para disolverse o dispersarse en agua, debido a la liberación de amilosa del interior del gránulo cuando pierde su estructura por efecto de la absorción de agua, esta propiedad es importante en varias aplicaciones industriales y alimentarias, ya que influye en las características como la textura, la viscosidad y la capacidad de gelificación (Meaño et al., 2014). En la Tabla 8 se puede

apreciar los porcentajes de solubilidad (S), en la cual el almidón extraído de cáscara de plátano Bellaco (ACB), presentó mayor ( $P<0,05$ ) solubilidad con 1,56 % respecto, al almidón extraído de cáscara de plátano Guayabo (ACG) en 0,60 % (Anexo-Vb). La influencia de tamaño de granulo superior de ACB (20,26  $\mu\text{m}$ ) comparado a ACG (14,90  $\mu\text{m}$ ), pudo ocasionar que ACB presente una mejor solubilidad en agua, este efecto es señalado por Miah et al. (2023) quienes indicaron que la solubilidad es afectada por el tamaño de partícula de almidón y composición (amilosa/amilopectina). Asimismo, Islam et al. (2023) reafirma que la morfología y distribución de tamaño de las partículas de los gránulos del almidón, afectan de manera directa en la capacidad de solubilidad debido que las superficies lisas y densas de los gránulos de almidón, reducen la hidratación y la lixiviación del almidón resultando valores inferiores de solubilidad. Además, Marta et al. (2022) obtuvieron valores de solubilidad entre 1,29 a 11,7 % en almidones extraídos de diferentes variedades de plátano (*Musa ssp*) y que el aumento de la solubilidad estaría relacionada al incremento de temperatura. La solubilidad en almidón extraído de cáscara de plátano Kluai Namwa se mantienen por debajo del 2% hasta los 75 °C (Nasrin et al., 2015), similares valores fueron obtenidos en ACB y ACG que no superaron el 2%, además Olatunde et al. (2017) obtuvieron solubilidad entre 0,30 y 0,80 % en almidón nativo de plátano verde variedad Agbagba y Araya-Quesada et al. (2014) indicaron valores de solubilidad en harina de cáscara de plátano verde (*Musa AAB Horn Plantain Cv. Harto*) de 1,58 %, estas varianzas podría atribuirse a la estructura más ordenada (cristalinidad) y compacta del almidón de plátano, que fueron perjudiciales para la infiltración de agua en los gránulos reduciendo la liberación de amilosa al medio (Yang et al., 2022). La baja solubilidad que presenta el almidón de cáscara de plátano verde impide que se use ampliamente en alimentos instantáneos, para mejorar su solubilidad se necesitaría someterse a varios tratamientos, como la gelatinización, extrusión o modificaciones químicas (Munir et al., 2024).

#### 4.4.3.3. Poder de hinchamiento (PH)

Esta propiedad se refiere al aumento en la masa del almidón no disuelto, provocado por la capacidad de absorber agua en los grupos hidroxilo de las moléculas de amilosa y amilopectina, generando una expansión del granulo cuando se calientan en un medio acuoso (Miah et al., 2023). En la Tabla 8 se muestran los resultados de PH de los almidones extraídos de cáscara de plátano, el ACG presentó mayor ( $P<0,05$ ) PH con 1,69 g/g respecto, al ACB que presento 1,60 g/g (Anexo-Vc). Este comportamiento fue similar al CRA, donde ACG (167,47 %) fue mayor que ACB (157,87), ambas propiedades CRA y PH están relacionados como lo señala Islam et al. (2023) que el CRA y PH reflejan la capacidad del almidón para

interactuar con el agua, son propiedades complementarias que dependen de factores estructurales y temperatura del medio. Los valores de PH de ACB y ACG se encuentran dentro del intervalo señalado por Olatunde et al. (2017) con 1,38 y 2,14 g/g de capacidad de hinchamiento evaluados a 60 °C en almidones nativos y modificados de plátano de la variedad Agbagba. Nasrin et al. (2015) reportaron valores de PH en 2,3 g/g para almidón de la pulpa de plátano y 1,7 g/g en almidón de cáscara de plátano Kluai Namwa. Li et al. (2018) encontraron poder de hinchamiento alrededor de 2 g/g a temperatura menor de 65 °C en almidones extraídos de cáscara de plátano verde (*Musa* spp.). Valores superiores son indicados por Yang et al. (2022), es su estudio de cinco variedades de almidón de plátano (*Musa* spp.) reportó PH oscilando entre  $11,27 \pm 0,04$  y  $12,48 \pm 0,71$  g/g y Marta et al. (2022) encontraron un poder de hinchamiento del almidón de plátano entre 1,38–97,96 g/g en diversas variedades de plátano (*Musa* spp.). Las variaciones del PH pueden deberse a la relación amilosa/amilopectina que es importante en la absorción de agua y la expansión del almidón, este efecto es señalado por Khoozani et al. (2019) en su estudio de harina de plátano verde variedad Cavendish (*Musa* AAA Cv. Nanica) reportaron valores menores de PH en muestras con mayor contenido de amilosa. Miah et al. (2023), reafirma que el poder de hinchamiento es típicamente bajo para gránulos de almidón con alto contenido de amilosa, áreas cristalinas más altas e interacciones covalentes fuertes en las regiones cristalinas. Además, la formación de complejos lípido-amilosa y proteína-amilosa restringe significativamente la propiedad de hinchamiento del almidón. Los valores reducidos de poder de hinchamiento (PH) podrían ser indicativos de la presencia de dichos complejos, atribuibles a la naturaleza de la materia prima y al método de extracción utilizado, el cual no logró una purificación (Islam et al., 2023). Por otro lado se ha demostrado que el PH de los gránulos de harina y almidón de diferentes productos alimenticios se correlaciona positivamente con el incremento de la temperatura (Anyasi et al., 2017). Esto indicaría que los reportes de PH superiores al obtenido en ACB y ACG estarían realizados a temperaturas por encima de los 70 °C, como lo reportan Fontes et al. (2017) y Yang et al. (2022), ellos señalan la existencia de una fuerte disposición micelar en el almidón extraído de plátano que necesitaba romperse, con el incremento de temperatura se logra la ruptura de los enlaces de hidrógeno intermoleculares en regiones amorfas, lo que permite la absorción de agua y que el poder de hinchamiento del almidón de plátano incremente rápidamente a temperaturas superiores a 70 °C, esto está asociado con la temperatura máxima (Tp) del DSC. Un elevado poder de hinchamiento es una característica clave en almidones de alta calidad, especialmente en aplicaciones alimentarias que exigen una alta capacidad de retención de agua. Este tipo de

almidones es utilizado en productos como embutidos, alimentos cárnicos procesados, jaleas y otros (Miah et al., 2023).

#### 4.4.3.4. Sinéresis o estabilidad al congelamiento (Si)

La exudación de agua de los geles congelados (sinéresis) indica el comportamiento de retrogradación de las pastas de almidón cocidas. La estabilidad de congelación-descongelación mide la cantidad de agua liberada de los geles durante el almacenamiento por grado de sinéresis y es un factor importante a tener en cuenta al formular alimentos refrigerados y congelados (Khawas y Deka, 2017). En la Tabla 8 se presentan los valores de sinéresis, el almidón extraído de cáscara de plátano Bellaco (ACB) mostró un porcentaje significativamente mayor ( $P < 0,05$ ) de sinéresis (Si) con 29,13 % respecto, al almidón extraído de cáscara de plátano Guayabo (ACG), que presentó 22,36 % (Anexo-Vd). Esta diferencia está relacionada al contenido no amiláceo, ACB contiene valores inferiores de amilosa y amilopectina comparada a ACG, haciendo que el contenido no amiláceo sea mayor en ACB, ocasionando una mayor retrogradación del gel durante la congelación-descongelación, este efecto fue descrito por Marta et al. (2019), quienes observaron que en almidones de diferentes cultivares de plátano verde (*Musa spp.*) la presencia de componentes no amiláceos disminuye la estabilidad del almidón frente a la retrogradación, como se evidencia en un aumento de la sinéresis. Por lo tanto, los componentes no amiláceos aparentemente facilitan la recristalización del almidón, permitiendo que este proceso ocurriera con mayor facilidad. Khawas y Deka (2017) reafirman que la estabilidad de congelación y descongelación del almidón de plátano es afectada por contenido de amilosa y amilopectina, valores altos de sinéresis implican menores valores de amilosa-amilopectina. Además Vu et al. (2024) añaden que la estabilidad de congelación-descongelación de muestras de almidón extraído de plátano verde (*Musa paradisiaca* L.) incrementa cuando mayor sea el contenido de almidón y la cristalinidad del gránulo de almidón. Los resultados encontrados de sinéresis están dentro del rango indicado por Marta et al. (2022), quienes en su investigación de almidón extraído de diversas variedades de plátano (*Musa ssp*) observaron valores de sinéresis entre 12,16 a 44,40 %; Khawas y Deka (2017) señalan sinéresis del gel de almidón de plátano culinario de 24,13 a 42,58 %; Fontes et al. (2017) reportaron que el almidón de plátano verde variedad Mysore (*Musa* AAB – Mysore) mostró una pérdida total de agua (sinéresis) de 33,46% y Nasrin et al. (2015) en su investigación de almidón extraído de cáscara de plátano reportó valores de sinéresis de 31,4 % y 28,2 % para almidón de pulpa de plátano Kluai Namwa. La cantidad de agua que se separa de los geles durante la congelación aumenta con el tiempo de

almacenamiento, por lo que sugiere que el almidón que se obtiene a partir de la cáscara de plátano no es deseable para productos congelados.

**Tabla 8.** Resultados de las propiedades funcionales tecnológicas de almidón de cáscara de plátano Bellaco y Guayabo.

Muestras	Propiedades funcionales tecnológicas			
	CRA (%)	S (%)	PH (g/g)	Si (%)
ACB	157,87 ± 1,63 <sup>b</sup>	1,56 ± 0,02 <sup>a</sup>	1,60 ± 0,02 <sup>b</sup>	29,13 ± 1,81 <sup>a</sup>
ACG	167,47 ± 1,10 <sup>a</sup>	0,60 ± 0,01 <sup>b</sup>	1,69 ± 0,02 <sup>a</sup>	22,36 ± 0,75 <sup>b</sup>

CRA: Capacidad de retención de agua; S: Solubilidad; PH: Poder de hinchamiento; Si: Sinéresis o estabilidad al congelamiento. Los valores representan el Promedio ± SEM, datos provenientes del experimento (n=3). Valores con superíndice distintos en la misma columna son significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

## V. CONCLUSIONES

- La forma de los gránulos del almidón de cáscara de plátano Bellaco (ACB) fue elipsoidal alargada, con un tamaño de  $20,26 \pm 0,48 \mu\text{m}$  y para el almidón de cáscara de plátano Guayabo (ACG) fue ovoide alargada y tamaño de  $14,90 \pm 0,56 \mu\text{m}$ .
- Los grupos funcionales identificados mediante FTIR-ATR en la estructura de ACB y ACG fueron el hidroxilo (-OH), enlace (C-H),  $\text{H}_2\text{O}$  y enlaces (C-O, C-O-H), con bandas de absorción a 3263, 2927, 1649 y  $1077\text{-}989 \text{ cm}^{-1}$  respectivamente.
- La mayor estabilidad térmica lo presento ACB ( $279,20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y menor ACG ( $262,31^\circ\text{C}$ ), el mayor rango de temperatura de descomposición fue ACG ( $\Delta T= 92,45^\circ\text{C}$ ) y menor para ACB ( $\Delta T= 74,29^\circ\text{C}$ ) según el TGA. La temperatura pico de gelatinización fueron similares, ACB ( $T_p=76,31 \pm 0,28 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y ACG ( $T_p=76,75 \pm 0,33 \text{ }^\circ\text{C}$ ), la entalpía fue mayor para el ACG ( $\Delta H_{\text{Gel}}=3,27 \pm 0,04 \text{ J/g}$ ) comparado a ACB ( $\Delta H_{\text{Gel}}=2,34 \pm 0,10 \text{ J/g}$ ) según el análisis DSC.
- El mayor contenido de amilosa, amilopectina, luminosidad ( $L^*$ ) e índice de blancura ( $W$ ) fue para ACG ( $32,79 \pm 0,75 \%$  y  $45,98 \pm 0,80 \%$ ) ( $L^* = 90,45$  y  $W = 89,48\%$ ) comparado a ACB ( $26,66 \pm 0,14 \%$  y  $42,29 \pm 0,20 \%$ ) ( $L^* = 89,88$  y  $W = 88,84\%$ ).
- Las propiedades funcionales tecnológicas mostraron mayor capacidad de retención de agua y poder de hinchamiento para ACG ( $\text{CRA} = 167,47\%$  y  $\text{PH} = 1,69 \text{ g/g}$ ) y menor para ACB ( $\text{CRA} = 157,87\%$  y  $\text{PH} = 1,60 \text{ g/g}$ ), la solubilidad y sinéresis fue mayor para ACB ( $S = 1,56 \%$  y  $\text{Si} = 29,13\%$ ) y menor para ACG ( $S = 0,60\%$  y  $\text{Si} = 22,36\%$ ).

## VI. PROPUESTAS A FUTURO

- Utilizar el almidón de cáscara de plátano Bellaco (*Musa paradisiaca* AAB) por su alta estabilidad térmica, para aplicaciones industriales que requieran conservar sus propiedades a temperaturas elevadas, como en productos de panificación.
- Utilizar el almidón de cáscara de plátano Bellaco (*Musa paradisiaca* AAB) para procesos que requieren utilizar menor energía y gelatinizar rápidamente (pregelatinizados, salsas y cremas).
- Optimizar el proceso de obtención de los almidones de cáscaras de plátano, mediante procesos físicos, químicos y enzimáticos, con el fin de aumentar el rendimiento, mejorar la pureza y índice de blancura de los almidones.
- Estudiar el contenido de almidón resistente y de la fibra dietética total en los almidones de cáscara de plátano, a fin de aprovechar los beneficios positivos de estos compuestos en la salud intestinal.
- Realizar estudios de modificación física y química de los almidones de cáscara de plátano, para mejorar sus propiedades funcionales como la solubilidad y reducir la sinéresis del gel, a fin de ampliar su aplicación en la industria alimentaria.
- Estudiar la aplicación de almidón de cáscara de plátano en productos alimenticios funcionales y saludables, mediante la evaluación del índice glucémico y digestibilidad, para personas con diabetes que necesitan de requerimientos nutricionales especiales.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, S. E. (2021). *Efecto de la criomaceración de la flor de Jamaica (Hibiscus Sabdariffa) y guayaba (Ppsidium Guajava) en el color de una bebida alcohólica en el espacio CIE  $L^* a^* b^*$*  [Tesis de Grado, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. Repositorio de la UTEQ. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/6463>
- Ai, Y., & Jane, J. L. (2015). Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch-Stärke*, 67(3-4), 213-224. <https://doi.org/10.1002/star.201400201>
- Ai, Y., & Jane, J. L. (2016). Starch: Structure, property, and determination. *Encyclopedia of Food and Health*, 165-174. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00657-7>
- Alarcón, A. E., & Caicedo, M. (2021). *Obtención de ácido láctico a partir del almidón presente en la cáscara de plátano (Musa paradisiaca)* [Tesis de Grado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio de la UG. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/54097>
- Amaya-Pinos, J. B. (2019). Estudio de la dosificación del almidón extraído del banano en un polímero de tipo termoplástico. *Revista Colombiana de Química*, 48(1), 43-51. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v48n1.74469>
- Anchundia, K., Santacruz, S., & Coloma, J. (2016). Caracterización física de películas comestibles a base de cáscara de plátano (*Musa Paradisiaca*). *Revista Chilena de Nutrición*, 43(4), 394-399. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182016000400009>
- Anyasi, T. A., Jideani, A. I., & Mchau, G. R. (2017). Effects of organic acid pretreatment on microstructure, functional and thermal properties of unripe banana flour. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(1), 99-110. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9376-2>
- Araya-Quesada, Y., Morales-Torres, A., Vargas-Aguilar, P., & Wexler, L. (2014). Potencial tecnológico de harina de plátano verde con cáscara (*Musa AAB*) como sustituto de grasa para geles cárnicos. *INNOTEC*, 9(1), 50-60.
- Arone, D. (2019). *Determinación de las propiedades fisicoquímicas, tecnofuncionales y microbiológicas del almidón de arracacha (Arracacia xanthorrhiza) de las variedades blanca, amarilla y morada* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional José María Arguedas]. Repositorio Institucional UNAJMA. <https://hdl.handle.net/20.500.14168/584>
- Baena-Jurado, N., Sanchez, L. T., Pinzon, M. I., & Villa, C. C. (2021). Data from the synthesis and characterization of banana starch nanoparticles from different botanical varieties. *Data in Brief*, 37,1-7. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107167>

- Barraza-Jáuregui, G., & Siche, R. (2021). Almidón de semilla de palta: Optimización del índice de blancura durante el proceso de extracción. *Agroindustrial Science*, 11(1), 81-85.
- Belalcázar, S., Valencia, J. A., & Lozada, J. E. (1991). *La planta y el fruto*. En S. Belalcázar (Ed.), *El cultivo del plátano en el trópico* (pp. 43-89). Instituto Colombiano Agropecuario.
- Bermejo, R., & Moreno, A. (2014). Espectroscopía Infrarroja. En *Análisis instrumental* (pp. 201-221). Editorial Síntesis.
- Blasco, G., & Gómez, F. J. (2014). Propiedades funcionales del plátano (*Musa sp*). *Revista Médica de la Universidad Veracruzana*, 14(2), 22-26.
- Bolaños, D. S. (2011). *Cuantificación simultánea de amilosa y amilopectina en harinas y almidones nativos de yuca (Manihot esculenta Crantz)* [Tesis de Grado, Universidad Del Cauca]. Repositorio Universidad Del Cauca. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/7296>
- Cañas, J. A., Gómez, O. A., & Hernández, A. I. (2018). *Pruebas de producción de ácido láctico a nivel de laboratorio a partir de la cáscara de plátano (Musa paradisiaca) por fermentación utilizando el microorganismo Lactobacillus delbrueckii* [Tesis de Grado, Universidad de el salvador]. Repositorio Institucional UES. <https://hdl.handle.net/20.500.14492/17744>
- Cárdenas, F. L. (2009). *Informe final de consultoría: Estudio del mercado de la cadena de plátano*. Ministerio de Agricultura y Riego. [https://repositorio.midagri.gob.pe/jspui/bitstream/20.500.13036/604/1/estudio\\_platano%20%281%29.pdf](https://repositorio.midagri.gob.pe/jspui/bitstream/20.500.13036/604/1/estudio_platano%20%281%29.pdf)
- Carey, F. A., & Giuliano, R. M. (2014). *Química orgánica* (9ª ed.). Mc Graw-Hill Education.
- Carrasco, F., Pages, P., Gamez-Perez, J., Santana, O., & MasPOCH, M. L. (2010). Processing of poly (lactic acid): characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, 95(2), 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.045>
- Castaño-Carvajal, M. F., Correa-Giraldo, D., & Agudelo-Laverde, L. M. (2019). Elaboración de productos tipo tallarín libres de gluten y evaluación de sus propiedades fisicoquímicas. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1), 1-7. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1194>
- Chandrakala, R., Gundev, P., & Singh, L. (2017). Effect of Different Spices on Enzymatic Browning of Banana Pseudostem Juice. *Journal of Scientific Research and Reports*, 17(1), 1-7. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2017/37919>

- Chandrasekar, C. M., Krishnamachari, H., Farris, S., & Romano, D. (2023). Development and characterization of starch-based bioactive thermoplastic packaging films derived from banana peels. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100328>
- Chávez-Salazar, A., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., Castellanos-Galeano, F. J., Álvarez-Barreto, C. I., & Pacheco-Vargas, G. (2017). Isolation and partial characterization of starch from banana cultivars grown in Colombia. *International Journal of Biological Macromolecules*, 98, 240-246. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.024>
- De Barros Mesquita, C., Leonel, M., Franco, C. M. L, Leonel, S., Garcia, E. L., & Dos Santos, T. P. R. (2016). Characterization of banana starches obtained from cultivars grown in Brazil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 89, 632-639. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.05.040>
- De Oliveira, V. S., Do Nascimento, R. M., Cuambe, S. L., Rosa, V. H. C., Saldanha, T., Junior, J. L. B., & Barbosa, M. I. M. J. (2024) Green banana biomass (*Musa* spp.): A promising natural ingredient to improve technological and nutritional properties of food products. *Food Bioscience*, 60(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104342>
- Dhull, S. B., Malik, T., Kaur, R., Kumar, P., Kaushal, N., & Singh, A. (2020). Banana Starch: Properties Illustration and Food Applications -A Review. *Starch - Stärke*, 73, 1-27. <https://doi.org/10.1002/star.202000085>
- Flores, I. (2011). *Selección de clones y cultivares de plátano y banano (Musa sp.) resistentes a plagas de importancia en condiciones de Satipo* [Tesis de Grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional de la UNCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/325>
- Fontes, S. D. M., Cavalcanti, M. T., Candeia, R. A., & Almeida, E. L. (2017). Characterization and study of functional properties of banana starch green variety of Mysore (*Musa* AAB - Mysore). *Food Science and Technology*, 37(2), 224-231. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.18916>
- Francis, A., Shukla, R. N., Munajji, k. S., & Singh, A. K. (2023) Isolation, modification and utilization of starch from green banana peel as a fruit waste. *Asian Journal of Microbiology Biotechnology and Environmental Sciences*, 25(2), 355-359. <https://doi.org/10.53550/AJMBES.2023.v25i02.028>
- Gallardo, E. E. (2017). *Metodología de la Investigación. Manual Autoformativo Interactivo*. Universidad Continental.

- García, M. (2016). *El color como recurso expresivo: análisis de las series de televisión Mad Men y Breaking Bad* [Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional UCM. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/27291>
- García-Cruz, H. I., Jaime-Fonseca, M. R., Borries-Medrano, E. V., & Vieyra, H. (2020). Extrusion parameters to produce a PLA-starch derived thermoplastic polymer. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(1), 395-412. <https://doi.org/10.24275/rmiq/poly1529>
- García-Ramón, J. A., Carmona-García, R., Valera-Zaragoza, M., Aparicio-Saguilán, A., Bello-Pérez, L. A., Aguirre-Cruz, A., & Alvarez-Ramirez, J. (2021). Morphological, barrier, and mechanical properties of banana starch films reinforced with cellulose nanoparticles from plantain rachis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.112>
- González, M. A., & Montañó, L. M. (2015). La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI. *Latin-American Journal of Physics Education*, 9(4), 13.
- Govindaraju, I., Chakraborty, I., Baruah, V. J., Sarmah, B., Mahato, K. K., & Mazumder, N. (2021). Structure and morphological properties of starch macromolecule using biophysical techniques. *Starch-Stärke*, 73(2), 1-35. <https://doi.org/10.1002/star.202000030>
- Granados, Y. A. (2017). *Importancia de los ensayos TGA y DSC en el estudio de las propiedades térmicas de mezclas asfálticas* [Tesis de Grado, Universidad Distrital Francisco José De Caldas]. Repositorio institucional de la universidad Distrital. <https://repository.udistrital.edu.co/items/db6cddb0-090d-41d5-856f-2e9a8966bbab>
- Guo, J., Kong, L., Du, B., & Xu, B. (2019). Morphological and physicochemical characterization of starches isolated from chestnuts cultivated in different regions of China. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.126>
- Hadisoewignyo, L., Foe, K., & Tjandrawinata, R.R. (2017). Isolation and characterization of Agung banana peel starch from East Java Indonesia. *International Food Research Journal*, 24(3), 1324-1330.
- Hanco, Y. (2021). *Evaluación de las propiedades térmicas en almidones de seis variedades de papas nativas del departamento de Puno* [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Juliaca]. Repositorio Institucional de la UNAJ <http://repositorio.unaj.edu.pe:8080/handle/UNAJ/163>

- Haro-Velasteguí, A. J., Borja-Arévalo, A. E., & Triviño-Bloisse, S. Y. (2017). Análisis sobre el aprovechamiento de los residuos del plátano, como materia prima para la producción de materiales plásticos biodegradables. *Dominio de las Ciencias*, 3(2), 506-525. <https://doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.3.2.esp.506-525>
- Helen, A. O., Omotayo, J., Olugbenga, A., & Timilehin, O. (2022). Physicochemical, Functional, Pasting Properties and Fourier Transform Infrared Spectroscopy of Native and Modified Cardaba banana (*Musa ABB*) Starches. *Food Chemistry Advances*, 1, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100076>
- Hernandez-Gil, L., Caldas-Cortez, L., Contreras-López, D., & Jiménez-Sánchez, A. (2022). Evaluation of the use of banana pseudostem with thermoplastic corn starch for the elaboration of biodegradable dishes. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(3), 1-17. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Mat2893>
- Hoque, M., & Janaswamy, S. (2024). Biodegradable packaging films from banana peel fiber. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37,1-17. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101400>
- Huang, X., Liu, H., Ma, Y., Mai, S., & Li, C. (2022). Effects of Extrusion on Starch Molecular Degradation, Order-Disorder Structural Transition and Digestibility-A Review. *Foods*, 11(16), 1-18. <https://doi.org/10.3390/foods11162538>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2024). Compendio Estadístico Huánuco 2024, INEI. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/7617452/6462075-compendio-estadistico-huanuco-2024.pdf?v=1739294500>
- Islam, S., Satter, M. A., Islam, M. F., Tisha, k. Z., & Mondol, M. M. H. (2023) Physicochemical, Functional and Health Promoting Properties of Resistant Starch from Green Banana (*Musa Paradisiaca*). *SSRN*, 1, 1-27.
- Kerbel, E. (2016). *Banana and Plantain*. In Gross, K. C., Wang, C. Y., & Saltveit, M. (Eds.), *The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks* (pp. 224-229). United States Department of Agriculture.
- Khawas, P., & Deka, S. C. (2017). Effect of modified resistant starch of culinary banana on physicochemical, functional, morphological, diffraction, and thermal properties. *International Journal of Food Properties*, 20(1), 133-150. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1147459>
- Khoozani, A. A., Bekhit, A. E. D. A., & Birch, J. (2019). Effects of different drying conditions on the starch content, thermal properties and some of the physicochemical parameters

- of whole green banana flour. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130(1), 938-946. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.010>
- Kunyanee, K., Phadtaisong, K., Chiangmai, J. N., Parittapongsachai, N., Van Ngo, T., Luangsakul, N., & Sungsinchai, S. (2023). Improving the swelling capacity of granular cold-water rice starch by ultrasound-assisted alcoholic-alkaline treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106506>
- Lagos, P. W. (2016). *Comparación de la Cinética de Gelatinización de Almidón de Papa Mediante: DSC y Microscopía de Luz Polarizada* [Tesis de Grado, Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2016/faw678c/doc/faw678c.pdf>
- Lazo-Aguirre, W. A. (2019). Espectroscopia infrarrojo y técnicas de machine learning y deep learning para la detección y clasificación de arándanos. *Pueblo Continente*, 30(2), 555-570. <http://doi.org/10.22497/PuebloCont.302.22>
- Lemos, P. V. F., Barbosa, L. S., Ramos, I. G., Coelho, R. E., & Druzian, J. I. (2018). The important role of crystallinity and amylose ratio in thermal stability of starches. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131, 2555-2567. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6834-y>
- Leonel, M., Leonel, S., Rodrigues, T. P., Azevedo J. M., Calsavara, R., & Cordeiro, M. S. A. (2021). Agronomic yield and starch properties of banana cultivars. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 56, 1-10. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921>
- Li, Y., Wang, J. H., Wang, E. C., Tang, Z. S., Han, Y., Luo, X. E., Zeng, X.A., Woo, M.W., & Han, Z. (2023). The microstructure and thermal properties of pulsed electric field pretreated oxidized starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 235, 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123721>
- Li, Z., Guo, K., Lin, L., He, W., Zhang, L., & Wei, C. (2018). Comparison of physicochemical properties of starches from flesh and peel of green banana fruit. *Molecules*, 23(9), 1-15. <https://doi.org/10.3390/molecules23092312>
- Londoño-Restrepo, S. M., Rincón-Londoño, N., Contreras-Padilla, M., Acosta-Osorio, A. A., Bello-Pérez, L. A., Lucas-Aguirre, J. C., & Rodríguez-García, M. E. (2014). Physicochemical, morphological, and rheological characterization of *Xanthosoma robustum* Lego-like starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 65, 222-228. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.01.035>
- López, J., Cuarán, J. C., Arenas, L. V., & Flórez, L. M. (2014). Usos potenciales de la cáscara de banano: elaboración de un bioplástico. *Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales*, 1(1), 7-21. <https://doi.org/10.23850/24220582.109>

- Lucas-Aguirre, J. C., Velásquez-Herrera, J. D., & Quintero-Castaño, V. D. (2016). Evaluación de las propiedades térmicas y composicionales de almidones extraídos de 26 variedades de musáceas. *Vitae*, 23(1), 1-6.
- Luga, M., & Mironeasa, S. (2020). A review of the hydrothermal treatments impact on starch based systems properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(22), 1-27. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1664978>
- Luque-Vilca, O. M., Pampa-Quispe, N. B., Pumacahua-Ramos, A., Pilco-Quesada, S., Cabel Moscoso, D. J., & Choque-Rivera, T. J. (2023). Structural, Thermal, Rheological, and Morphological Characterization of the Starches of Sweet and Bitter Native Potatoes Grown in the Andean Region. *Polymers*, 15(22), 1-14. <https://doi.org/10.3390/polym15224417>
- Makroo, H. A., Naqash, S., Saxena, J., Sharma, S., Majid, D., & Dar, B. N. (2021). Recovery and characteristics of starches from unconventional sources and their potential applications: A review. *Applied Food Research*, 1(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2021.100001>
- Manzanillas, L. A. (2018). *Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de féculas de tres variedades de camote (Ipomoea batata) para aplicaciones alimentarias* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional UTA. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/28375>
- Marquez, M. A. (2022). *Efecto de la hidrólisis ácida sobre las propiedades de almidones obtenidos de dos variedades de papa amarga y tunta* [ Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio de la UNALM. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/5445>
- Marta, H., Cahyana, Y., Djali, M., Arcot, J., & Tensiska, T. (2019). A comparative study on the physicochemical and pasting properties of starch and flour from different banana (*Musa spp.*) cultivars grown in Indonesia. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 1562-1575. <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1657447>
- Marta, H., Cahyana, Y., Djali, M., & Pramafisi, G. (2022). The Properties, Modification, and Application of Banana Starch. *Polymers*, 14(15), 1-20. <https://doi.org/10.3390/polym14153092>
- Martínez, P., Peña, F., Gómez, Y., Vargas, G., & Velezmoro, C. (2019). Propiedades fisicoquímicas, funcionales y estructurales de almidones nativos y acetilados obtenidos a partir de la papa (*Solanum tuberosum*) var. 'única'. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(3), 338-351.

- Martínez-Mora, E. O. (2015). Caracterización morfológica y contenido de almidón resistente y disponible en bananos (*Musa sapientum*) exportables del Ecuador. *Revista Española de nutrición humana y dietética*, 19(3), 153-159. <https://doi.org/10.14306/renhyd.19.3.161>
- Maseko, K. H., Regnier, T., Meiring, B., Wokadala, O. C., & Anyasi, T. A. (2024). *Musa* species variation, production, and the application of its processed flour: A review. *Scientia Horticulturae*, 325, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112688>
- Maza, N. N. (2020). *Extracción y caracterización fisicoquímica y tecnofuncional de carbohidratos tipo almidón de cinco variedades de Quinoa* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio de la UNALM. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4465>
- Meaño Correa, N., Ciarfella Pérez, A. T., & Dorta Villegas, A. M. (2014). Evaluación de las propiedades químicas y funcionales del almidón nativo de ñame congo (*Dioscorea bulbifera* L.) para predecir sus posibles usos tecnológicos. *Saber*, 26(2), 182-188.
- Medina, J. A., & Salas, J. C. (2008). Caracterización morfológica del granulo de almidón nativo: apariencia, forma, tamaño y su distribución. *Revista de Ingeniería*, 27(1), 56-62. <https://doi.org/10.16924/revinge.27.6>
- Méndez, P. A., Méndez, Á. M., Martínez, L. N., Vargas, B., & López, B. L. (2022). Cassava and banana starch modified with maleic anhydride-poly (ethylene glycol) methyl ether (Ma-mPEG): A comparative study of their physicochemical properties as coatings. *International Journal of Biological Macromolecules*, 205, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.02.053>
- Miah, M. A. S., Islam, S., Abedin, N., Islam, M. N., Islam, M. F., Tisa, K. J., Saha, A.K., & Aziz, S. (2023). Physicochemical and functional properties of banana starch and its alternative returns. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 11(2), 866-879. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.11.2.34>
- Molina, M. (2019). *Caracterización de almidón extraído del cotiledón de tres variedades de *Mangifera indica* L* [Tesis de Grado, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. Repositorio institucional UNICACH. <https://hdl.handle.net/20.500.12753/2338>
- Mondragón, P. (2017). *Espectroscopia de infrarrojo para todos y 51 espectros de alimentos consumidos en México*. CIATEJ. [https://ciatej.mx/files/el\\_ciatej/comunicacion/divulgacion/espectroscopia.pdf](https://ciatej.mx/files/el_ciatej/comunicacion/divulgacion/espectroscopia.pdf)

- Mondragón, P. (2020). Principios y aplicaciones de la espectroscopía de infrarrojo en el análisis de alimentos y bebidas. CIATEJ. [https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion\\_5f89fd7801268.pdf](https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5f89fd7801268.pdf)
- Mondragón-Cortez, P. M., Herrera-López, E. J., Arriola-Guevara, E., & Guatemala-Morales, G. M. (2022). Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) in combination with Attenuated Total Reflection (ATR) for rapid analysis of the tequila production process. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 21(3), 1-12.
- Monroy, Y., Rivero, S., & García, M. A. (2017). Análisis reológico y microestructural de almidón de mandioca modificado con ultrasonido. *Revista UNLP*, 1-8. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/148876>
- Moo-Huchin, V. M., Cabrera-Sierra, M. J., Estrada-León, R. J., Ríos-Soberanis, C. R., Betancur-Ancona, D., Chel-Guerrero, L., & Pérez-Pacheco, E. (2015). Determination of some physicochemical and rheological characteristics of starch obtained from *Brosimum alicastrum* Swartz seeds. *Food Hydrocolloids*, 45, 48-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.009>
- Muimba-Kankolongo, A. (2018). *Food crop production by smallholder farmers in Southern Africa: Challenges and opportunities for improvement*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814383-4.00012-8>
- Munir, H., Alam, H., Nadeem, M. T., Almalki, R. S., Arshad, M. S., & Suleria, H. A. R. (2024). Green banana resistant starch: A promising potential as functional ingredient against certain maladies. *Food Science & Nutrition*, 12 (6), 3787–3805. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4063>
- Nasrin, T. A. A., Noomhorm, A., & Anal, A. K. (2015). Physico-Chemical Characterization of Culled Plantain Pulp Starch, Peel Starch, and Flour. *International Journal of Food Properties*, 18(1), 165-177. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.828747>
- Obadi, M., & Xu, B. (2021). Review on the physicochemical properties, modifications, and applications of starches and its common modified forms used in noodle products. *Food Hydrocolloids*, 112, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106286>
- Olatunde, G. O., Arogundade, L. K., & Orija, O. I. (2017). Chemical, functional and pasting properties of banana and plantain starches modified by pre-gelatinization, oxidation and acetylation. *Cogent Food & Agriculture*, 3 (1), 1-12. <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1283079>

- Orsini, S. M., & Aparicio, G. P. (2021). Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR) para análisis de muestras de harina de trigo, fécula de maíz y almidón de yuca. @ *limentech*, *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 19(1), 5-16.
- Paramasivam, S. K., Saravanan, A., Narayanan, S., Shiva, K. N., Ravi, I., Mayilvaganan, M., Pushpa, R., & Uma, S. (2021). Exploring differences in the physicochemical, functional, structural, and pasting properties of banana starches from dessert, cooking, and plantain cultivars (*Musa* spp.). *International Journal of Biological Macromolecules*, 191, 1056-1067. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.09.172>
- Pardo, O. H., Castañeda, J. C., & Ortiz, C. A. (2013). Caracterización estructural y térmica de almidones provenientes de diferentes variedades de papa. *Acta Agronómica*, 62(4), 289-295. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/71946>
- Peña, E. F. (2017). *Extracción y caracterización fisicoquímica y funcional de almidones de cinco variedades de papas nativas procedentes de Ilave (Puno)* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional La Molina. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2655>
- Pielichowska, K., & Nowicka, K. (2019). Analysis of nanomaterials and nanocomposites by thermoanalytical methods. *Thermochimica Acta*, 675, 140-163. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2019.03.0141>
- Pineda-Gómez, P., Coral, D. F., Arciniegas, M. L., Rorales-Rivera, A., & Rodríguez García, M. E. (2010). Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: estudio por calorimetría diferencial de barrido. *Ingeniería y Ciencia*, 6(11), 129-141.
- Prieto, E. (2007). *Estudio de las transiciones térmicas del almidón y el almidón termoplástico mediante análisis térmicos (DSC y TGA)* [Tesis de Grado, Universidad de los Andes]. Repositorio de la Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/23577>
- Quispe, Y. (2023). *Evaluación de las propiedades físicas, químicas y tecnofuncionales de almidones de quinua (*Chenopodium quinoa Willd*) modificados enzimáticamente* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional José María Arguedas]. Repositorio Institucional UNAJMA. <https://hdl.handle.net/20.500.14168/827>
- Ramírez-Hernández, A., Hernández-Mota, C. E., Páramo-Calderón, D. E., González-García, G., Báez-García, E., Rangel-Porras, G., Vargas-Torres, A., & Aparicio-Saguilán, A. (2020). Thermal, morphological and structural characterization of a copolymer of starch and polyethylene. *Carbohydrate Research*, 488, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.107907>

- Riera, M. A., Avellán, A. C., Zamora, Y. S., Mendoza, A. N., Zambrano, M. V., Zambrano, C. D., & Baquerizo-Crespo, R. J. (2021). Estimación de la entalpía de gelatinización en una mezcla de almidón termoplástico. *Prisma Tecnológico*, 12(1), 47-53. <https://doi.org/10.33412/pri.v12.1.2864>
- Ríos, K. L. (2014). *Análisis comparativo de las propiedades físico-químicas y nutrimentales de almidón obtenido a partir de dos especies de malanga (Colocasia antiquorum y Colocasia esculenta) cultivadas en el estado de Oaxaca* [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de la Mixteca]. [http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/12223.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/12223.pdf)
- Riveros, C. M., & Reyes, J. D. (2021). *Una revisión documental sobre la espectroscopía de absorción y emisión atómica: construcción de un proyecto curricular desde el alineamiento constructivo* [Tesis de Maestría, Universidad Pedagógica Nacional]. Repositorio Institucional UPN. <http://hdl.handle.net/20.500.12209/17126>
- Robinson, J. C. & Galán, S. V. (2012). *Plátanos y bananas*. Ediciones Mundi-Prensa. <https://books.google.com.pe/books?id=mAv3EQAcgZ8C&lpg=PP1&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
- Rojas, A. F., Aranzazu, L. M., Gaviria, G. H., & Carrero, J. I. (2014). Degradación térmica de polimetil metacrilato en múltiples extrusiones. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 131-142. <https://doi.org/10.25100/iyc.v16i2.3689>
- Rojas, A. F., Rodríguez-Barona, S., & Montoya, J. (2019). Evaluación de alternativas de aprovechamiento energético y bioactivo de la cáscara de plátano. *Información tecnológica*, 30(5), 11-24. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500011>
- Rojas, J. F., Quintero, V. A., & Benavides, F. E. (2015). Evaluación del aprovechamiento de subproductos generados a partir del procesamiento industrial del plátano (*Musa paradisiaca*) variedad Hartón, en el municipio de Sotomayor del departamento de Nariño. *SATHIRI*, 9, 32-52. <https://doi.org/10.32645/13906925.436>
- Roman, L., Gomez, M., Hamaker, B. R., & Martinez, M. M. (2019). Banana starch and molecular shear fragmentation dramatically increase structurally driven slowly digestible starch in fully gelatinized bread crumb. *Food Chemistry*, 274, 664-671. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.023>
- Ruiz, L. J. (2023). *Parámetros fisicoquímicos para la obtención de snack de ñuña (phaseolus vulgaris l.), sometidos a diferentes tiempos y tipos de aceite* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/5836>

- Salazar, D. (2022). *Caracterización del proceso de polimerización de la resina DGEBA utilizando análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC)* [Tesis de Grado, Universidad de Pamplona]. Repositorio Institucional de la UP [http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5476/1/Salazar\\_2021\\_TG.pdf](http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5476/1/Salazar_2021_TG.pdf)
- Salazar, D., Arancibia, M., Lalaleo, D., Rodríguez-Maecker, R., López-Caballero, M. E., & Montero, M. P. (2022). Physico-chemical properties and filmogenic aptitude for edible packaging of Ecuadorian discard green banana flours (*Musa acuminata* AAA). *Food Hydrocolloids*, 122, 1-42. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107048>
- Salcedo, J. G., Figueroa, J. A., & Hernández, E. J. (2017). *Agroindustria de productos amiláceos II: Métodos y técnicas de caracterización*. Ediciones Universidad de Sucre. <https://www.researchgate.net/publication/321386088>
- Salcedo-Mendoza, J., García-Mogollón, C., & Salcedo-Hernández, D. (2018). Propiedades funcionales de almidones de ñame (*Dioscorea alata*). *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16(2), 99-107. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v16n2.1170>
- Santoyo-Aleman, D., Sanchez, L. T., & Villa, C. C. (2019). Citric-acid modified banana starch nanoparticles as a novel vehicle for  $\beta$ -carotene delivery. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(14), 6392-6399. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9918>
- Servicio Nacional de Sanidad Agraria. (2020). Guía para la implementación de buenas prácticas agrícolas (BPA) para el cultivo de plátano. SENASA. <https://www.senasa.gob.pe/senasa/descargasarchivos/2020/07/Guia-BPA-PLATANO.pdf>
- Sessini, V., Arrieta, M. P., Kenny, J. M., & Peponi, L. (2017). Processing of edible films based on nanoreinforced gelatinized starch. *Polymer Degradation and Stability*, 132, 157-168. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.02.026>
- Sharlina, M. E., Yaacob, W. A., Lazim, A. M., Fazry, S., Lim, S. J., Abdullah, S., Noordin, A., & Kumaran, M. (2017). Physicochemical properties of starch from *Dioscorea pyrifolia* tubers. *Food Chemistry*, 220(1), 225-232. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.196>
- Sjöö, M., & Nilsson, L. (2018). *Starch in food: Structure, function and applications* (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- Sonkar, S., Jaddu, S., Pradhan, R. C., Dwivedi, M., Seth, D., Goksen, G., Sarangi, P.K., & Lorenzo, J. M. (2023). Effect of atmospheric cold plasma (pin type) on hydration and

- structure properties of kodo-millet starch. *Food Science and Technology*, 182, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114889>
- Soorianathasundaram, K., Narayana, C. K., & Paliyath, G. (2016). Bananas and plantains. *Encyclopedia of Food and Health*, 320-327. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12384947-2.00054-4>.
- Surendra, A., Mohan, G. N., James, J., Aboobacker, A. B., Eldhose, A., & Jagan, R. (2018). A comparative study on dual modification of banana (*Musa paradisiaca*) starch by microwave irradiation and cross-linking. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12(3), 2209-2217. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9837-x>
- Tao, J., Huang, J., Yu, L., Li, Z., Liu, H., Yuan, B., & Zeng, D. (2018). A new methodology combining microscopy observation with Artificial Neural Networks for the study of starch gelatinization. *Food Hydrocolloids*, 74, 151-158. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.07.037>
- Téllez, C. (2019). *Aplicaciones de la espectroscopía infrarroja en el análisis de alimentos* [Tesis de Pregrado, Universidad de Sevilla]. Repositorio Institucional de la US. <https://hdl.handle.net/11441/91690>
- Thanyapanich, N., Jimtaisong, A., & Rawdkuen, S. (2021). Functional properties of banana starch (*Musa spp.*) and its utilization in cosmetics. *Molecules*, 26(12), 1-16. <https://doi.org/10.3390/molecules26123637>
- Tibolla, H., Pelissari, F. M., Martins, J. T., Lanzoni, E. M., Vicente, A. A., Menegalli, F. C., & Cunha, R. L. (2019). Banana starch nanocomposite with cellulose nanofibers isolated from banana peel by enzymatic treatment: In vitro cytotoxicity assessment. *Carbohydrate Polymers*, 207, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.079>
- Tiernan, H., Byrne, B., & Kazarian, S. G. (2020). ATR-FTIR spectroscopy and spectroscopic imaging for the analysis of biopharmaceuticals. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 241, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118636>
- Torres, H. A. (2017). *Efecto biofungicida del gel aloe vera y extracto de moringa sobre la pudrición de corona en la fruta de banano* [Tesis de Grado, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio Institucional de la UTMACH. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/11710>
- Tovar, T. (2008). *Caracterización morfológica y térmica del almidón de maíz (Zea mays L) obtenido por diferentes métodos de aislamiento* [Tesis de Grado, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Repositorio institucional de la UAEH <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/10867>

- Trejo, K., Rodríguez, G., Reyes, J., Lizarazo, C., & Hernández, C. (2024). Almidón, una plataforma versátil en la industria de alimentos. *Revista Boliviana de Química*, 41(1), 44-51. <https://doi.org/10.34098/2078-3949.41.1.6>
- Trela, V. D. (2018). *Obtención y caracterización de almidón acetilado de mandioca* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Misiones]. Repositorio Institucional Digital de la UNAM. <https://hdl.handle.net/20.500.12219/3064>
- Utrilla-Coello, R. G., Rodríguez-Huezo, M. E., Carrillo-Navas, H., Hernández-Jaimes, C., Vernon-Carter, E. J., & Alvarez-Ramirez, J. (2013). In vitro digestibility, physicochemical, thermal and rheological properties of banana starches. *Carbohydrate Polymers*, 101, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.09.019>
- Valand, R., Tanna, S., Lawson, G., & Bengtström, L. (2019). A review of Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy used in food adulteration and authenticity investigations. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 37(1), 19-38. <https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1675909>
- Velandia, J. R. (2017). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*, 5(1), 115-140. <https://doi.org/10.21158/23823399.v5.n0.2017.2005>
- Vele, L. O. (2019). *Determinación del comportamiento térmico de la zanahoria blanca (Arracacia xanthorrhiza) y su almidón aplicando Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)* [Tesis de Pregrado, Universidad del Azuay]. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9496>
- Verma, P., Rani, R., Das, D., Rai, K. K., Gogoi, P., & Badwaik, L. S. (2024). Transformation of banana peel into biodegradable film added with starch and carboxymethyl cellulose and its characterization. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101356>
- Viana, L. M., Rodrigues, F. S. R., Santos, M. C. B., Lima, A. dos S., Nabeshima, E. H., Leite, M. de O., Martins, M. A., Carvalho, C. W. P. de, Maltarollo, V. G., Azevedo, L., Ferreira, M. S. L., Martino, H. S. D., Felisberto, M. H. F., & Barros, F. A. R. (2024). Green banana (*Musa ssp.*) mixed pulp and peel flour: A new ingredient with interesting bioactive, nutritional, and technological properties for food applications. *Food Chemistry*, 451(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139506>
- Von, M. C., & Machado, M. E. (2005). Evaluación de la textura y color de almidones y harinas en preparaciones sin gluten. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 4(5), 319-323. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72450403>

- Vu, M.-T., Nguyen, T. K.-A., Pham, T. T.-H., Nguyen, T.-D., Nguyen, P.-H., Nguyen, N.-T., & Nguyen, T.-T. (2024). Compare the effects of moist heat treatment and annealing kinetics on the resistant starch of green banana (*Musa paradisiaca* L.) starch. *Food Bioscience*, 62(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105262>
- Wang, S., & Copeland, L. (2013). Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility: a review. *Food & Function*, 4(11), 1564-1580. <https://doi.org/10.1039/C3FO60258C>
- Yang, M., Chang, L., Jiang, F., Zhao, N., Zheng, P., Simbo, J., Yu, X., & Du, S. K. (2022). Structural, physicochemical and rheological properties of starches isolated from banana varieties (*Musa* spp.). *Food Chemistry: X*, 16, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100473>
- Zalazar-Oliva, C., Góngora-Leyva, E., Legrá-Lobaina, A. A., Retirado-Mediaceja, Y., & Caneghem, J. V. (2021). Determinación del calor específico del mineral laterítico mediante el método de calorimetría diferencial de barrido. *Minería y Geología*, 37(3), 318-332.
- Zamora, O., & Amador, M. P. (2019). El papel del análisis térmico en el área de alimentos. *Con-Ciencia Estudiantil*, 6(1), 12-15.
- Zhang, L., Apea-Bah, F. B., Chen, X., Hornung, P. S., Malunga, L. N., & Beta, T. (2023). The physicochemical and structural properties and in vitro digestibility of pea starch isolated from flour ground by milling and air classification. *Food Chemistry*, 419, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136086>
- Zhang, P., Li, B., Hu, Z., Zhang, Q., Zhu, Y., & Hao, W. (2024). Effects of ultrasonic and microwave treatment on color, quality and drying characteristics of rice. *Journal of Cereal Science*, 116, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103856>
- Zhu, F. (2020). Underutilized and unconventional starches: Why should we care?. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 363-373. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.018>

## **ANEXOS**

**Anexo-I.** Análisis estadístico de prueba T de student para muestras pareadas del tamaño promedio de los gránulos de los almidones obtenidos por SEM.

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACG	ACB	105	-5,36	14,90	20,26	6,23	-8,82	0,0001

**Anexo-II.** Análisis estadístico de prueba T de student para muestras pareadas de la gelatinización de los almidones de cáscara de plátano obtenidos por DSC.

**Anexo-IIa.** Temperatura inicial ( $T_0$ )

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	0,58	71,35	70,77	0,37	2,66	0,1167

**Anexo-IIb.** Temperatura pico ( $T_p$ )

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-0,44	76,31	76,75	1,03	-0,75	0,5329

**Anexo-IIc.** Temperatura final ( $T_f$ )

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-0,44	84,83	85,27	0,17	-4,57	0,0447

**Anexo-IId.** Rango (R)

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-1,02	13,49	14,50	0,52	-3,37	0,0780

**Anexo-IIe.** Entalpía de gelatinización ( $\Delta H_{Gel}$ )

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-0,93	2,34	3,27	0,14	-11,33	0,0077

**Anexo-III.** Análisis estadístico de prueba T de student para muestras pareadas del contenido de amilosa y amilopectina de los almidones de cáscara de plátano.

**Anexo-IIIa.** Amilosa

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-6,13	26,66	32,79	1,33	-7,97	0,0154

**Anexo-IIIb.** Amilopectina

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-3,69	42,29	45,98	1.03	-6,17	0,0252

**Anexo-IV.** Análisis estadístico de prueba T de student para dos muestras en la caracterización del color de los almidones de cáscara de plátano.

**Anexo-IVa.** Luminosidad (L\*)

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-0,57	89,88	90,45	-120,92	0,0001

**Anexo-IVb.** Cromo a\*

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	0,41	1,09	0,67	87,68	0,0001

**Anexo-IVc.** Cromo b\*

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	0,21	4,59	4,35	22,27	0,0001

**Anexo-IVd.** Índice de blancura (W)

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-0,63	88,84	89,48	-84,97	0,0001

**Anexo-V.** Análisis estadístico de prueba T de student para muestras pareadas de las propiedades funcionales tecnológicas de los almidones de cáscara de plátano.

**Anexo-Va.** Capacidad de retención de agua (CRA)

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-9,59	157,87	167,47	0,69	-24,21	0,002

**Anexo-Vb.** Solubilidad (S)

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	0,96	1,56	0,60	0,03	51,72	0,0004

**Anexo-Vc.** Poder de hinchamiento (PH)

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	-0,09	1,60	1,69	0,004	-36,06	0,001

**Anexo-Vd.** Sinéresis (Si)

Obs (1)	Obs (2)	N	Media(dif)	Media (1)	Media (2)	DE(dif)	T	Bilateral
ACB	ACG	3	6,77	29,13	22,36	2,55	4,59	0,044